

**Олейник В.Ф., Сайко В.Г., Булгач С. В.**

**Радиотелекоммуникационные  
технологии мобильных систем:  
теоретические основы  
и практическое применение**



*том 1. Системы сотовой подвижной радиосвязи  
Учебно-методическое пособие*



**Київ 2004**

**Олейник В.Ф., Сайко В.Г., Булгач С. В.**

**Радиотелекоммуникационные  
технологии мобильных систем:  
теоретические основы  
и практическое применение**



*том 1. Системы сотовой подвижной радиосвязи  
Учебно-методическое пособие*



**Київ 2004**



Государственный университет информационно-коммуникационных  
технологий

Олейник В.Ф., Сайко В.Г., Булгач С. В.

**Радиотелекоммуникационные технологии мобильных систем:  
теоретические основы и практическое применение**



*том 1. Системы сотовой подвижной радиосвязи*

*Учебно- методическое пособие*

Киев 2004



УДК 621.39

Рецензенты: Гряник М.В., доктор техн. наук, СП "ІТС"  
(оператор сети связи CDMA)  
Бунин С.Г., доктор техн. наук, Украинский  
государственный центр радиочастот и надзора за связью  
Романок В.А., доктор техн. наук, Военный институт  
телекоммуникаций и информатизации НТУУ "КПІ"

Олейник В.Ф., Сайко В.Г., Булгач С. В. Радиотелекоммуникационные технологии мобильных систем: теоретические основы и практическое применение. том 1. Системы сотовой подвижной радиосвязи // Учебно-методическое пособие. — Киев, ГУИКТ, 2004. - 307 с.

Книга, представленная на ваш суд, - одна из первых отечественных попыток последовательного и отчасти систематизированного изложения возможностей радиотелекоммуникационных технологий подвижных систем, их применения и построения сетей. Основное внимание в книге уделено постоянно расширяющимся сетям мобильной связи, в ней также рассматриваются вопросы, связанные с процессом интеграции традиционных и систем связи с подвижными объектами.

В систематизированном виде изложены классификация и этапы развития наземных систем мобильной связи. Рассмотрены особенности функционирования сетей подвижной связи, принципы организации и основные технические решения на примере стандартов, используемых в системах связи с подвижными объектами в мире и Украине. Проанализированы тенденции и перспективы их совершенствования.

Предназначено для студентов в качестве учебно-методического пособия при изучении систем и техники мобильной связи по курсам "Системы и сети связи с подвижными объектами", "Системы радиосвязи", "Мобильные системы связи", при курсовом и дипломном проектировании и может быть полезно студентам других специальностей и аспирантам.

Олейник В.Ф.  
Сайко В.Г.  
Булгач С. В.

*Радиотелекоммуникационные технологии мобильных систем: теоретические основы и практическое применение  
том 1. Системы сотовой подвижной радиосвязи*

*Учебно- методическое пособие*

© Олейник В.Ф., Сайко В.Г, Булгач С.В. ; 2004

Содержание

Предисловие .....	6
<b>Раздел 1. Теоретические основы и принципы организационно-технического построения систем и сетей связи с подвижными объектами</b>	
Глава 1. Основные характеристики и тенденции развития систем подвижной связи .....	9
1.1 Развитие рынков систем связи с подвижными объектами .....	9
1.2 Классификация систем мобильной связи .....	9
1.3 Исторический экскурс развития систем связи с подвижными объектами .....	10
1.4 Современное состояние и тенденции развития систем связи с подвижными объектами .....	26
1.4.1 Состояние и динамика развития мобильной связи в мире .....	26
1.4.2 Динамика развития мобильной связи в Украине .....	32
Глава 2. Архитектура систем и сетей связи с подвижными объектами .....	43
2.1 Принципы построения систем и сетей связи с подвижными объектами .....	43
2.2 Структура и принципы построения международной сети связи .....	52
2.2.1 Принципы построения международной телефонной сети Украины .....	54
2.2.2 Структура и принципы построения зонных сетей связи .....	57
2.2.3 Нумерация на телефонных сетях Украины .....	58
2.2.4 Принципы построения местных телефонных сетей .....	58
2.3 Базовые станции контроля и измерения .....	68
2.4 Базовые станции приема/передачи .....	71
2.5 Подвижные мобильные станции .....	73
Глава 3. Организация работы систем мобильной связи .....	80
3.1 Сетевые и радиointерфейсы .....	80
3.2 Синхронизация сетей связи .....	83
3.2.1 Определение понятий .....	84
3.2.2 Архитектура сетей синхронизации .....	86
3.2.3 Элементы планирования сетей синхронизации .....	91
3.5 Сигнализация в сетях связи .....	93
Глава 4. Позиционирование абонентов в сетях мобильной связи .....	96
4.1 Предпосылки создания технологий .....	96
4.2 Технологии местоопределения в сетях мобильной связи .....	97
4.3 Позиционирование подвижных объектов на основе спутниковых навигационных систем .....	106



4.4 Практическое применение технологий позиционирования в сетях мобильной связи .....	108
4.5 Технологии позиционирования следующего поколения .....	113
Глава 5. Маршрутизация в сетях связи с подвижными объектами .....	118
5.1 Таблично-ориентированные протоколы .....	121
5.2 Зондовые протоколы маршрутизации .....	125
Глава 6. Характеристика условий функционирования систем связи с подвижными объектами .....	133
6.1 Особенности условий функционирования систем мобильной связи ..	133
6.2 Проблемы электромагнитной совместимости систем мобильной связи	135
6.2.1 Модели, используемые при анализе интермодуляционного влияния между РЭС различных систем сотовой связи .....	137
6.2.2 Методики определения интермодуляционного влияния между РЭС различных систем сотовой связи .....	139
6.3 Методы компенсации искажений сигналов на трассах систем связи с подвижными объектами .....	160
6.3.1 Разнесенный прием .....	160
6.3.2 Режим псевдослучайной перестройки рабочих частот .....	162
6.3.3 Эквалайзинг .....	167
Глава 7. Модуляция сигналов в системах связи с подвижными объектами ..	171
7.1 Модуляционные форматы цифровых стандартов мобильных систем ..	171
7.2 Критерии выбора модуляционных форматов при передаче данных в мобильных системах связи .....	176
Глава 8. Помехоустойчивое кодирование в системах связи с подвижными объектами .....	180
8.1 Методы кодирования речи .....	180
8.2 Кодирование речевых сообщений .....	181
8.2.1 Кодер речи .....	185
8.2.2 Методы оценки качества кодирования .....	192
8.3 Канальное кодирование .....	193
Глава 9. Антенны систем связи с подвижными объектами .....	206
9.1 Автомобильные антенны .....	206
9.2 Антенны для мобильных телефонов .....	208
9.3 Антенны базовых станций .....	209

Глава 10. Передача речевой информации в сетях связи с подвижными объектами .....	217
10.1 Способы передачи речи по мобильным сетям связи .....	217
10.2 Особенности оценки качества речи в мобильных системах связи ...	224
10.3 Экспериментальная оценка разборчивости слов мобильных телефонов при передаче речевой информации по национальным сотовым сетям .....	226
10.3.1 Общие вопросы испытаний мобильных телефонов .....	226
10.3.2 Методика испытаний мобильных телефонов .....	228
10.3.3 Результаты экспериментальной оценки разборчивости слов сотовых телефонов .....	230
Глава 11. Передача данных по каналам мобильной связи .....	232
11.1 Передача данных по трафиковому каналу .....	234
11.2 Передача коротких сообщений .....	235
Глава 12. Цифровые системы мобильной связи стандарта GSM .....	240
12.1 Общая характеристика стандарта GSM .....	240
12.2 Структура системы и общий алгоритм функционирования .....	242
12.3 Архитектура радиointерфейса .....	242
12.4 Взаимодействие радиointерфейса с сетью GSM .....	251
Глава 13. Цифровые системы мобильной связи стандарта cdmaOne (IS-45) .....	257
13.1 Общая характеристика стандарта .....	257
13.2 Архитектура прямого канала .....	263
13.3 Архитектура обратного канала .....	274
13.4 Принцип организации абонентского доступа .....	280
Список литературы .....	296
Приложение П1.1 Рекомендации по обеспечению гарантированного электроснабжения радиотелекоммуникационной аппаратуры .....	305



## Предисловие

В настоящее время проявляется тенденция к стремительному росту разнообразия услуг, предоставляемых сетями связи. Появилась возможность выбора способов общения посредством передачи речи и данных, используя персональные средства связи, находящиеся всегда «под рукой». Персональная связь расширилась настолько, что стала использоваться в качестве общедоступного средства человеческого общения.

Хотя системы связи с подвижными объектами - огромное достижение само по себе, бесспорно и то, что появились мобильные системы различных стандартов, объединение которых между собой оказалось весьма серьезной проблемой формирования единой сети с интеграцией услуг.

Для того, чтобы понять и решить эту проблему необходимо быть специалистом не только в области сетевых технологий, но и знать хотя бы часть того, что заложено в различных системах и стандартах мобильной связи и может быть использовано как связующее звено для объединения сетей.

В то же время за последние несколько лет проведено большое количество исследований и разработок, появились новые публикации и информационные материалы по системам связи с подвижными объектами. Так, только в 2001-2002 гг. в зарубежном издательстве John Wiley & Sons вышло более 30 книг по названной тематике общим объемом более 12 тыс. страниц. Не менее красноречивы и цифры, относящиеся к издательству Prentice Hall, в своей политике традиционно ориентирующемуся на запросы образовательной сферы. За упомянутый период им было выпущено более 15 книг по концептуальным основам, расчету и проектированию мобильных средств связи. Заметим, что речь в приведенных примерах идет лишь о литературе научно-инженерной направленности.

Однако на сегодняшний день в Украине ситуация с книгоизданием по данной тематике не столь радужная. Число и доступность профессиональных отечественных печатных источников, освещающих текущее и прогнозируемое состояние мобильных телекоммуникаций, явно не отвечают стремительным темпам возрастания социально-технологической роли последних в современной Украине. В тоже время достаточно высокий уровень проникновения мобильных систем связи в регионы страны и ощущающийся дефицит национальных книг профессионального характера, не может не вызвать озабоченности у всех, кто по роду своей деятельности причастен к упомянутой сфере.

Особо чувствительна нехватка изданий, где были бы отражены не только теоретические основы построения и функционирования мобильных систем, но и особенности практической эксплуатации сетей отечественных сотовых систем связи.

Хотя надо отметить, что большинство украинских вузов, готовящих специалистов радиотехнического профиля, оперативно откликнулись на кардинальные сдвиги в телекоммуникационной сфере, модернизировав учебные планы, обогатив преподаваемые предметы новыми разделами и предложив широкий спектр принципиально новых курсов [89,119,120,131]. В этом свете коренным интересам как студентов, так и преподавателей отвечал бы выпуск пособий, отражающих подобные учебно-методические разработки. Ограничение же публикаций этого профиля исключительно внутривузовскими рамками в данный момент сдерживает процесс взаимной ассимиляции опыта научно-педагогических коллективов и не отвечает духу творческой состязательности, традиционно присущему отечественной высшей школе. Руководствуясь названными мотивами, авторы предлагают читателю первый том 3-х томного издания книги под названием «Радиотелекоммуникационные технологии мобильных систем: теоретические основы и практическое применение», вобравшую в себя материалы читавшихся ими в последние годы курсов по теоретическим основам построения и вопросам практической эксплуатации мобильных систем на отечественных сетях связи.

Разумеется, компактный формат издания не оставляет простора для излишней детализации и попыток создать нечто самодостаточное. Авторы в значительной мере вынуждены опираться на сведения, получаемые студентами из предшествующих или параллельных курсов, нередко отсылая читателя к другим источникам. В то же время хотелось бы надеяться, что книга принесет пользу в плане формирования системного взгляда на краеугольные принципы и технологический фундамент мобильной связи, а, возможно, для кого-то послужит импульсом к более глубокому знакомству с предметом и самостоятельному поиску.

Несмотря на приоритетное учебное предназначение книги, можно полагать, что интерес к ней проявят и вполне сформировавшиеся специалисты, проектировщики и научные работники, поскольку даже самому искушенному эксперту приходится время от времени сверяться с литературой и регенерировать в памяти ту или иную информацию.

Работая в постоянном контакте и оперативном взаимодействии, авторы, тем не менее, имели свои зоны ответственности. В.Г. Сайко осуществлено общее редактирование книги, а также написаны главы 1-5, 7-16 и раздел 4. Глава 6 написана В.Ф. Олейником, глава 17 - С.В. Булгачем.

Сознавая, что возможные издержки и недочеты книги могут послужить предметом критики, авторы с благодарностью отнесутся к замечаниям и предложениям читателей и откликнутся на любое приглашение к дискуссии профессионального характера.



## Предисловие

В настоящее время проявляется тенденция к стремительному росту разнообразия услуг, предоставляемых сетями связи. Появилась возможность выбора способов общения посредством передачи речи и данных, используя персональные средства связи, находящиеся всегда «под рукой». Персональная связь расширилась настолько, что стала использоваться в качестве общедоступного средства человеческого общения.

Хотя системы связи с подвижными объектами - огромное достижение само по себе, бесспорно и то, что появились мобильные системы различных стандартов, объединение которых между собой оказалось весьма серьезной проблемой формирования единой сети с интеграцией услуг.

Для того, чтобы понять и решить эту проблему необходимо быть специалистом не только в области сетевых технологий, но и знать хотя бы часть того, что заложено в различных системах и стандартах мобильной связи и может быть использовано как связующее звено для объединения сетей.

В то же время за последние несколько лет проведено большое количество исследований и разработок, появились новые публикации и информационные материалы по системам связи с подвижными объектами. Так, только в 2001-2002 гг. в зарубежном издательстве John Wiley & Sons вышло более 30 книг по названной тематике общим объемом более 12 тыс. страниц. Не менее красноречивы и цифры, относящиеся к издательству Prentice Hall, в своей политике традиционно ориентирующемуся на запросы образовательной сферы. За упомянутый период им было выпущено более 15 книг по концептуальным основам, расчету и проектированию мобильных средств связи. Заметим, что речь в приведенных примерах идет лишь о литературе научно-инженерной направленности.

Однако на сегодняшний день в Украине ситуация с книгоизданием по данной тематике не столь радужная. Число и доступность профессиональных отечественных печатных источников, освещающих текущее и прогнозируемое состояние мобильных телекоммуникаций, явно не отвечают стремительным темпам возрастания социально-технологической роли последних в современной Украине. В тоже время достаточно высокий уровень проникновения мобильных систем связи в регионы страны и ощущающийся дефицит национальных книг профессионального характера, не может не вызвать озабоченности у всех, кто по роду своей деятельности причастен к упомянутой сфере.

Особо чувствительна нехватка изданий, где были бы отражены не только теоретические основы построения и функционирования мобильных систем, но и особенности практической эксплуатации сетей отечественных сотовых систем связи.

Хотя надо отметить, что большинство украинских вузов, готовящих специалистов радиотехнического профиля, оперативно откликнулись на кардинальные сдвиги в телекоммуникационной сфере, модернизировав учебные планы, обогатив преподаваемые предметы новыми разделами и предложив широкий спектр принципиально новых курсов [89,119,120,131]. В этом свете коренным интересам как студентов, так и преподавателей отвечал бы выпуск пособий, отражающих подобные учебно-методические разработки. Ограничение же публикаций этого профиля исключительно внутривузовскими рамками в данный момент сдерживает процесс взаимной ассимиляции опыта научно-педагогических коллективов и не отвечает духу творческой состязательности, традиционно присущему отечественной высшей школе. Руководствуясь названными мотивами, авторы предлагают читателю первый том 3-х томного издания книги под названием «Радиотелекоммуникационные технологии мобильных систем: теоретические основы и практическое применение», вобравшую в себя материалы читавшихся ими в последние годы курсов по теоретическим основам построения и вопросам практической эксплуатации мобильных систем на отечественных сетях связи.

Разумеется, компактный формат издания не оставляет простора для излишней детализации и попыток создать нечто самодостаточное. Авторы в значительной мере вынуждены опираться на сведения, получаемые студентами из предшествующих или параллельных курсов, нередко отсылая читателя к другим источникам. В то же время хотелось бы надеяться, что книга принесет пользу в плане формирования системного взгляда на краеугольные принципы и технологический фундамент мобильной связи, а, возможно, для кого-то послужит импульсом к более глубокому знакомству с предметом и самостоятельному поиску.

Несмотря на приоритетное учебное предназначение книги, можно полагать, что интерес к ней проявят и вполне сформировавшиеся специалисты, проектировщики и научные работники, поскольку даже самому искушенному эксперту приходится время от времени сверяться с литературой и регенерировать в памяти ту или иную информацию.

Работая в постоянном контакте и оперативном взаимодействии, авторы, тем не менее, имели свои зоны ответственности. В.Г. Сайко осуществлено общее редактирование книги, а также написаны главы 1-5, 7-16 и раздел 4. Глава 6 написана В.Ф. Олейником, глава 17 - С.В. Булгачем.

Сознавая, что возможные издержки и недочеты книги могут послужить предметом критики, авторы с благодарностью отнесутся к замечаниям и предложениям читателей и откликнутся на любое приглашение к дискуссии профессионального характера.

дящиеся от него даже на большом расстоянии, не имеют возможности использовать этот канал до окончания сеанса связи данного MS. В радиальных системах, как правило, не удастся создать равномерную напряженность электромагнитного поля от передатчика BS (Base Station) на всей обслуживаемой территории и, следовательно, обеспечить одинаковое качество связи абонентам. Поэтому, радиальные системы используются при небольшом количестве абонентов и с ограниченным выходом на PSTN.

Радиально-зонавые системы позволяют организовать территориальную систему радиосвязи как, например, местные зонавые системы радиосвязи, радиальные системы радиосвязи вдоль транспортных магистралей, радиолинии удлиненные для труднодоступных малонаселенных районов.

Территориальные системы имеют сотовую структуру, в которой вся обслуживаемая территория разбивается на небольшие по площади зоны, что позволяет обеспечить одинаковое качество связи на всей территории. В системе имеется возможность повторного использования радиочастотного ресурса.

Для управления системой требуется разветвленная система радио- и проводных волоконно-оптических каналов связи. По типу используемых каналов ССПО классифицируют на аналоговые и цифровые.

### 1.3 Исторический экскурс развития систем связи с подвижными объектами

В условиях города ССПО общего пользования приводит к новой концепции персональной связи, в основе которой лежит максимальная свобода абонента в его перемещениях при сохранении непрерывного взаимодействия с базовой телефонной сетью. Освоение новых полос радиочастот и переход на создание сотовых систем подвижной радиосвязи общего пользования позволили значительно увеличить емкость сетей подвижной радиосвязи общего пользования и тем самым обеспечить большое число подвижных абонентов услугами автоматической местной междугородной и международной подвижной радиосвязи (рис.1.1).

Идея первого мобильного телефона возникла вскоре после окончания второй мировой войны. По замыслу разработчиков из исследовательской лаборатории Bell Laboratories компании AT&T располагаться такой аппарат должен был в автомобиле. Здесь нет ничего удивительного — вряд ли нашлось бы много желающих таскать двухпудовое устройство на себе.

Согласно некоторым источникам, первый сеанс мобильной радиотелефонной связи состоялся более полувека назад — 3 декабря 1950 года в шведском городе Лидинге. Именно тогда инженер-изобретатель Стюре Лаурен (Sture Lauhren) поднял трубку телефона, базовая часть которого располагалась на двух задних сиденьях автомобиля.

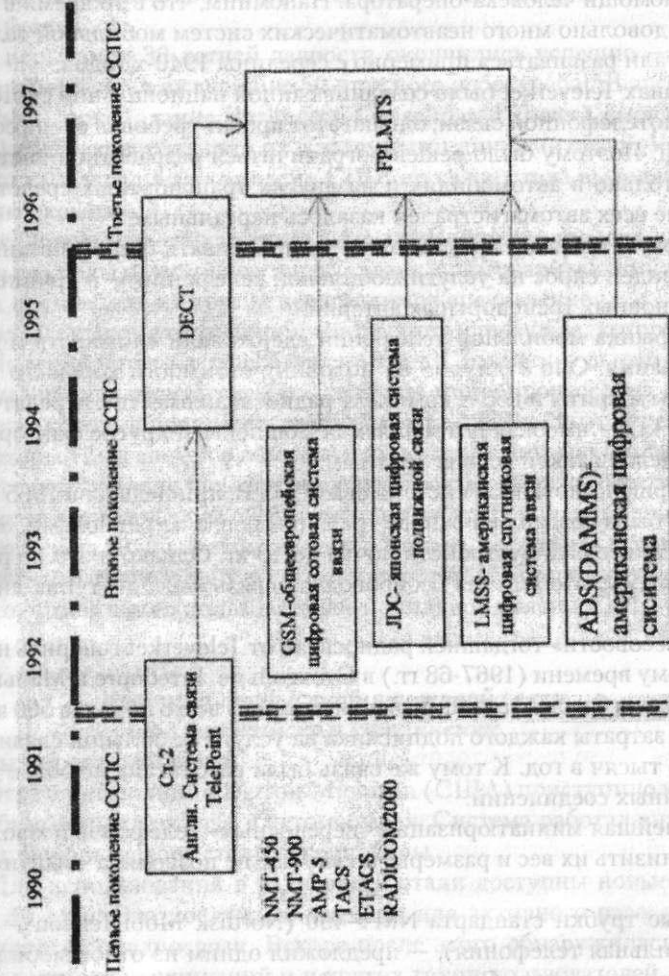


Рис. 1.1 Поколения сотовой подвижной радиосвязи и этапы их развития



Первая в мире коммерческая мобильная радиотелефонная система была запущена шведской компанией Televerket в 1956 г. известная как МТА (Mobil-Telefonsystem A — система мобильной телефонии А), она была первой автоматической системой, которая обеспечивала радиосвязь в транспортном средстве без помощи человека-оператора. Напомним, что в то время в мире существовало довольно много неавтоматических систем мобильной телефонии, которые стали развиваться примерно с середины 1940-х годов.

В планах Televerket было создание единой национальной системы мобильной радиотелефонной связи, однако этот проект требовал очень серьезных инвестиций. Поэтому было решено ограничиться разработкой систем, располагаемых только в автомобилях и на других транспортных средствах. Однако покрытие всех автомагистралей казалось нереальным.

В первую очередь, предлагалось устанавливать базовые станции там, где был очевиден спрос на услуги мобильной телефонии — в крупных городах и вдоль основных транспортных артерий.

Рост рынка мобильной телефонии сдерживали сложность и дороговизна оборудования. Оно «тянуло» на половину стоимости хорошего автомобиля. Большие габариты и вес — комплект радиосвязи вместе с передатчиком весил около 40 кг., — высокая потребляемая мощность и другие факторы «по умолчанию» делали такой сервис элитным.

Усовершенствованная система связи МТВ, пришедшая в 1965 году на смену МТА, была создана на основе транзисторов, а не радиоламп. Это позволило снизить вес радиоустройств почти до 10 кг. Однако и это не решало главной проблемы. Мобильная беспроводная связь была доступна лишь на транспорте.

О «массовости» тогдашней радиосвязи от Televerket говорить не приходится — к тому времени (1967-68 гг.) в Стокгольме, Гетеборге и Мальме, где были расположены базовые станции, насчитывалось всего порядка 500 абонентов. В то время затраты каждого подписчика на услуги мобильной связи составляли около \$5 тысяч в год. К тому же связь была рассчитана не более чем на 6 одновременных соединений.

Дальнейшая миниатюризация «переносных» телефонов позволила существенно снизить их вес и размеры, но все еще не позволяла «выйти» из автомобиля.

Первые трубки стандарта NMT-450 (Nordisk MobilTelefon — скандинавская мобильная телефония), — предложил одним из отцов мобильной связи. Аппараты выпускника Стокгольмской технической школы Эстен Мякитоло, уже можно назвать мобильными. Однако они не были предназначены для ношения человеком.

Позже (в середине 1980-х) появились телефоны для появившихся сетей NMT-900 (например, Ericsson Hotline, Curt и Mobira Cityman) — они оказа-

лись гораздо легче и компактнее трубок стандарта NMT-450.

Успех в этом направлении больше всего сопутствовал американской компании Motorola. Она еще в 1967 году представила первые портативные радиостанции для полиции Чикаго. Но через какое-то время Мартин Купер понял, что может создать относительно небольшой мобильный телефон, и воплотил свое намерение в реальность.

Полевые испытания 30-летней давности окончились успешно — базовая станция, смонтированная на вершине 50-этажного небоскреба Alliance Capital Building в Нью-Йорке (здание Burlington Consolidated Tower), смогла обслуживать до 30 абонентов, соединяя их с наземными линиями связи. Уже начиная с 1974 года Федеральная комиссия США по связи стала выделять частоты для частных компаний.

Тогда, как, впрочем, и сейчас, жителей Нью-Йорка трудно чем-либо удивить. Однако в те годы идущий по улице человек и разговаривающий при этом по телефону, производил на других неизгладимое впечатление.

Для вывода на рынок этого «кирпичеподобного» телефона, который весил более 1 кг, Мартину Куперу понадобилось 10 лет. Столь длительный срок, по-видимому, был вызван отсутствием подходящих микропроцессоров для сотовых телефонов, которые появились лишь в начале 1980-х. За это время масса телефона, который был введен в коммерческую эксплуатацию компанией Motorola в 1983 году, уменьшилась почти вдвое. Стоимость этого одного из первых в мире мобильных Dupac без дисплея и каких-либо дополнительных функций составляла \$3500. В этом же году в Чикаго, после ряда успешных полевых испытаний была развернута сеть стандарта AMPS. Еще 7 лет понадобилось для того, чтобы число пользователей мобильной связи в США достигло 1 млн.

### **Краткая предыстория сотовой связи на американском континенте**

#### **Предпосылки сотовой связи**

**1921** — Отделение полиции Detroit Michigan (США) приступило к использованию мобильной радиосвязи в автомобилях. Система работала на частоте около 2 МГц. Каналы вскоре стали переполнены.

**1940** — Для использования в радиосвязи стали доступны новые частоты между 30 и 40 МГц. Это послужило толчком для активного развертывания систем полицейской радиосвязи. Вскоре после этого обнаружилась потребность с этой форме коммуникаций и у других групп пользователей. Частные лица, компании и госсектор стали покупать и использовать свои собственные мобильные устройства.

**1945** — В Сент-Луисе (штат Миссури) была торжественно открыта первая общедоступная радиотелефонная система в США. Федеральная комиссия по

связи (FCC) выделила для этой цели 6 каналов, отделенных друг от друга на 60 кГц, в диапазоне 150 МГц. Однако оборудование для мобильной связи было недостаточно совершенным для того, чтобы избежать интерференции радиоволн.

**1947** — На автостраде Нью-Йорк — Бостон заработала система мобильной связи в диапазоне 35 — 44 МГц. Связь была низкого качества, а телефоны работали только в режиме «push-to-talk».

**1949** — FCC разрешила использовать отдельные радиоканалы частным телефонным компаниям, которые известны как «Radio Common Carriers» (ROC). Эти операторы не предоставляли услуг радиотелефонной связи, а лишь коммутировали радиотелефоны с телефонной сетью общего пользования.

**1955** — Число каналов в диапазоне 150 МГц было увеличено до 11 (для этого до 30 кГц был уменьшен межчастотный интервал).

**1956** — Было добавлено 12 каналов в диапазоне 450 МГц. Все системы работали в ручном режиме — каждый входящий и исходящий вызов с мобильного устройства совершался при участии человека — телефонного оператора.

**1964** — Была разработана новая система (150 МГц) с автоматическим выбором свободного канала для каждого вызова. С этих пор отпала нужда в режиме «push-to-talk», и абонент избавился от необходимости удерживать в момент передачи речи кнопку аппарата. Также стал не нужен и оператор — пользователи получили возможность самостоятельно набирать телефонный номер абонента.

**1969** — Технология автоматического выбора канала стала доступна и в диапазоне 450 МГц. Стандартом услуг мобильной телефонной связи в США стал IMTS (Improved Mobile Telephone System).

### Продвинутые системы (концепция сотовой связи)

Еще в 1947 году стало ясно, что небольшие соты с многократным использованием частот могут существенно увеличить пропускную способность каналов. Таким образом, была разработана основная концепция сотовой связи. Однако самой технологии еще не существовало.

**1953** — AT&T внесла на рассмотрение FCC широкополосную систему мобильной телефонной связи, работающую в диапазоне 800 МГц.

**1970** — FCC объявила о предполагаемом выделении участка спектра шириной 75 МГц в диапазоне 800 МГц. Она также призвала производителей коммуникационного оборудования вносить свои предложения, направленные на обеспечение мобильной радиосвязи.

**1971** — AT&T ответила на призыв FCC техническим докладом, в котором была показана возможность реализации «сотовой системы». Это была един-

ственной системой, утвержденной FCC, из всех заявленных на рассмотрение.

**1974** — FCC приняла решение о выделении 40 МГц частотного спектра для оказания услуг мобильной телефонной связи и сопутствующих приложений для реализации возможности развертывания так называемых «сотовых систем». Компании Western Electric было запрещено производить терминальное оборудование для сотовой связи, поскольку уже предлагала сетевое оборудование, а продавать одновременно оба класса систем не могла по причине антимонопольных ограничений регулирующих органов.

**1975** — AT&T подала заявку на разрешение к использованию опытной системы сотовой связи в Чикаго.

**1977** — AT&T получила эту лицензию в марте. Компания Bell Telephone разработала и ввела в эксплуатацию опытную систему сотовой связи.

**1978** — В середине года стартовала фаза тестирования оборудования; в конце года началась фаза тестирования услуг. Для испытаний у трех поставщиков была закуплена 21 тысяча мобильных аппаратов. Система обслуживала порядка 2 тысяч пользователей, участвующих в эксперименте.

**1981** — FCC выпустила правила использования стандарта сотовой связи. Компании Western Electric разрешили производить сотовые терминалы и сетевое оборудование.

*Составлено по данным ATT Cellular Telephone Equipment Installation Course*

### Этапы становления мобильной связи в Украине

**1992 г.** — на рынке Украины появился первый оператор мобильной связи — СП «Украинская Мобильная Связь» (УМС).

**Июль 1993 г.** — Леонидом Кравчуком сделан первый в Украине звонок по мобильному телефону. Стоимость исходящего вызова на то время составляла около \$1 (входящего — в два раза ниже), абонплата — около \$200, подключение — порядка \$500. Цена мобильного телефона была в районе \$1 — 2 тыс.

**1994 г.** — основано ЗАО «Киевстар Дж.Эс.Эм.».

**1995 г.** — на рынок вышли два новых оператора мобильной связи — «Цифровая сотовая связь Украины» (торговая марка DCC) в г. Донецке и АО «Украинские радиосистемы» (торговая марка WellCOM).

**1996 г.** — создано совместное украинско-американское предприятие Golden Telecom.

**Апрель 1996 г.** — запущена первая цифровая сотовая сеть компании DCC.

**Декабрь 1997 г.** — начата коммерческая эксплуатация сети мобильной связи «Киевстар Дж.Эс.Эм.» под торговой маркой BRIDGE.

**1998 г.** — существенно снижается стоимость подключения и мобильных телефонов (на 30 — 40%).

**Октябрь 1998 г.** — состоялся коммерческий запуск сети WellCOM.

**1999 г.** — компанией УМС внедрена услуга передачи коротких сообщений (SMS).



**Февраль 1999 г.** – Golden Telecom первым предложил украинским абонентам новую для отечественной телекоммуникационной отрасли услугу предоплаченной мобильной связи под торговой маркой UNI.

**Декабрь 1999 г.** – введена посекудная тарификация, начиная с 30-й секунды разговора. В киевском метро появляется сеть компании UMC.

**Май 2000 г.** – оператор “Киевстар Дж.Эс.Эм.” обеспечил возможность доступа к Интернету с мобильного телефона, основанную на технологии WAP.

**Октябрь 2000 г.** – Госкомсвязи отменяет разрешения на использование мобильных телефонов.

**Декабрь 2001 г.** – количество пользователей мобильной связи достигло 1 млн. чел.

**Октябрь 2002 г.** – российская компания “Альфа-групп” объявила о приобретении акций компании “Киевстар Дж.Эс.Эм.”.

**Ноябрь 2002 г.** – подписано соглашение между российским оператором МТС и владельцами UMC (“Укртелеком”, KPN и Deutsche Telekom) о покупке 57,7% акций украинского оператора. UMC запустил в тестовую эксплуатацию услугу передачи мультимедийных сообщений (MMS).

**Декабрь 2002 г.** – южнокорейская корпорация Daewoo продала свой пакет акций (49%) ЗАО “Украинские радиосистемы” кипрским компаниям Varkedge Ltd. и Occidental Management Co., Ltd.

**Январь 2003 г.** – Верховная Рада приняла в первом чтении законопроект о внесении изменений в закон “О связи”, запрещающий предприятиям и объединениям связи всех форм собственности устанавливать плату за входящие телефонные звонки.

**Март 2003 г.** – Президент Украины подписал принятый в феврале Верховной Радой Закон “О внесении изменений в закон “О связи”, который предусматривает бесплатные входящие вызовы для всех видов телефонной связи. Закон должен вступить в действие 19 сентября текущего года.

**Апрель 2003 г.** – руководство WellCOM заявило о начале широкомасштабного развития своей сети по Украине.

**Июль 2003 г.** – Верховной Радой принят Закон “О телекоммуникациях”, отменяющий ранее действовавший в Украине закон “О связи”, включая ряд поправок к нему, в том числе поправку о запрете оплаты входящих разговоров.

**Июль 2003 г.** – российская компания МТС стала полноправным владельцем 100% акций компании UMC.

**Август 2003 г.** – на базе компании UMC создан виртуальный оператор “Джинс”.

**Март 2004 г.** – ЗАО “Цифровая сотовая связь Украины” (торговая марка DCC) и компания Turkcell (Турция) приступили к созданию национальной сети сотовой мобильной связи на Украине стандарта GSM-1800

Первая реально действующая система мобильной радиосвязи начала функционировать в 1946 году S.Luis USA. В 40-х годах Белловская лаборатория ATNT предположила идею разбиения всей обслуживаемой территории на небольшие участки, которые начали называться сотами (cell — ячейка, сота). Это позволило бы без всяких взаимных помех использовать ту же самую частоту повторно в других ячейках. В конце 70-х годов Швеция, Финляндия, Исландия, Дания, Норвегия разработали единый стандарт Nordic Mobile Telephone-450. Эксплуатация -1981г. Этот стандарт широко использовался в скандинавских странах, Австрии, Голландии, Бельгии, Швейцарии, Балтии, Беларуси, России, Молдове и в странах ближнего востока, Азии. В Украине стандартом покрыты более 100 городов. 1985г — на базе этого стандарта разработан NMT-900, который позволил расширить функциональные возможности системы, значительно увеличить абонентскую емкость системы. 1983г — USA, Чикаго начали коммерческую эксплуатацию сети стандарта AMPS. 1985г — Великобритания применила национальный стандарт TACS, разработанный на основе американского стандарта AMPS. 1987г — в Лондоне увеличивается количество абонентов благодаря чему увеличилась полоса используемых частот и новая версия получила название ETACS. В 1985г во Франции появилась система Radiocom. С 1986 года в Скандинавских странах начал применяться стандарт NMT-900.

Все вышеперечисленные стандарты являются аналоговыми и относятся к первому поколению систем сотовой связи (рис.1.1). Аналоговыми эти системы называются потому, что в них используется аналоговый способ передачи информации с помощью обычной ЧМ и ФМ. Этот способ имеет ряд существенных недостатков:

- относительно низкая емкость, являющаяся прямым следствием недостаточно рационального использования выделенной полосы частот при частотном разделении каналов;
- прослушивание разговоров другими абонентами;
- отсутствие эффективных методов борьбы с замираниями

сигналов под влияниями окружающего ландшафта и зданий в следствии передвижения абонента.

Кроме этого, использование различных стандартов сотовой связи и большая перегруженность выделенных частотных диапазонов стали препятствовать ее применению. Увеличить число абонентов можно было двумя способами:

- расширить частотный диапазон (например, при переходе TACS в ETACS);
- перейти к рациональному частотному планированию, позволяющему гораздо чаще использовать одни и те же частоты.

Использование новейших технологий в области связи, позволило подойти в начале 80-х годов к новому этапу развития систем сотовой связи — созданию

систем второго поколения, основанного на цифровой обработке сигнала. С целью разработки единого европейского стандарта цифровой сотовой связи для выделенного в этих диапазонах 900 МГц в 1982 г. Европейская конференция администрации почтовой и электросвязи СЕПТ (организация, объединяющая администрации связи 26 стран) создала специальную группу - Group Special Mobil - GSM - Global System Mobil. Результат работы этой группы 1990 г. определили требования к данному стандарту:

- -временное разделение каналов,
- -шифрование сообщений и защита данных абонентов;
- -использование блочного и сверхточного кодирования;
- -новый вид модуляции GSMK.

Развитие средств связи в мире в разных частотных диапазонах идет в соответствии с рекомендациями WARC-92 и направлениями, разработанными для общемировой системы связи третьего поколения FPLMTS (более позднее название IMT-2000).

В настоящее время в Украине внедрены сотовые системы следующих стандартов: аналоговый NMT-450, цифровые D-AMPS, GSM-900, DCS-1800, CDMA.

NMT-450 является единственный аналоговый стандарт в настоящий момент в Украине. Основные технические характеристики этого стандарта следующие:

Полоса частот, МГц:	
для передачи подвижной станцией	453,0...457,5
для приема подвижной станцией	463,0...467,5
Ширина полосы частот, кГц	20(25)
Количество каналов	180(225)
Дуплексный разнос каналов, МГц	10
Мощность передатчика базовой станции, Вт	15...50
Мощность передатчика подвижной станции, Вт	0,15...1,5
Радиус ячейки, км	15...40

Как видим, рабочие частоты стандарта находятся в двух полосах: 453...457,5 и 463...467,5 МГц. Разнос каналов приема и передачи равен 10 МГц.

Диапазон 450 МГц упомянут в рекомендациях WARC-92 в числе реально действующих для подвижной связи, поскольку из-за большого размера сот он мало пригоден для районов с большой плотностью абонентов, а в районах с малой плотностью конкурирует со спутниковыми системами связи.

В процессе модернизации системы была создана система 450i (improved, т.е. «улучшенный» — введена защита от несанкционированного доступа, а также появились более современные портативные и передвижные станции). Сейчас рассматривается очередная модернизация системы под индексом NMT-450i+ (оказание дополнительных услуг). Для более широкого использования

системы в Украине, странах СНГ и в ряде других государств предлагается выполнить ряд дополнительных работ по ее дальнейшей модернизации, направленных, с одной стороны, на уменьшение затрат при развитии сотовой сети в регионах с малой плотностью населения (использование контроллеров базовых станций, малоканальных базовых станций и абонентских станций с мощностью передатчика 7...10Вт), а с другой, — на увеличение числа абонентов в регионах с большой плотностью населения (использование микрозоновых сетей и дополнительного временного разделения каналов).

Цифровая система D-AMPS по технологии множественного доступа TDMA. В настоящее время одна из самых распространенных из цифровых сотовых систем в мире. Основные технические характеристики этого стандарта представлены в таблице 1.1.

Коммерческая эксплуатация оборудования стандарта D-AMPS в США началась в 1991 году. Из-за необходимости обеспечить преемственность с аналоговым стандартом в США в стандарте используют неоптимальный выбор ширины частотного канала (30 кГц по сравнению с 200 кГц в аналогичном по назначению стандарте GSM 900).

Таблица 1.1

Характеристика стандарта	GSM 900	DCS 1800	D-AMPS	CDMA
Метод доступа	TDMA	TDMA	TDMA	TDMA
Полоса частотного канала, кГц	200	200	30	1250
Число речевых каналов на несущую	8(16)	8(16)	3	До 62
Скорость преобразования речи, кБит/с	13(6,5)	13(6,5)	8	1...8
Алгоритм преобразования	RPE-LTP	RPE-LTP	VSELP	CELP
Эквивалентная полоса на речевой канал, кГц	25(12,5)			
Вид модуляции	0,3 GSMK	0,3 GSMK	4 DQPSK	QPSK
Рабочий диапазон частот, МГц	935-960	1805-1880	869-894	869-894
	890-915	1710-1785	824-849	824-849
			1930-1990	1850-1910
			1850-1910	1930-1990
Радиус соты, км	0,5-35	0,01-0,06	0,5-20	



Технология стандарта D-AMPS ориентирована на удовлетворение постоянно изменяющихся требований рынка. Развиваясь и совершенствуясь, D-AMPS превратился в мощный, гибкий и надежный стандарт, предоставляющий широкие возможности как для пользователя, так и для оператора. Намечено введение прогрессивных алгоритмов динамического назначения каналов в зависимости от реальной обстановки, учета голосовой активности и более тонкой регулировки мощности подвижных терминалов, что в комплексе должно привести к многократному увеличению спектральной эффективности.

Система D-AMPS является одним из фаворитов при формировании мировой системы персональной связи. В системе D-AMPS для передачи информации прямого канала (от базовой станции к подвижному) отводится полоса частот 869...894 МГц, т.е. прямой и обратный каналы разнесены по частоте на 45 МГц (дуплексный разнос по частоте). Один частотный канал занимает половину 30 кГц, так что в пределах выделенного диапазона, с учетом защитных полос по краям, размещается 832 частотных канала. Существует версия стандарта в перспективном диапазоне 1900 МГц.

Данный стандарт применяется в настоящее время более чем в 35 странах, при этом основная масса пользователей находится в Северной Америке.

В Украине компания "Цифровая сотовая связь" (DCC) развернула сотовую связь стандарта D-AMPS в Донецке, Киеве, Одессе, Харькове и других городах Украины. К сожалению, широкое внедрение данного стандарта может привести к противоречиям, связанным с его использованием, т.к. в Европе он не находит широкого применения (Украина, Россия, Молдова, Чехия).

В конце 2003 года (торговая марка DCC) и компания (Турция) приступили к созданию национальной сети сотовой мобильной связи на Украине стандарта GSM-1800. По словам президента DCC Валерия Степаненко, стороны договорились о создании нового предприятия, в котором 51% акций будет принадлежать компании Turkcell и 49% - DCC. Общий объем инвестиций составит \$400 млн. Turkcell уже осуществляет подобные проекты в Азербайджане, Грузии, Казахстане, Молдове, на Северном Кипре.

Цифровая система по технологии множественного доступа TDMA в стандарте GSM-900 в настоящее время в техническом отношении — самая совершенная система мобильной сотовой связи. Она разрабатывалась позднее системы D-AMPS и не несет груза преемственности с аналоговыми системами, что отразилось прежде всего на выборе ширины частотного канала (200 кГц против 32 кГц в D-AMPS). Однако по основ-

ным эксплуатационным характеристикам эти системы очень близки. В стандарте GSM более дифференцирована и полнее стандартизирована инфраструктура, многие черты его инфраструктуры заимствуются при разработке других систем персональной связи, например, спутниковых. Стандарт GSM принят за основу в Европе. Основные технические характеристики этого стандарта приведены в таблице 1.1.

GSM обладает повышенной помехоустойчивостью по сравнению с аналоговыми системами, что позволяет увеличить повторяемость частот на обслуживаемой территории и повысить эффективность использования РЧС. Однако, спектральная эффективность систем GSM несколько раз ниже, чем системы D-AMPS.

По сравнению с другими цифровыми стандартами GSM обеспечивает лучшие энергетические и качественные характеристики связи, имеет самые высокие характеристики безопасности и конфиденциальности связи.

GSM находится в состоянии непрерывного развития, в результате чего вводятся в действие новые характеристики и функциональные возможности, расширяющие и дополняющие существующие функции и услуги.

В соответствии с прогнозом британской аналитической фирмы "Analysys" стандарт GSM будет доминировать на мировом рынке мобильной связи.

У нас в стране (да и на всем пост советском пространстве) возникли некоторые трудности с вводом GSM. Дело в том, что частотный диапазон 900 МГц используется военными, системой воздушной радионавигации, диспетчерскими радиолокаторами управления воздушным движением. Эти системы еще длительное время будут находиться в эксплуатации. Поэтому процесс определения сводных частот требует проведения тщательных исследований и согласований.

В Украине в марте 1997 года был проведен конкурс (тендер) на право предоставления услуг мобильной связи в стандарте GSM, который определил трех победителей АО "Украинские радиосистемы", ОАО "Киевстар Дж.Эс.Эм." и компанию "Украинская мобильная связь". 17 сентября состоялся пуск в эксплуатацию первой очереди сети GSM "Украинской мобильной связи". Все три оператора предполагают обеспечить роуминг с сетями России, Латвии, Литвы, Голландии, Дании, Норвегии, Кипра, Испании, Германии, Мальты, Швейцарии. В Украине стандартом GSM покрыта почти вся Украина.

Система стандарта DCS-1800 — новейшая версия европейского стандарта GSM-900 и аналогична ему (см. табл.1.1). Различаются они не столько технически, сколько более широкая рабочая полоса частот в сочетании с меньшими размерами сот позволяет строить сотовые сети

значительно большей емкости, и именно расчет на массовую систему мобильной связи с относительно компактными, легкими, удобными и недорогими терминалами был заложен в основу этой системы.

Система стандарта DCS-1800 использует полосы частот 1710...1785 и 1805...1880 МГц. Благодаря использованию более высокого частотного диапазона достигается сразу несколько преимуществ: в пределах данной территории можно установить большее количество базовых станций, радиосвязи и увеличивается емкость сети, обеспечивается лучшее качество связи и увеличивается емкость сети, обеспечивается лучшее радиопокрытие внутри помещений. Одновременно для персональной связи в этом диапазоне может быть выделена более широкая (в абсолютном измерении) полоса. Важным достоинством стандарта DCS-1800 является возможность обеспечения автоматического роуминга как с другими сетями этого стандарта, так и с сетями GSM-900, PCS-1900.

Согласно IMT 2000 в Европе диапазон 1800 МГц отведен для создания персональной связи общего пользования, при этом решаются две задачи: прежде всего — обеспечение массовости и в перспективе — удешевление сотовой связи. Все вместе это делает систему DCS-1800 идеальной для массового пользователя и, вероятно, позволят ей выполнить некоторые задачи, традиционно решаемые проводной и локальной беспроводной связью. Стандарт DCS-1800 используется в Европе (Англия, Германия, Франция, Швейцария, Финляндия, Дания, Украина, Россия), Юго-Восточной Азии (Малайзия, Таиланд, Сингапур, Гонконг) и Африке (Мозамбик).

С декабря 1996г. услуги сотовой связи в стандарте DCS-1800 (оператор “Банкомсвязь”) стали объективной реальностью для жителей Украины. Киев — первый среди городов стран Восточной Европы и СНГ, использующей систему DCS-1800.

Однако следует иметь в виду, что в Украине в диапазоне 1,7...2,2 ГГц работают РЭС специального назначения и радиорелейные линии, т.е. обеспечение электромагнитной совместимости в этом диапазоне — достаточно серьезная проблема.

Перечисленные цифровые системы основаны на методе множественного доступа с временным разделением каналов (TDMA). Однако в последнее время некоторые операторы приступили к развертыванию систем сотовой связи на основе множественного доступа с кодовым разделением каналов (CDMA). Стандарт CDMA разрабатывался в целях добиться большей, по сравнению с TDMA, емкости сетей (так, по сравнению с системой DCS-1800, CDMA дает выигрыш в числе абонентов в 3-6 раз) и вобрав в себя усовершенствования, что позволило добиться увеличения зоны покрытия и повышения качества передачи. Он начал

применяться с декабря 1995г. в Гонконге, затем в США, Южной Корее. В 1996г. более 35 ведущих операторов в мире выбрали CDMA в качестве основной системы. По количеству пользователей стандарт CDMA занимает второе место.

В стандарте CDMA используются полосы частот в диапазоне 800 и 1900 МГц. Два варианта CDMA практически одинаковы по техническим характеристикам и отличаются только полосами частот. Основные технические характеристики стандарта приведены в таблице 1.1.

CDMA — единственная технология, поддерживающая динамическое выделение требуемой полосы частот и позволяющая перераспределять ресурсы между разными пользователями режиме реального времени. Например, для получения абонентом значительного объема данных необходим большой участок частотного спектра, а когда эти данные просматриваются или редактируются, потребность в рабочей полосе частот существенно снижается или исчезает вообще. В системе CDMA высвободившаяся полоса частот передается другому абоненту, что позволяет автоматически выделять необходимую полосу по требованию пользователя и одновременно экономить частотные ресурсы.

Учитывая хронически дефицит спектра в нашей стране, можно ожидать, что эта технология, благодаря чрезвычайно высокой эффективности использования спектра, завоеует украинский рынок услуг подвижной связи в качестве одного из основных стандартов.

Споры о преимуществах и перспективах этих технологий пока продолжаются. Многие специалисты в сфере телекоммуникаций полагают, что технология сотовой связи CDMA в ближайшие годы затмит все остальные, вытесняя аналоговые NMT, AMPS, и др., составляя серьезную конкуренцию цифровым технологиям (таким как GSM, D-AMPS). Здоровая конкуренция развивает и совершенствует технологию, а правильно расставленные акценты — залог успеха и прогресса техники.

По прогнозам специалистов, в ближайшее время ожидается приход UMTS (универсальной мобильной телекоммуникационной системы RACE). РЧС, предназначенный для использования в UMTS, призван обеспечивать широкополосную связь и предоставлять мультимедийные услуги в диапазоне скоростей передачи данных 144 кбит/с...2Мбит/с. Система UMTS должна работать в совместимых режимах с глобальной системой IMT 2000, разрабатываемой ITU. Поэтому для UMTS отводятся частоты, выделенные на конференции WARS-92 для IMT 2000. Для UMTS выделены частотные полосы:

- 1900...1980, 2010...2025 и 2110...2170 МГц — для наземных применений;
- 1980...2010, 2170...2200 МГц — для спутниковых компонентов;



• полосы, в диапазонах 1900... 1980 и 2110...2170 МГц (как минимум 2х30 МГц) должны быть доступны освобождены и выделены для UMTS к 1 января 2002 года.

Концепция создания универсальной системы подвижной связи UMTS подразумевает объединение функциональных возможностей указанных выше систем в единую систему третьего поколения с предоставлением стандартизованных услуг подвижной связи (сотовой, бесшнуровой, персонального вызова, частных подвижных служб). Одна из задач проекта — создание радиотерминала стоимостью около 100 \$, обеспечивающего все виды услуг связи (речь, данные, видео и т.д.) при скорости передачи информации по радиоканалу 2 Мбит/с в условиях микросотовой и пикосотовой структур. Радиотерминал должен работать в сетях частного и общего пользования, обслуживаемых разными операторами. Должна также обеспечиваться регистрация абонентов при переходе из одной сети в другую.

Концепция UMTS будет реализована из принципах интеллектуальной сети. Для более эффективного использования ее ресурсов предполагается применить новый способ распределения вызовов, связанный с разделением вызова и управления соединением и предусматривающий резервирование соединений. Для звонка абоненту будут использоваться сигналы персонального радиовызова. В UMTS рассматривается создание распределенной связи данных с разделением подсистем коммутации, управлением и передачей данных. Преимущества распределенной базы данных - применение меньшего числа служебных сигналов из-за возможности локальной обработки данных, высокая надежность базы данных и оперативный доступ. Кроме того, распределенная база данных может быть динамичной, т.е. группироваться в зоне текущего местоположения абонентов, что уменьшает время соединения.

Особенность сетей UMTS состоит в исследовании новых принципов “эстафетной” передачи, при которых необходимо обеспечить непрерывность связи в случае перехода из одной сети в другую, для чего необходимо передавать сигналы межсетевое управления.

Сегодня в рамках создания UMTS исследуются принципы построения каналов связи и управления, а также рассматриваются методы доступа, модуляция и кодирование сообщений, организация управления, аутентификация абонентов и шифрование сообщений с учетом межсетевого взаимодействия.

Схема общей концепции развития ССПС в плане создания UMTS показана на рис.1.2:

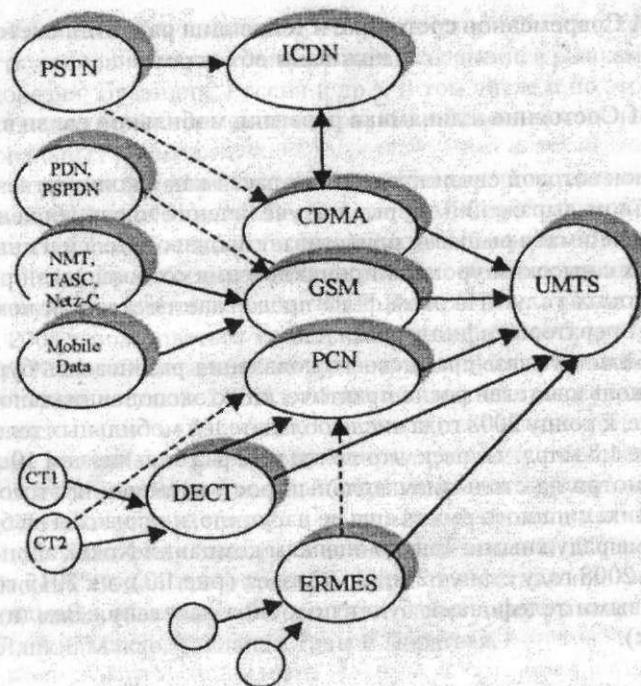


Рис.1.2

- PSTN- телефонные сети общего пользования.
- ISDN- цифровые сети с общей интеграцией служб.
- PDN- сети ракетной передачи данных.
- PSPDN- коммутируемые сети пакетной передачи данных общего пользования.
- UMTS- служба универсальной подвижной связи.
- DECT- цифровой европейский бусшнуровой телефон.
- ERMES- европейская система передачи радиосообщений.
- PCN- сети персональной связи.
- MD- передача данных на подвижные объекты.
- CT- бесшнуровой телефон.
- CT1, CT2- стандарты на системы бесшнуровых телефонов.
- CDMA- стандарт кодовой цифровой сотовой связи.

## 1.4 Современное состояние и тенденции развития систем связи с подвижными объектами

### 1.4.1 Состояние и динамика развития мобильной связи в мире

Рынок сотовой связи продолжает расти как в количественном, так и в качественном выражении. Взрывное увеличение числа абонентов в странах с развивающимися рынками притягивает производителей и инвесторов. В государствах с высоким уровнем проникновения сотовой связи растут доходы от неголосовых услуг. На этом фоне продолжается жесткая конкуренция стандартов, операторов и диллеров.

Мобильная связь сразу своего появления развивалась бурными темпами. Число пользователей росло практически по экспоненциальному закону. В результате, к концу 2003 года число обладателей мобильных телефонов составило более 1,3 млрд. человек, что почти в 40 раз больше, чем 10 лет назад.

Несмотря на столь значительный рост, насыщения этого сегмента телекоммуникационного рынка еще не наступило, и прогнозы на будущее остаются весьма радужными. Так, по оценкам компании Nokia, абонентами сотовой связи к 2008 году станут 2 млрд. человек (рис.1.3), а к 2015 году пользоваться сотовыми телефонами будет половина населения Земли (около 4 млрд. человек).

Число пользователей мобильной связи в мире в 1991–2003 гг., млн. чел.

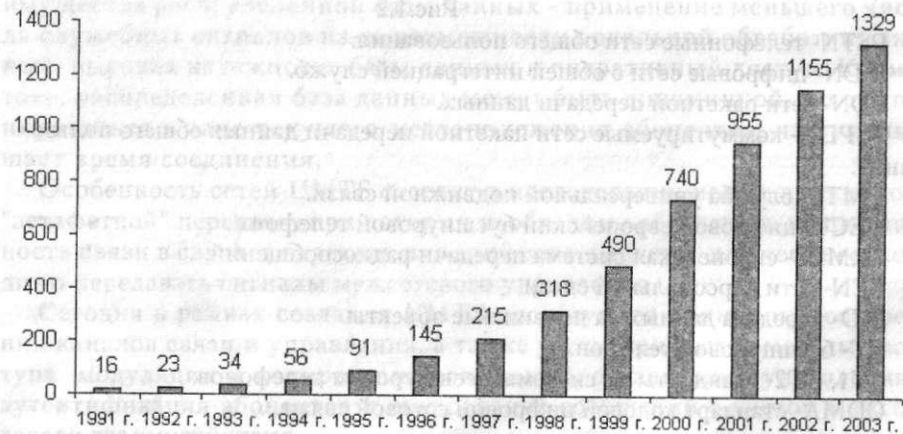


Рис.1.3

Источник: ITU

Многие аналитики сходятся во мнении, что расширение абонентской базы будет происходить в основном за счет стран с развивающимися рынками (Китай, Индия, Индонезия, Бразилия, Россия и др.). В том числе и по этой причине производители поддерживают выпуск простых и дешевых моделей телефонов для национальных рынков.

Развивающиеся рынки показывают действительно хорошую динамику, обгоняя страны с развитой экономикой. По данным ИА «Синьхуа» за 4 месяца текущего года число пользователей мобильной связи в Китае на 27,1 млн. человек до 295,8 млн. Сектор мобильной связи приносит около половины доходов всей телекоммуникационной отрасли КНР. По прогнозам аналитиков, к концу текущего, 2004 г. пользоваться мобильными телефонами будет каждый четвертый житель Китая. Ожидается, что уровень проникновения мобильной связи в целом по стране составит 24,5%, а общая абонентская база увеличится до 320 млн. человек.

Неудивительно, что многие операторы, которые поначалу с большим рвением взялись за 3G, все больше внимания обращают на эти и другие перспективные регионы. Показательный пример — гонконгский промышленный конгломерат Hutchison Whampoa создает новое подразделение HIT (Hutchison International Telecom). Зоной его интересов будет предоставление услуг на рынке мобильной связи (без учета 3G) на быстрорастущих рынках Индии, Израиля, Шри-Ланки, Макао, Таиланда, Ганы и Парагвая.

Прирост числа абонентов сотовых сетей GSM в 2003 г., млн. чел.

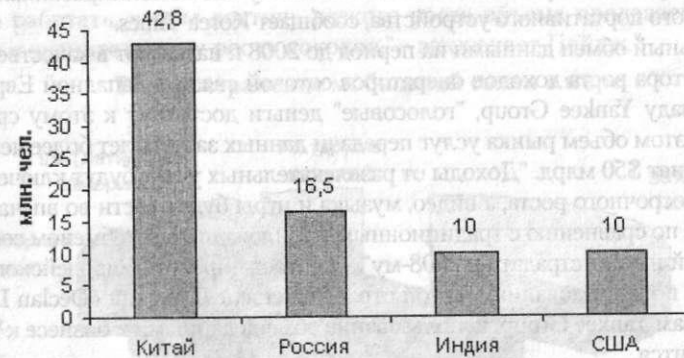


Рис.1.4

Источник: GSM Association



По данным аналитического агентства IDate, в тройку лидеров по числу подписчиков сотовой связи вошли - Азиатско-Тихоокеанский регион (38%), Европа (33%) и Северная Америка (13%).

Похуже с Nokia оценки по числу пользователей мобильной связи в мире дает компания Ericsson. По ее данным на сегодняшний день уровень проникновения сотовой связи на планете составляет 21% с общим числом абонентов 1,34 млрд. Аналитики предсказывают увеличение числа абонентов еще на 1 млрд. за период до 2008 года. 80% из этих новых абонентов приходятся на страны с развивающимися рынками.

Так доходы от услуг мобильной связи в Корее, согласно данным IDC Korea, через пять лет составят три четверти от всей выручки телекоммуникационного сектора страны. За это время рынок мобильной связи вырастет в 2,5 раза, увеличиваясь каждый год на 20% с 13,2 трлн. вон в 2003-м до 32,3 трлн. вон в 2008-м. На этом фоне проводная телефония в стране практически не будет развиваться: IDC предсказывает увеличение с 10,8 трлн. вон лишь до 11,1 трлн. вон за тот же период. В итоге, 74% рынка телефонии будет беспроводным. Как считает Ха Ки-сеок (Ha Ki-seok), аналитик компании, частота голосовых звонков достигла насыщения в обоих сегментах рынка, но, в отличие от проводного, беспроводной позволяет получать дополнительный доход от мобильного контента и дополнительных услуг. По его мнению, доходы в сотовых сетях от неголосовых услуг до 2008 года будут расти ежегодно на 42%. К тому же 2008 г. доля таких услуг на рынке сотовой связи составит 32% против 13% в настоящее время. "Рост числа абонентов останется неизменным, и операторы мобильной связи сосредоточатся на предоставлении персонализированных пакетов услуг своим старым клиентам," - полагает Ха Ки-сеок. Свою роль в росте мобильного рынка также сыграет конвергенция, позволяющая получать комбинированный доступ к сети с единого портативного устройства, сообщает Korea Times.

Мобильный обмен данными на период до 2008 г. называют в качестве основного стимулятора роста доходов операторов сотовой связи в Западной Европе. Согласно докладу Yankee Group, "голосовые" деньги достигнут к этому сроку \$124 млрд. При этом объем рынка услуг передачи данных за пять лет более чем удвоится и достигнет \$50 млрд. "Доходы от развлекательных услуг будут ключевым фактором долгосрочного роста, а видео, музыка и игры будут расти во впечатляющих масштабах, по сравнению с традиционными приложениями - обменом сообщениями, который начнет страдать к 2008-му", - считает директор Европейского отделения Yankee по исследованиям в этой отрасли Деклан Лонерган (Declan Lonergan). По прогнозам Yankee Group, использование обмена данными в бизнесе к 2008 году также удвоится.

С этими прогнозами коррелируют оценки других аналитиков. Например, исследовательская фирма Mobinet утверждает, что к 2005 году 41% абонентов мобильной связи будут регулярно и в больших объемах обмениваться данными через сотовые сети, что в четыре раза больше, чем в 2003 г.

Резкий рост интереса к таким услугам произойдет после увеличения скорости передачи данных, повышения уровня безопасности и снижения тарифов. Наибольший интерес абоненты проявляют к мобильным играм, электронной почте, передаче фотографий, музыки и новостным сообщениям. Новостные сервисы способны выйти на массовый рынок, утверждает Mobinet. Выводы были сделаны на основе опроса 4,5 тысяч человек в 13 странах, проведенного консалтинговой компанией A. T. Kearney и Институтом менеджмента Judge при Кембриджском университете.

Рынок будет увеличиваться, в первую очередь, за счет двух факторов: увеличения числа телефонов с мультимедийными возможностями и повышения качества оказываемых услуг. 49% телефонов на мировом рынке имеют мультимедийные возможности и уже 25% пользователей пользуются услугами обмена данными через сотовые сети.

"Объем рынка услуг беспроводного обмена данными особенно растет на азиатском рынке и среди возрастной группы до 25 лет. Пользователи оценили данные сервисы и планируют использовать их чаще в будущем." - сказал вице-президент A. T. Kearney Марк Пейдж. Однако и более возрастные пользователи с устойчивым доходом заинтересованы в таких услугах. Так, 48% пользователей камерафонов из возрастной категории 35-44 года регулярно отправляют фотографии, а 66% пользуются текстовыми сообщениями.

Среди тех, кто не собирается передавать данные через мобильные сети, 35% назвали в качестве причины дороговизну, 18% - низкую скорость обмена. Это примерно такие же показатели, как и в прошлогоднем опросе. Отличается только уровень озабоченности безопасностью: за год он вырос с 10% до 22%. Тем не менее тех, кто оплачивает услуги мобильной связи, стало втрое больше - 10% против 3% в прошлом году. "Операторам мобильной связи необходимо много работать, чтобы достичь резкого роста объема продаваемых услуг, ведущего к значительному росту доходов," - заключает Пейдж."

#### Распространение мобильной связи в мире

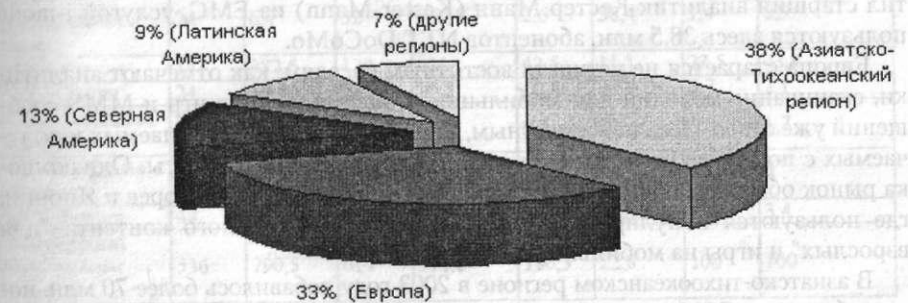


Рис.1.5

Источник: Idate

В настоящее время, как известно, число подписчиков сотовой связи в мире превышает число линий фиксированной телефонной связи. Сейчас трубки с цветным дисплеем, оснащенные немислимым в то время набором дополнительных функций, весят менее 100 грамм.

Согласно прогнозам Nokia половина населения Земного шара (около 4 млрд. человек) к 2015 году будет пользоваться услугами операторов мобильной связи. Сейчас абонентами этих сетей являются 1,3 млрд. человек.

Ожидается, что к 2008 году число абонентов мобильной связи достигнет двух миллиардов человек. При этом число пользователей сотовых сетей только стандарта GSM уже превысило отметку 1 млрд. В то же время, на этом стандарте работают более 80% всех мобильных телефонов во всем мире.

Как отметил в своем заявлении исполнительный директор GSM Association Роб Конвей (Rob Conway), абонентская база GSM-сетей растет быстрее рынка, а сам GSM укрепил свои позиции в качестве мирового стандарта мобильной связи.

К концу 2003 года в мире насчитывалось немногим более 1,3 млрд. пользователей мобильных телефонов, в числе которых абонентская база приверженцев стандарта CDMA - самого перспективного конкурента GSM - составила 181 млн. человек, причем это единственная конкурирующая технология, кроме GSM, демонстрирующая значительный рост на рынке. По состоянию на конец декабря 2003 года число абонентов GSM-сетей по всему миру составило 970 млн. человек, по данным GSM Association. В течение всего прошлого года стандарт GSM выбрали более 180 млн. новых абонентов, всего же за год подключилось к сетям мобильной связи 227 млн. человек - в среднем, по 15 млн. абонентов в месяц; таким образом, GSM выбрали 80% новых абонентов.

В то же время, как отмечают специалисты GSM Association, более 100 млн. человек во всем мире используют в настоящее время услуги приема-передачи данных с помощью мобильных телефонов, основанные на технологиях GPRS, MMS, CDMA2000 1x или i-mode. Лидирует здесь Азиатский регион: как отметил старший аналитик Кестер Манн (Kester Mann) из EMC, услугой i-mode пользуются здесь 38,5 млн. абонентов NTT DoCoMo.

Европа старается не уступать восточным соседям: как отмечают аналитики, скачивание мелодий для мобильных телефонов, использование игр и MMS-сообщений уже стало здесь повсеместным, возросли и объемы отсылаемых и получаемых с помощью мобильных телефонов сообщений электронной почты. Однако пока рынок обмена сообщениями по-прежнему более развит в Корее и Японии, где пользуются популярностью просмотр развлекательного контента "для взрослых" и игры на мобильнике.

В азиатско-тихоокеанском регионе в 2003 году добавилось более 70 млн. новых абонентов GSM-сетей. Китай снова подтвердил свой статус крупнейшего в мире рынка мобильной связи: два местных GSM-оператора расширили свою або-

нентскую базу на 42,8 млн. человек. В Европе подключилось 42 млн. абонентов, причем основной рост шел за счет Центральной и Восточной Европы. Только в России появилось 16 млн. абонентов. Индия и Северная Америка дали миру примерно по 10 млн. GSM-абонентов в 2003 году. Рост абонентской базы в Африке и арабских странах составил более 9 млн. новых абонентов в каждом из регионов.

Как отмечают специалисты, продолжилась миграция латиноамериканских сетей с TDMA и CDMA на GSM, в результате чего в регионе увеличилось число абонентов на 130% - до 16,5 млн. В России и Индии прирост составил по 100% (табл.1.2).

Табл.1.2

Цифровые мобильные технологии	Абоненты Дек. 2002 г.	Абоненты Дек. 2003 г.	Рост в 2003 г.	Рост в 2003 г., %	Доля в общем росте, %	Доля в общей абонентской базе, %
CDMA	145,6	181	35,4	24,3	15,6	13,6
GSM	790,5	970,8	180,3	22,8	79,5	73
PDC	60,1	63,1	3	5	1,3	4,7
TDMA	107,4	113	5,5	5,1	2,4	8,5
3GSM (W-CDMA)	0,2	2,8	2,6	1708,5	1,2	0,2
Абонентская база во всем мире	1103,7	1330,6	226,9	20,6	100	100

Региональные группы по интересам в составе GSMA	Члены дек. 02	Подключившиеся дек. 02	Члены дек. 03	Подключившиеся дек. 03	Рост в 2003 г.	Рост в 2003 г., %	Доля в общем росте, %	Доля в общей абонентской базе, %
GSM Африка	103	23,7	109	32,9	9,2	38,7	5,1	3,4
GSM Арабские страны	20	24,4	22	33,5	9	37	5	3,4
GSM Азиатско-Тихоокеанского региона	75	300,4	79	370,8	70,4	23,4	39,1	38,2
GSM Центральная Азия	24	6,7	32	9,2	2,6	38,4	1,4	0,9
GSM Европа	147	382,6	139	425,1	42,5	11,1	23,5	43,8
GSM Индия	24	10,5	22	20,8	10,4	98,8	5,7	2,1
GSM Латинская Америка	36	7,1	58	16,5	9,4	131,3	5,2	1,7
GSM Северная Америка	59	18,8	97	29,2	10,4	55,5	5,8	3
GSM Россия	48	16,3	56	32,8	16,5	101,2	9,1	3,4
Абонентская база во всем мире	536	790,5	614	970,8	180,3	22,8	100	100

Источник: EMC Database и GSM Association. Все показатели выражены в млн. ед.



Таким образом, на мировом рынке мобильной связи наблюдаются следующие основные тенденции:

- Рост абонентской базы происходит, в основном, за счет стран с развивающимися рынками (в Азии - Китай и Индия; Латинская Америка, Африка и, в меньшей степени, Ближний Восток).

- Рост доходов от услуг передачи данных наблюдается в странах с более развитыми рынками (Япония, Корея, Западная Европа и, в меньшей степени, Северная Америка).

- Наметилась тенденция к росту рынка услуг передачи данных на развивающихся рынках Восточной Европы и Латинской Америки.

#### 1.4.2 Динамика развития мобильной связи в Украине

На Украинском рынке мобильной связи за 10 месяцев 2003 года доходы операторов мобильной связи составили почти \$2 млрд. При этом из 7 выданных лицензий реально работают только 4. По оценкам ряда специалистов, количество абонентов мобильной на Украине к концу 2004 года возрастет почти на 70% и достигнет 9-10 млн. В то же время, накануне 2004 г. турецкий холдинг Cukurova Group сообщил, что собирается вложить в украинскую связь \$400 млн. Первую половину 2004 г на рынке мобильной связи можно вполне справедливо назвать "началом инвестиционных перемен", которые вызваны реальными планами и действиями зарубежных инвесторов.

Согласно информации Госкомитета по информатизации и связи, в настоящее время на Украине выдано 7 лицензий, дающих право предоставлять услуги мобильной связи. Но реально только 4 компании оказывают такие услуги, а именно:

- "Украинская мобильная связь" (UMC).
- "Киевстар Дж.Эс.Эм" (Киевстар).
- "Голден Телеком" (Golden Telecom GSM).
- "Украинские радиосистемы" (WellCOM).

Кроме них, услуги мобильной связи предоставляет компания "Цифровая сотовая связь Украины" (DCC), которая работает в стандарте D/AMPS, но соответствующей лицензии не имеет.

По информации украинского Госкомстата, за 10 месяцев 2003 года на Украине доходы операторов мобильной связи составили почти \$2 млрд. (10,6 млрд. грн; официальный курс - 5,33 грн. за \$1), почти половина из них пришлось на потребительский сектор, то есть предоставление услуг населению - 5,11 млрд. грн.

#### Темпы роста количества абонентов украинской мобильной связи, %

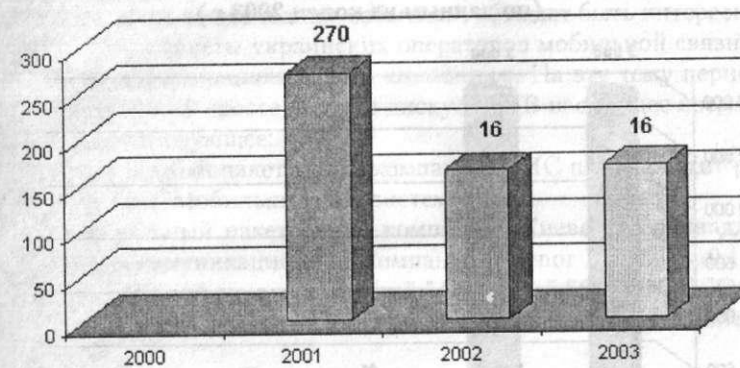


Рис.1.6

Источник: Госкомсвязи Украины, 2003 г.

Табл.1.6 Абсолютный и относительный рост абонентов

Год	Декабрь 2000 г.	Декабрь 2001 г.	Декабрь 2002 г.	Декабрь 2003 г.
Кол-во абонентов, млн	0,82	2,214	3,635	6,164
Рост, %		270	164	169

Источник: Госкомсвязи Украины, 2003 г.

Наибольший удельный вес (35%) в структуре доходов отрасли занимают услуги междугородней и международной связи. Доходы от предоставления таких услуг за этот период составили 3,73 млрд. грн. (почти \$700 млн.), в том числе от предоставления услуг мобильной связи населению - 1,98 млрд. грн. (\$372 млн.). Доходы от оказания корпоративных услуг предприятиям и организациям (корпоративный сектор) за январь-октябрь 2003 г. - 1,02 млрд. грн. (около \$191 млн.).

### Количество абонентов украинских операторов мобильной связи, тыс.<sup>1</sup> (по данным на конец 2003 г.)

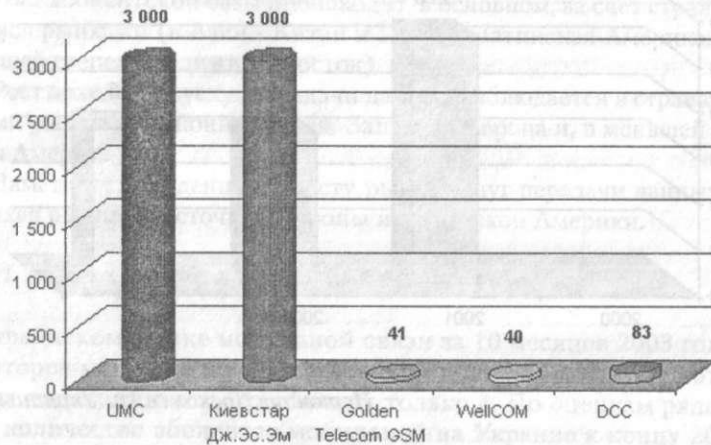


Рис.1.7

Источник: CNews Analytics

Как известно, в любом бизнесе доход зависит от количества клиентов, заказчиков, абонентов. Если попытаться экстраполировать данные по темпам роста абонентов мобильной связи на Украине, то можно предсказать, что темпы роста общей абонентской базы будут замедляться. Так, к концу 2004 года количество абонентов может достичь 8,6 млн., а к концу 2005 года - более 11 млн. В то же время, за несколько десятилетий развития проводной связи на Украине общее число абонентов достигло 11 млн., и еще 2 млн. стоят в очереди на подключение. Хотя есть и другие оценки, более оптимистичные.

Общий портрет украинской мобильной связи:

- Количество операторов - 5
- Количество абонентов - 6,164 млн.
- Средняя стоимость 1 минуты препейд-пакета - 1.3 грн.
- Средняя стоимость 1 минуты контрактного подключения - 1.4 грн.
- Средняя стоимость 1 минуты международного разговора - 9.9 грн.
- Лучший оператор 2003 г. - UMC

Во время пресс-конференции 22 декабря 2003 г. директор UMC Эрик Франке высказал мнение о том, что количество абонентов мобильной связи на Украине к концу 2004 г. возрастет на 66 % и достигнет 10 млн. В то же время первый вице-президент МТС Михаил Сусов огласил, что, по прогнозу его компании, к концу 2004 года на Украине мобильным телефоном будут пользо-

ваться 18-18,5 % (это около 9 млн.). Что же будет на самом деле - покажет 2004 год, который, судя по последним событиям, обещает быть интересным.

Контрольные пакеты украинских операторов мобильной связи принадлежат, в основном, не национальным компаниям. На эту тему периодически в деловой украинской прессе ведутся дискуссии. В настоящее время распределение влияния следующее:

- Контрольный пакет акций компании UMC принадлежит российской компании МТС ("Мобильные Телесистемы").

- Контрольный пакет акций компании "Киевстар" принадлежит норвежской телекоммуникационной компании Telenor (54.2%), 40,1 % - ООО "Сторм" (российской группе компаний "Альфа"), 5,66% - ООО "Омега".

- Более 51% компании DCC принадлежит компании "Систем Капитал Менеджмент".

- Golden Telecom Ukraine является дочерней компанией российской компании Golden Telecom.

- 31% акций компании WellCOM принадлежит "Укрфондинвесту", 20% - "Интеринвесту", 24,5% - Varkedge limited (Кипр), 24,5% - Optima Telecom (США).

Возможно, для украинской экономики было бы лучше, если бы контрольными пакетами акций владели украинские компании, но это подразумевает серьезные инвестиции. Пока же следует ожидать прихода на оставшуюся часть "пирога" зарубежного оператора, вероятнее всего, турецкого.

В 2002 году интерес к украинскому рынку мобильной связи проявлял турецкий оператор связи Turkcell, участвовавший в создании компании "Новаселл", но в феврале 2003 года ее акционеры приняли решение о ликвидации компании. И, тем не менее, в декабре 2003 года начались разговоры о возможном появлении нового игрока. В самом конце 2003 года эта информация стала достоянием общественности.

Турецкий холдинг Cukurova Group сообщил, что собирается вложить в украинскую связь \$400 млн. Его дочерняя компания Turkcell вложит \$100 млн. в СП с оператором DCC. Как предполагают эксперты, остальные деньги, скорее всего, будут потрачены на приобретение контрольного пакета акций "Укртелекома". Если все это произойдет, то можно говорить о самом крупном инвестиционном вливании в украинский телекоммуникационный рынок.

Если инвестор не изменит своих предпочтений, то в скором будущем Turkcell вместе с DCC вступят в борьбу за сегмент потенциальных абонентов в 3,5-4 млн., а также за привлечение абонентов двух основных украинских операторов мобильной связи.



### Контрактное подключение и услуги pre-paid (карточки)

2003 год по традиционному набору маркетинговых акций ничем не отличался от предыдущих. Как всегда, шла борьба за абонентов по принципу "больше говоришь - меньше платишь". Одни контрактные пакеты сменялись другими, но их по-прежнему остается очень много, и потребители порой не в состоянии ориентироваться среди этого разнообразия.

У каждого оператора свои особенности, но все как один проводят "акции" к массовым праздникам. Все больше абонентов потребительского сектора переходит к prepaid услугам (препейду), что уже составило около 75%. При этом, 95% услуг украинских операторов мобильной связи приходится на разговоры и только 5% - на мобильный интернет, SMS, WAP, MMS и передачу данных.

#### Услуги pre-paid (карточки)

	SIM-SIM	Ace&Base	UNI	Джинс
Оператор	UMC	Киевстар	Golden Telecom GSM	UMC
Стартовый пакет/эфирное время, грн	129/56	99/25, 130/65	80/54	100/50
Ср. стоимость 1 минуты, грн	1,35	1,56	1,1	1,25
Стоимость карточки (грн./использование (дней))	30/30, 60/60, 125/120, 255/240	25/25, 50/65, 100/130, 300/300	27/30, 54/60, 110/150, 270/300	10/10, 20/20, 40/50, 80/120

Источник: CNews Analytics

Pre-paid пакет: ср. стоимость 1 минуты, грн.<sup>2</sup>  
(по данным на конец 2003 г. официальный курс 5.33 грн / \$1)

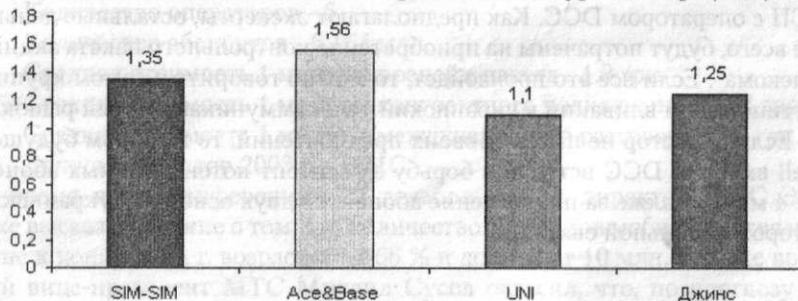


Рис.1.8

Источник: CNews Analytics

2003 год начался с открытия юридических "ворот" для продажи UMC российской компании МТС, эта сделка была успешно завершена летом 2003 года. В феврале UMC объявила о начале коммерческой эксплуатации услуги MMS. С этого момента каждый контрактный абонент ее сети, имеющий мобильный MMS-телефон, который поддерживает технологию передачи данных CSD (GSM data), мог отсылать и получать фото, рисунки и аудиоклипы. Несколько позднее, с марта 2003 г., UMC и "Киевстар" уменьшили продолжительность нетарифицируемых телефонных звонков для абонентов prepaid услуг мобильной связи с 4-х до 2-х секунд.

После самоликвидации дочерней компании Turkcell на украинском рынке мобильной связи наступило затишье (если не считать маркетинговых акций к весенним праздникам). Но его нарушили разговоры о возможном приобретении компанией DCC другого оператора - WellCOM. К тому же, с начала лета компания DCC снизила на 50% стоимость звонков на телефоны операторов мобильной связи Украины, прослав "демпинговым" оператором.

В августе 2003 года на технической базе украинского оператора UMC был запущен виртуальный оператор мобильной связи под торговой маркой "Джинс", который существенно отличается от существующих prepaid-пакетов Sim-Sim (UMC), Ace&Base ("Киевстар"), UNI (Golden Telecom), так как в нем реализованы новые единые принципы взаимоотношений с существующими мобильными операторами. Это сразу же дало ощутимые результаты - к концу года количество абонентов "Джинс" превысило 400 тыс.

Осенью компания "Киевстар Дж.Эс.Эм." ввела два новых тарифных плана - "XXL Неограниченный" и "Бизнес XXL Неограниченный". Вслед за ней UMC ввела свой тарифный пакет "Неограниченный", в котором все входящие и исходящие звонки по Украине бесплатны и отсутствует плата за соединение. Кроме того, UMC начала предоставлять услугу "UMC-область", введя 50%-ную скидку на исходящие местные звонки для контрактных абонентов и 30%-ную скидку для абонентов prepaid сервиса SIM-SIM. Но, как можно заключить на дальнейшем развитии событий, UMC показалось этого недостаточно.

Компания UMC отметилась вновь, запустив в коммерческую эксплуатацию три услуги на основе технологии GPRS для пользователей SIM-SIM. Абоненты SIM-SIM, мобильные телефоны которых поддерживают соответствующие протоколы (WAP, GPRS, MMS), могут пользоваться следующими GPRS-услугами: мобильный GPRS-интернет - доступ в интернет и к электронной почте; WAP GPRS - доступ к различным WAP-ресурсам; MMS GPRS - обмен MMS-сообщениями.

Почти в это же время компания "Украинские радиосистемы" (WellCOM) завершила регистрацию филиалов в Днепропетровске, Одессе, Харькове, Запорожье и предоставила своим абонентам доступ к детализации звонков через интернет. Новые мероприятия UMC по покрытию киевского метрополитена, о которых было объявлено осенью 2003 г., можно охарактеризовать, как - "UMC идет под землю".

Контрактное подключение: ср. стоимость минуты, грн.<sup>3</sup>  
(по данным на конец 2003 г., официальный курс 5.33 грн / \$1)

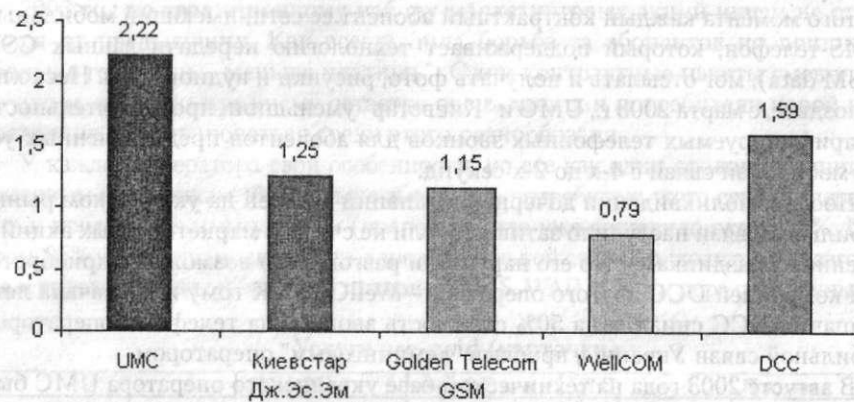


Рис.1.9

Источник: CNews Analytics

С началом зимы все абоненты украинских мобильных операторов "Киевстара", UMC и Golden Telecom получили доступ к развлекательным сервисам JUMP. Используя службу "Jump2song", на любой городской или мобильный номер телефона в Украине можно отправить песню, поздравление или шутку. Автоматическая голосовая служба "Jump2love" объединяет в себе голосовую почту и службу знакомств. Кроме того, запущен портал шуток "Jump2fun" и открыта зона эротических фантазий "Jump2hot". Что бы еще придумать, чтобы привлечь новых абонентов?

Ожидания 2004 года связаны с возможным появлением на территории Украины нового, как о нем часто говорят, третьего оператора мобильной связи. Это должно привести к снижению цен на услуги мобильной связи, и в какой-то степени уменьшить темпы роста абонентской базы "Киевстара" и UMC. Даже если этот третий оператор не появится, определенную "прыть" проявит WellCOM, начав предоставлять услуги в крупных городах Украины. Учитывая, что стоимость услуг этого оператора самая низкая, то в регионах он может составить серьезную конкуренцию "Киевстару" и UMC.

При усилении конкуренции, несомненно, должны снижаться цены на услуги мобильной связи. Вероятнее всего, к концу 2004 года средняя стоимость 1 минуты контрактного подключения упадет до 1 грн., а средняя стоимость 1 минуты прейида - до 0.5-0.6 грн.

### Инвестиционные перспективы

Пожалуй, если попытаться дать краткую характеристику событиям, происходившим в 1 квартале 2004 г на рынке мобильной связи Украины, то их вполне справедливо можно назвать "началом инвестиционных перемен". Последние вызваны реальными планами и действиями зарубежных инвесторов.

Сначала неизменные лидеры - UMC и "Киевстар", проводили свои маркетинговые акции без оглядки на остальных операторов этого рынка. События развивались относительно спокойно и без громких выступлений. Так, UMC отказалась от премирования бонусами абонентов при достижении определенных пороговых значений, повысила стоимость стартового пакета Sim-Sim-Юбилейного и плату за подключение к нему, а также стоимость отправки SMS за границу. Оператор DCC продлил возможность подключения к безлимитному пакету за \$79 на 1 месяц (вероятно, в прежнее состояние он уже не вернется никогда). Компания "Голден Телеком", в свою очередь, объявила о снижении минимального авансового платежа при контрактном обслуживании до \$20 и продлила возможность приобретения карточек pre-paid по цене \$5.

Ключевым событием, которое произошло в феврале 2004 г., стало продление украинскими чиновниками на 3 месяца порядка взаиморасчетов между операторами фиксированной и сотовой связи (бесплатные входящие пока остаются). Также немаловажным для рынка стало появление нового pre-paid продукта СуперДжинс от UMC, в котором реализован принцип единого тарифа на исходящие звонки и отменен срок действия.

В том же феврале компания DCC купила 100% оператора мобильной сотовой связи "Астелит" (GSM-1800), который после получения лицензии на мобильную связь и радиочастоты так и не начал осуществлять коммерческую деятельность. (Ранее компания DCC принята решение до 2010 г. перейти со стандарта TDMA (800 МГц) на стандарт GSM-1800.)

Наиболее интересные события началась с приходом весны. Сначала владельцы "Голден Телеком" объявили о том, что они готовы продать мобильный бизнес в Украине. Начались переговоры с потенциальными инвесторами, и опять стали говорить о выходе на этот рынок серьезного инвестора. Такой шаг для одних - реальная возможность, а для других, несомненно - угроза. Так, компания UMC сразу же подтвердила свою готовность осуществить в текущем, 2004 году вложения в свой бизнес на сумму в \$150 млн. Норвежский оператор "Telenor", владелец контрольного пакета "Киевстар", также объявил о своем желании масштабного инвестирования в "Киевстар". Им было решено несколько реструктуризировать обязательства и снизить доходность внутренних облигаций, чтобы получить достаточно дешевые средства для развития.

Наконец, и это, пожалуй, самое главное - проект турецкого оператора Turkcell на Украине обрел явные очертания в виде подписания Договора о созда-



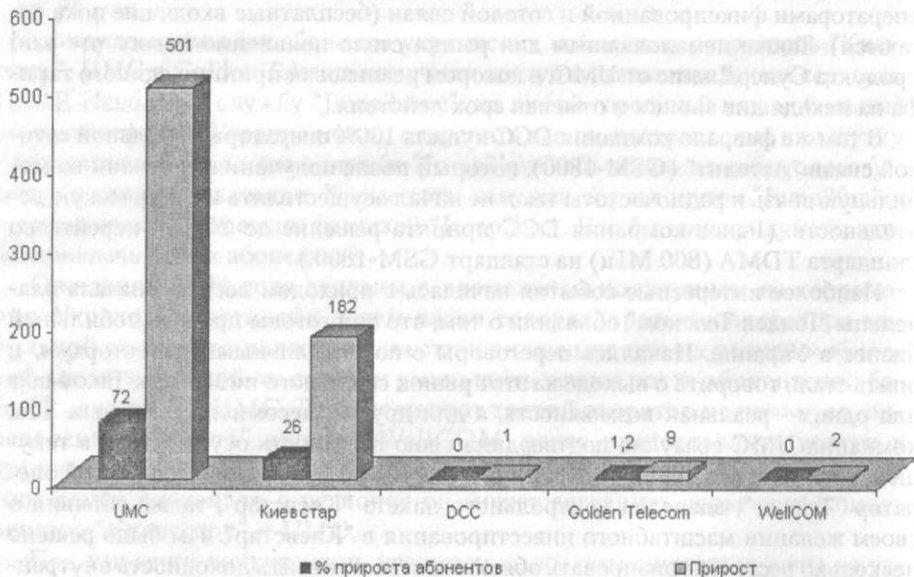
нии совместного предприятия DCC-GSM между DCC и Turkcell. Целью этого предприятия является развитие сети мобильной связи в стандарте GSM-1800. Как сообщили "Українські новини", предполагается, что создание такой сети займет около 2 лет, количество абонентов должно составить не менее 3 млн., и Turkcell будет принадлежать 51 % акций. Turkcell через компанию Turkcell, входящую в ее состав, выделила \$50 млн. и приобрела 51% новой компании. При этом ее реальные инвестиции должны составить \$400 млн.

**Абонентская база в конце 1 квартала 2004 г.**

По состоянию на 31 марта 2004 года по отчетам операторов сложилась следующая картина. Сеть UMC насчитывала 3,85 млн. абонентов, Киевстар - 3,22 млн. абонентов, DCC - 86 тыс., Голден Телеком - 50 тыс., WellCOM - 44 тыс.

Наиболее активно подключала новых абонентов компания UMC, на долю которой пришлось 72% всего прироста абонентской базы. Вторую позицию по объему привлечения новых абонентов прочно удерживает компания Киевстар (за 1 квартал 2004 г. этот показатель составил 26 % от всех подключений).

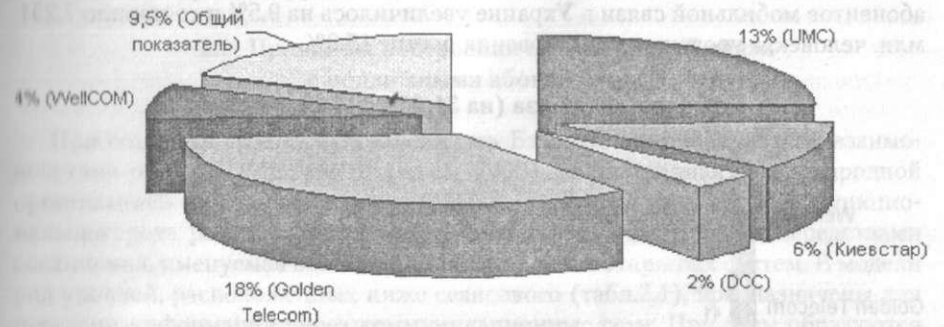
**Распределение прироста абонентской базы (1 кв. 2004 г.)**



**Рис.1.10**

Источник: CNews Analytics

**Темпы роста абонентской базы (1 кв. 2004 г.)**

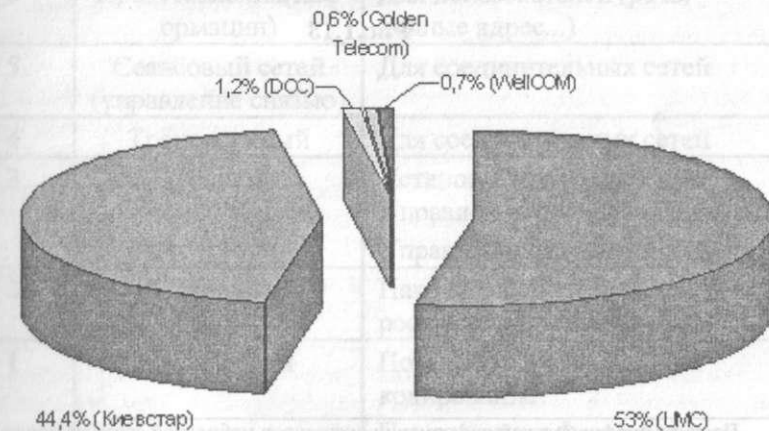


**Рис.1.11**

Источник: CNews Analytics

За счет более активной маркетинговой политики компании UMC удалось охватить более половины рынка мобильной связи (53%), который по-прежнему поделен между UMC и Киевстар. На долю этих двух компаний приходится более 96% рынка. Быстрыми темпами растет и абонентская база pre-paid-карточек UMC, которая по состоянию на конец марта 2004 г. составила более 900 тыс. человек.

**Доля рынка (на 31.03.2004)**



**Рис.1.12**

Источник: CNews Analytics

По сравнению с 31 декабря 2003 г. за первые 3 месяца 2004 г. количество абонентов мобильной связи в Украине увеличилось на 9,5% и составило 7,251 млн. человек, а уровень проникновения достиг 15,3%.

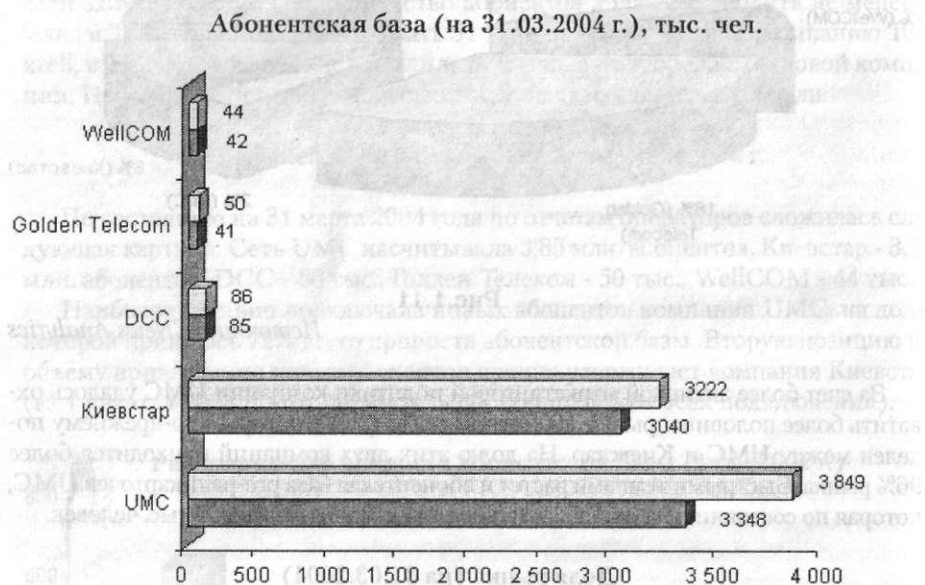


Рис.1.13

<sup>1</sup> По данным официальной информации операторов мобильной связи на конец 2003 г. - начало 2004 г.

<sup>2</sup> Заявленные тарифы операторов мобильной связи, конец 2003 г. - начало 2004 г.

<sup>3</sup> Заявленные тарифы операторов мобильной связи, конец 2003 г. - начало 2004 г.

## Глава 2. Архитектура систем и сетей связи с подвижными объектами

### 2.1. Принципы построения систем и сетей связи с подвижными абонентами

При создании ССПО использовались Базовая эталонная модель взаимодействия открытых систем (стандарт 7498), предложенная международной организацией по стандартизации (МОС), в которой описывается функциональная среда, расположенная между процессами и физическими средствами соединения, именуемая областью взаимодействия открытых систем. В модели ряд уровней, расположенных ниже сеансового (табл.2.1), предназначены для передачи информации через коммуникационные сети. При этом образуются сквозные соединения, прокладка которых возлагается на транспортный (четвертый) уровень. На нем обеспечиваются различные классы сервиса, позволяющие удовлетворить запросы сеансового уровня по пропускной способности, задержкам передачи, приоритетности сообщений и др.

Табл. 2.1

Номер уровня	Уровень	Функции уровня
7	Прикладной	Для пользователей (речь, данные, адрес...)
6	Представления (информации)	Для пользователей (речь, данные адрес...)
5	Сеансовый сетей (управление связью)	Для соединительных сетей
4	Транспортный	Для соединительных сетей
3	Сетевой	Установление соединения Управление подвижной связью Управление радиоресурсом
2	Канальный	Пакетирование / распределение сообщений
1	Физический	Помехоустойчивое кодирование Перемежение Формирование логических каналов Модуляция, скачки по час-тоте и т.д.



На сетевом (третьем) уровне решаются задачи прокладки сетевых соединений, маршрутизации информации, управления потоками информации для предотвращения перегрузки сети.

Непосредственно передачу информации выполняет канальный (второй) уровень, на котором осуществляется установление и ликвидация канальных соединений, обнаружение и исправление ошибок, обеспечение прозрачности соединения.

Физический (первый) уровень обеспечивает сопряжение систем со средой передачи информации и определяет различные характеристики, по которым возможен доступ к физическим средствам соединения.

Итак, модель предусматривает ряд горизонтальных уровней, имеющих связи с уровнями над и под ними в соответствии со строго определенными правилами (протоколами). Связь, таким образом, осуществляется по вертикали, а не по горизонтали, за исключением самого нижнего (физического) уровня, в котором информация передается от одной системы к другой. Именно с разработки протоколов, под которыми понимается совокупность правил и форматов механизма связи между компонентами одного уровня взаимодействующих систем, и начинается реализация проектируемой сети.

Применительно к ССПО должны быть определены три нижних уровня эталонной модели.

На самом нижнем (физическом) уровне определяются характеристики передающей среды (среды распространения волн). Для ССПО это не только диапазон частот, тип модуляции и т.д., но и структура информационного обмена с наименьшей потерей достоверности при конкретном протоколе управления множественным доступом к ресурсам радиоканалов ССПО.

Второй (канальный) уровень - уровень канала передачи данных состоит из интеллектуальных средств, предназначенных для надежной передачи информационных сообщений и сигналов управления по радиоканалу. Здесь должна быть определена структура передачи сообщений высшего уровня с учетом соответствия физических ограничений нижнего уровня и возможности подтверждения со стороны приемной части.

На третьем (сетевом) уровне осуществляется управление всеми вызовами и другими функциями радиосети ССПО. Он подразделяется на подуровни управления: вызовами, подвижными средствами и ресурсами радиоканалов. Здесь должны быть определены соответствующие протоколы управления.

Применительно к рассмотренным выше уровням эталонной модели для вноса разрабатываемых ССПО должны быть подготовлены спецификации протоколов и услуг.

Ограниченность частотных диапазонов, прогноз спроса, возможной стоимости, удобства, требования к качеству подвижной радиосвязи в начале

80-х г. привели к необходимости новых исследований в области подвижной связи, которые были разделены на несколько направлений:

- разработка и детальные исследования сотовой концепции построения системы;
- освоение нового частотного диапазона 800...900 МГц и далее 1,2...1,8 ГГц и исследование вопросов распространения радиоволн этих диапазонов;
- разработка экономичной аппаратуры ССПО.

Причем должны быть выполнены требования по обеспечению возможностей наращивания мощности при высокой частотной и экономической эффективности, а также быстрому развертыванию системы.

Для выполнения таких требований предлагалось использовать следующие принципы:

- оптимальное распределение частот;
- быстрый переход к сотам (ячейкам) с секторным обслуживанием абонентов (т.е. применение секторных направленных антенн) для поддержания заданного качества передачи;
- увеличение числа сот (ячеек) и обеспечение их стыковки;
- адаптивность к изменению трафика;
- минимальные вероятности задержек при вызове и ухудшении качества приема информации.

Территория обслуживания сотовых ССПО с радиусом  $R_0$  условно разделяется на соты (ячейки) радиуса  $R$ . Соты имеют обычно шестиугольную форму.

На рис. 2.1 представлена схема двумерного покрытия территории в координатах  $(x, y)$ .

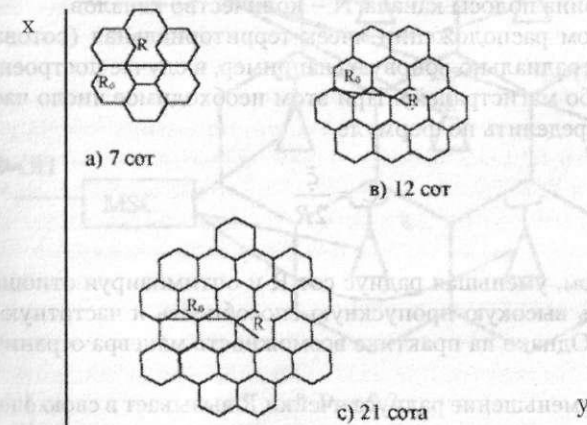


Рис.2.1

В каждой соте находится базовая станция (БС - BSS), в которую входят приемопередающие станции (BST) и контроллер базовой станции (КБС - BSC). КБС объединен с БС, управляющей мощностью передатчика радиостанции подвижного абонента, кодирования речи, канального кодирования, шифрования, а также подготовки к пакетной передаче. Базовые станции подключаются к центру коммутации подвижной связи (ЦКС - MSC).

Все базовые станции с помощью коммутационной системы могут соединяться друг с другом, а также иметь выход на телефонную сеть общего пользования (ТФ-ОП). Коммутационная система может иметь централизованное либо распределенное управление. При распределенном управлении узлы коммутации подвижной связи, формируют зону обслуживания. Территория обслуживания ССПО может состоять из нескольких зон, в каждой из которых имеется свой центр коммутации подвижной связи.

Подвижные абоненты (ПА-MS), находящиеся в сотах, обслуживаются базовыми станциями, которые предоставляют свободные частотные каналы каждому ПА при поступлении от него вызова.

Каждой БС, оснащенной приемопередающей аппаратурой, выделяется набор частотных каналов, которые повторяются через защитный интервал. Пространственная расфильтровка и, следовательно, возможность повторения частот определяют высокую частотную эффективность сотовой системы.

Смежные БС, использующие различные каналы, образуют группу из  $C$  станций. Величина  $C$  (размерность кластера), являющаяся частотным параметром системы, определяет минимально возможное число каналов, каждый из которых занимает полосу частот  $F_k$ , тогда общая полоса частот, занимаемая ССПО в направлении передачи, составит  $F_c = F_k N C$ ,

где  $F_k$  – ширина полосы канала,  $N$  – количество каналов.

При линейном расположении ячеек территориальная (сотовая) система преобразуется в радиально-зонавую (например, в случае построения системы вдоль каких-либо магистралей). При этом необходимое число частотных каналов можно определить по формуле

$$C = \frac{\xi}{2R} \quad (2.1)$$

Таким образом, уменьшая радиус сот  $R$  и оптимизируя отношение  $\xi/R$ , можно получить высокую пропускную способность и частотную эффективность системы. Однако на практике возможность маневра ограничена за счет следующего:

Чрезмерное уменьшение радиуса ячейки  $R$  вызывает в свою очередь резкое увеличение числа пересечений условных границ ячеек при перемещении абонентов. В зависимости с этим возрастает поток данных, требующих обработ-

ки, что перегружает системы коммутации и управления и может привести к отказу всей системы;

- при малых значениях  $R$  в условиях реальной местности могут быть отклонения от точного расположения антенн БС, т.е. смещение антенны относительно геометрического центра зоны. Это приводит к снижению отношения сигнал/помеха на входе приемника. Например, при  $R = 1,5$  км, смещение антенны БС на  $U$  радиуса относительно геометрического центра ячейки вызывает снижение отношения сигнал/помеха на входе приемника на 10%;

- величина отношения  $\xi/R$  определяется заданным уровнем взаимных помех. При уменьшении  $\xi/R$  требуется принимать специальные меры для помехоустойчивости приема.

Аналоговые системы обеспечивают:

- входение в связь и регистрацию стоимости разговора в автоматическом режиме;
- организацию связи между подвижной станцией и любым абонентом стационарной ТФ-ОП сети или с любой другой подвижной станцией, включенной в систему;
- автоматический поиск подвижного абонента.

В состав ССПО входят (рис.2.2) : центр коммутации подвижной связи (MSC); базовые станции (BTS); подвижные станции (MS).

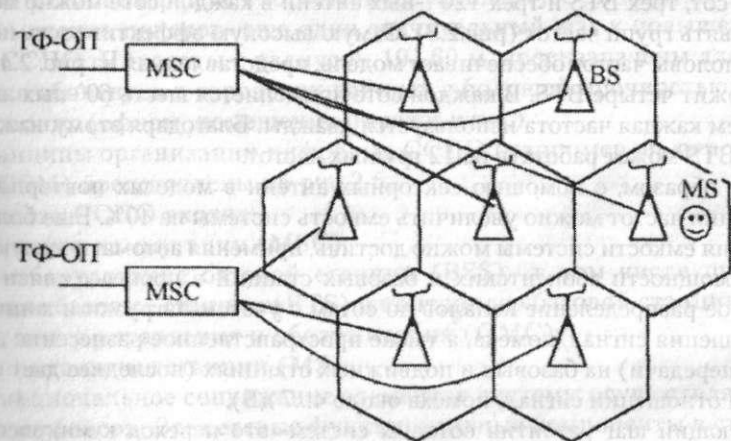


Рис.2.2



Центр коммутации подвижной связи MSC обеспечивает управление системой подвижной радиосвязи и является интерфейсом между MS и опорной ТФ-ОП сетью. Каждый MSC обслуживает группу базовых станций. Совокупность базовых станций, обслуживаемых одним центром коммутации, образует зону обслуживания.

В цифровых ССПО появилось возможность применения более эффективных моделей повторного использования общей полосы частот, занимаемой системой, значительно возросло число каналов, приходящихся на соту. В первую очередь это относится к стандарту GSM. Вид модуляции, способы кодирования и формирования сигналов, принятые в GSM, обеспечивают прием сигналов с отношением сигнал/помеха 9 дБ, в то время как в аналоговых системах этот показатель равен 18 дБ. Поэтому передатчики базовых станций (BTS), работающие на совпадающих частотах, могут размещаться в ближе расположенных сотах без потери качества приема сообщений.

В ССПО для сот с круговой диаграммой направленности антенн обычно применяют модель повторного использования частот (кластер) для семи или девяти BTS. Модель с круговой диаграммой направленности антенн предполагает передачу сигнала одинаковой мощности во всех направлениях, что для абонентских станций эквивалентно приему помех со всех направлений. Снижение уровня помех достигается за счет использования секторных антенн. Кроме того, секторизация сот позволяет более часто повторять частоты в сотах при одновременном снижении уровня помех. Например, при использовании трех сот, трех BTS и трех  $120^\circ$ -ных антенн в каждой соте можно использовать девять групп частот (рис.2.3). Самую высокую эффективность использования половы частот обеспечивает модель, представленная на рис. 2.4, которая содержит четыре BTS. В каждой соте применяется шесть  $60^\circ$ -ных антенн.

Причем каждая частота используется дважды. Благодаря этому, каждая из четырех BTS может работать на 12 группах частот.

Таким образом, с помощью секторных антенн в моделях повторного использования частот можно увеличить емкость системы на 40%. Еще большего увеличения емкости системы можно достичь, применяя автоматическую регулировку мощности абонентских и базовых станций в процессе связи [104], адаптивное распределение каналов по сотам с учетом нагрузки и минимизации отношения сигнал/помеха, а также пространственное разнесение антенн приема (передачи) на базовых и подвижных станциях (последнее дает общий выигрыш отношении сигнал/помеха около 4...7 дБ).

Следующий шаг развития сотовых систем - это переход к микросотовой структуре сетей. При радиусе сот несколько сотен метров она позволяет увеличить емкость в 5... 10 раз по сравнению с макросотами.

Микросоты строятся на основе BTS небольшой мощности, обслуживающих участки улиц, магазины, аэропорты, вокзалы и т.д.

Микросотовая структура сочетается с макросотовой. Микросоты берут на себя нагрузку от медленно перемещающихся абонентов. Очевидно, что в микросотовых сетях в процессе телефонного соединения число переключений между BTS возрастает.

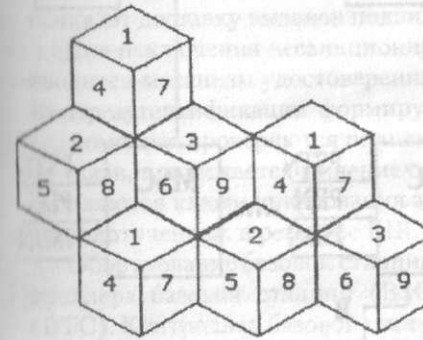


Рис.2.3

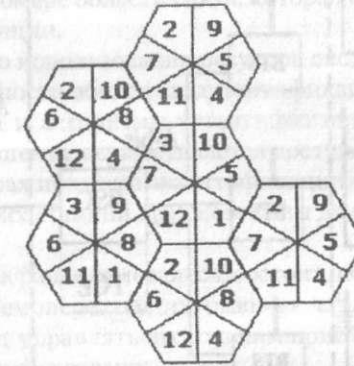


Рис.2.4

Микросотовая структура создается на основе стандарта DCS-1800, в которой радиointерфейс соответствует стандарту GSM.

Применение пикосот- еще один значительный шаг к повышению емкости ССПО. Пикосоты с радиусом 10...60 м, предназначены для обслуживания абонентов в городских районах с большой прочностью и в закрытых зонах (офисы, помещения, гаражи и т.д.).

Принципы организации цифровых ССПО (например, на основе стандарта GSM) представлены на рис.2.5.

В состав ССПО входят:

- центр коммутации (MSC);
- оборудование базовой станции (BSS), в том числе приемопередающие базовые станции (BTS) и контроллер базовой станции (BSC);
- центр управления и обслуживания (ОМС);
- подвижные станции (MS).

Функциональное сопряжение элементов системы осуществляется рядом интерфейсов. Все сетевые функциональные компоненты в стандарте GSM взаимодействуют в соответствии с системой сигнализации МККТТ (SS N7).

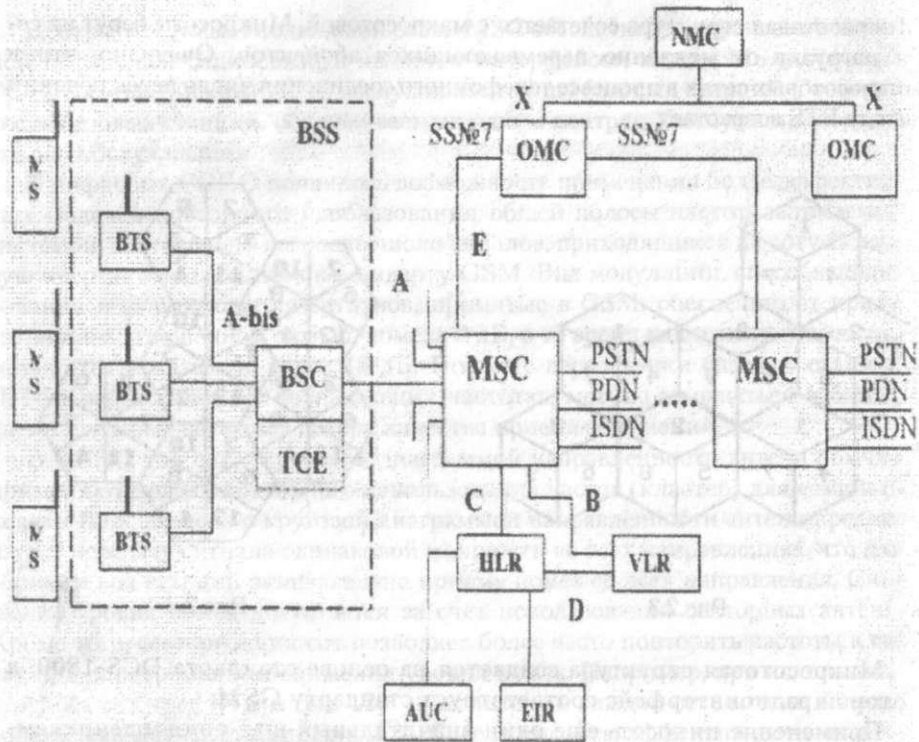


Рис.2.5

Центр коммутации подвижной связи (MSC) обслуживает группу сот (зону обслуживания), обеспечивает все виды соединений, в которых нуждается в процессе работы подвижная станция, и представляет собой интерфейс между фиксированными сетями, например, ТФ-ОП сетью и сетью подвижной связи. Он обеспечивает маршрутизацию вызовов и функции управления вызовами. Кроме выполнения функций обычной коммутационной сети, на него возлагаются функции коммутации радиоканалов в случае эстафетной передачи, в процессе которой достигается непрерывность связи при перемещении подвижного абонента из одной соты в другую, и переключение рабочих каналов в соте при появлении помех. Центр коммутации осуществляет постоянное слежение за подвижными абонентами, используя регистры положения (HLR) и регистры перемещения (VLR). В регистре положения хранится информация о местоположении подвижного абонента, которая позволяет центру коммутации доставить вызов. Он содержит также международный идентификацион-

ный номер подвижного абонента (см. приложение 2, который используется для его опознавания в центре аутентификации (AUC). Регистр перемещения реализует функционирование подвижного абонента при его перемещениях из одной зоны действия одного контроллера базовой станции (BSC) в зону действия другого контроллера, MS регистрируется в контроллере новой базовой станции. В VLR заносится информация о номере области связи, которая обеспечивает доставку вызовов подвижной станции.

Для исключения несанкционированного использования ресурсов системы вводится механизм удостоверения подлинности абонента (аутентификации). Центр аутентификации формирует ключи и алгоритмы аутентификации. С его помощью проверяются полномочия абонента, осуществляется доступ к сети связи, принимается решение о параметрах процесса аутентификации и определяются ключи шифрования абонентских станций на основе базы данных, сосредоточенных в регистре EIR.

Оборудование базовой станции BSC, как ранее отмечалось, состоит из контроллера базовой станции (BSC) и приемопередающих базовых станций (BTC). Контроллер базовой станции может управлять несколькими приемопередающими устройствами и решает следующие задачи:

- управление распределением радиоканалов;
- контроль соединения и регулирование их очередности;
- обеспечение режима работы, модуляции и демодуляции сигналов;
- кодирование и декодирование сообщений;
- адаптация скорости передачи для речи, данных и вызова;
- определение очередности передачи сообщений персонального вызова.

Оборудование базовых станций совместно с центром коммутации выполняет и ряд других функций, например освобождение канала, приоритетная передача информации для некоторых категорий подвижных абонентов и ряд других.

Центр управления и обслуживания (OMC) обеспечивает распределение функций и организацию взаимодействия между оборудованием базовых станций и центром коммутации.

Подвижная станция (MS) служит для организации доступа подвижных абонентов к существующим сетям электросвязи.

Любой абонент имеет свой международный идентификационный номер (IM51), записанный на его интеллектуальную карточку. Такой подход позволяет становить радиотелефоны, например, в такси и автомобилях, сдаваемых на прокат и т.д. Каждой подвижной станции присваивается номер (IMEI), который используется для предотвращения доступа к сетям похищенной станции или станции без полномочий.



## 2.2 Структура и принципы построения международной сети связи

Всемирная, глобальная телефонная сеть связи построена по иерархическому принципу на базе международных центров автоматической коммутации трех классов: СТ1, СТ2 и СТ3. Каждый из этих центров является окончательной международной станцией, а СТ1 и СТ2 являются еще и транзитными узлами. Вся территория земного шара разделена на восемь зон коммутации или восемь телефонных континентов. В центре телефонной нагрузки каждого из них находится международный транзитный центр коммутации первого класса, называемый СТ1. Разделение территории земного шара на зоны коммутации представлено в табл. 2.2.

Все СТ1 соединены между собой полносвязным способом ("каждый с каждым"). Внутри телефонного континента организуются узлы второго, более низкого уровня иерархии - СТ2. Зона действия СТ2 - одна страна или несколько небольших стран. В больших по территории странах может быть организовано несколько СТ2. Например, на территории бывшего СССР центры коммутации второго класса созданы в Киеве и Ленинграде. В настоящее время Киевский СТ2 обслуживает международную связь суверенной Украины. На следующем уровне иерархии организуются центры коммутации третьего класса - СТ3. Зона действия СТ3 - одна небольшая страна. На территории больших стран международные узлы третьего класса не организовывались.

Табл. 2.2

Телефонный континент	Место размещения	Код телефонного континента
Северная и Центральная Америка	Нью-Йорк	1
Африка	Кейптаун	2
Западная Европа	Лондон	3,4
Южная Америка	Нью-Йорк	5
Малайзия, Австралия, Океания	Сидней	6
Территория бывшего СССР	Москва	7
Центральная Азия и Дальний Восток	Токио	8
Индия и Ближний Восток	Сингапур	9

Международная сеть построена комбинированным способом, при котором узлы самого высокого класса иерархии, соединенные полносвязно, являются одновременно центрами радиально-узлового построения нижних уровней сети. Однако существующая международная телефонная сеть, как и большинство реальных сетей электросвязи, не может быть построена в строгом соответствии с какой-то определенной структурой. Реально, при наличии большого тяготения, между двумя СТ любого класса организуются прямые связи. Фрагмент общей структуры построения международной телефонной сети связи показан на рис. 2.6. Жирными линиями на рисунке выделены прямые пучки связи между СТ1.

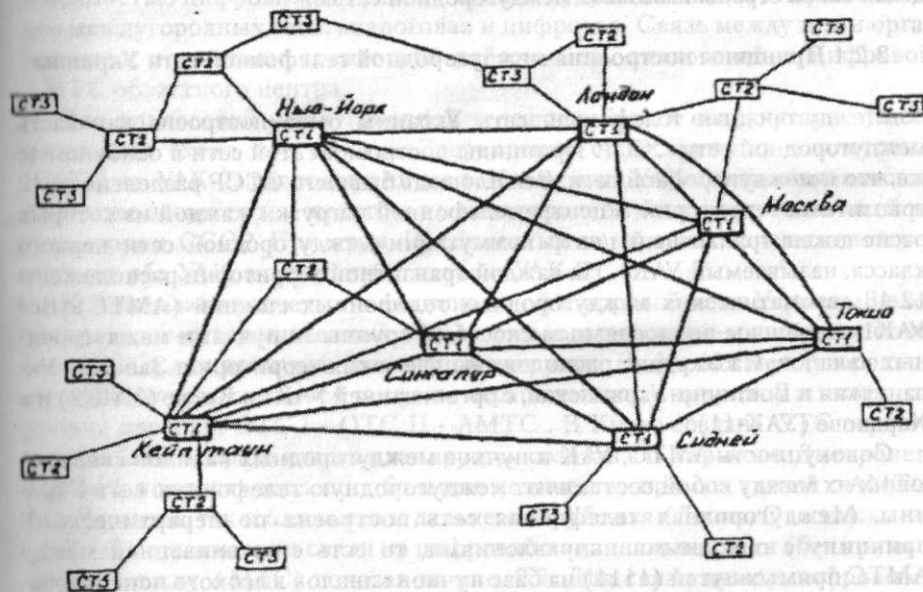


Рис.2.6 Фрагмент общей структуры построения международной телефонной сети связи

Каждому телефонному континенту присвоен однозначный код, приведенный в табл. 2.2. Код страны в пределах телефонного континента может быть одно-, двух- и трехзначным. Первой его цифрой всегда является однозначный код телефонного континента. Значность (количество цифр) кода страны зависит от значности ее национальной нумерации, т.е. от количества цифр, набираемых абонентом при связи в пределах своей страны.

- прямой путь: АМТС Луцка - АМТС Николаева;
- первый обходной путь: АМТС Луцка - ОТС Одессы - АМТС Николаева или АМТС Луцка - ОТС Львова - АМТС Николаева;
- второй обходной путь: АМТС Луцка - ОТС Львова - ОТС Одессы - АМТС Николаева или АМТС Луцка - ОТС Львова - ОТС Киева - АМТС Николаева;
- третий обходной путь: АМТС Луцка - ОТС Львова - ОТС Киева - ОТС Одессы - АМТС Николаева;
- четвертый обходной путь или путь последнего выбора: АМТС Луцка - ОТС Львова - ОТС Киева - ОТС Харькова - ОТС Одессы - АМТС Николаева.

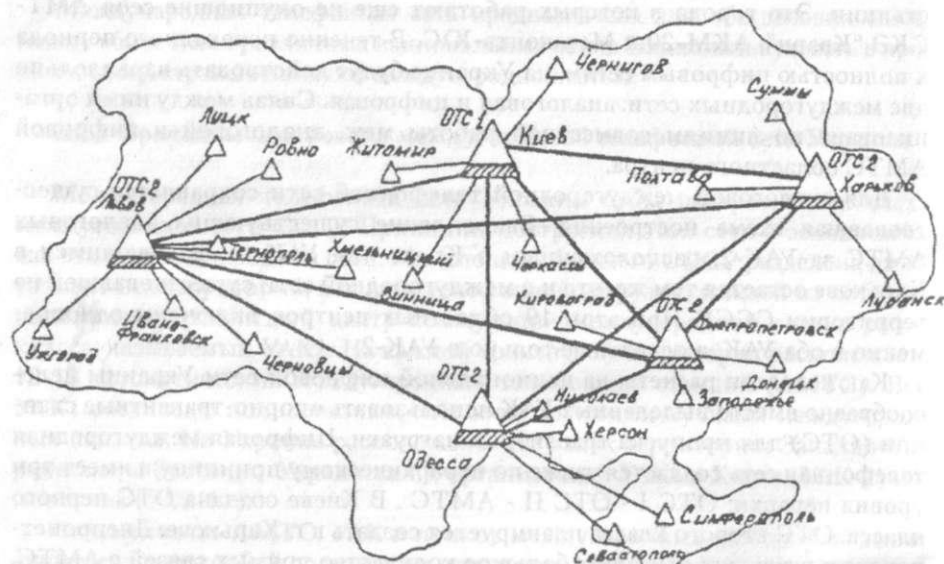


Рис.2.7 Схема организации связи на цифровой национальной сети

При размещении нескольких АМТС в городе по исходящей междугородной связи каждая станция является самостоятельной АМТС, а по входящей - все станции города рассматриваются как одна АМТС. Переход нагрузки из цифровой сети в аналоговую и обратно осуществляется в конечных точках соединительного тракта по линиям связи между аналоговой и цифровой АМТС находящимися в одном городе.

Каждая АМТС, как правило, обслуживает свою зону нумерации на территории которой организуется, зонавая сеть связи.

### 2.2.2 Структура и принципы построения зонавых сетей связи

Зонавая телефонная сеть состоит из местных телефонных сетей (городских и сельских) размещенных на территории зоны и внутризонавой телефонной сети. Вся территория Украины, как и любой другой страны, разделена на зоны телефонной нумерации. Зона нумерации - это часть территории страны на которой все абоненты телефонной сети охвачены единой семизначной нумерацией. Зона охватывает территорию административной области или административно выделенного города (Севастополь). Максимальная емкость местных телефонных сетей на территории зоны не должна превышать 8 млн. номеров с учетом ее беспрепятственного развития на период не менее 50 лет. На территории области может быть организовано несколько зон, если это экономически оправдано. В зоне может быть установлено несколько АМТС, размещенных в одном или нескольких городах зоны. На Украине организовано 26 зон телефонной нумерации (25 областей плюс Севастополь).

Внутризонавая сеть представляет собой совокупность АМТС, которые одновременно входят и в междугородную сеть, заказно-соединительных (ЗСЛ) и соединительных междугородных (СЛМ) линий. ЗСЛ используется для исходящей, а СЛМ - для входящей междугородной связи. Внутризонавая телефонная сеть обеспечивает соединение между собой станций и узлов различных местных сетей одной зоны и выход их на междугородную сеть.

В областном центре расположена АМТС, связанная пучком ЗСЛ и СЛМ со всеми станциями зоны непосредственно (ЗСЛ на ГТС областного центра) или через узлы заказно-соединительных (УЗСЛ) и соединительных междугородных (УСЛМ) линий. Узлы ЗСЛ и СЛМ объединяют нагрузку к и от АМТС в общие пучки для повышения использования СЛ. На этих пучках, как правило, применяются системы передачи. На сельских телефонных сетях функции УЗСЛ и УСЛМ выполняют центральные станции (ЦС) сельской сети.

Возможно существование в зоне и нескольких равноправных АМТС, которые могут быть расположены либо в областном центре, либо в крупных городах, удаленных от областного центра или имеющих прямые междугородные связи с другими зонами (например, Кривой Рог в Днепропетровской зоне). Каждая АМТС при этом обслуживает свою территорию, свою группу местных сетей.

Если в зоне работает только одна АМТС, то кроме нее организуется еще дополнительная АМТС, используемая в качестве резервной, для обеспечения связью наиболее важных абонентов зоны в случае выхода из строя основной АМТС. Объем оборудования дополнительной АМТС, ко-



личество включаемых ЗСЛ, СЛМ и междугородных каналов составляют 5-10% оборудования основной АМТС зоны. ЗСЛ и СЛМ, включенные в дополнительную АМТС практически являются обходными путями, обеспечивающими живучесть зоновой сети.

### 2.2.3 Нумерация на телефонных сетях Украины

Каждой зоне телефонной нумерации присвоен свой код, называемый междугородным кодом или кодом зоны. На территории бывшего СССР коды зон - трехзначные и обозначаются АВС, при этом на Украине в качестве А использовалась цифра 0. После того, как Украина стала независимым государством трехзначные коды зон на её территории стали не нужны, т.к. на Украине всего 26 зон нумерации, поэтому решено первую цифру кода (0) изъять сделав коды зон двузначными и оставив для них обозначение ВС. Местные сети на территории: зоны тоже имеют свои внутрizonовые коды. Эти коды - двузначные, т.к. количество местных сетей на территории зоны никогда не превышает нескольких десятков. Обозначаются малыми буквами - ав.

Таким образом полный номер набираемый абонентом при междугородной связи имеет вид: 8 - ВС - ав - ххххх. Первая цифра - 8 - индекс выхода на АМТС, ВС - код зоны, определяющий административную область в которой находится абонент, и ав - внутрizonовый код, определяющий сельский административный район, небольшой город с пятизначной нумерацией или узловый район крупного города с шестизначной нумерацией.

В связи с тем, что Украина стала самостоятельным государством уже после того как был составлен план международной нумерации ей был выделен один из резервных международных кодов 380. Таким образом полный международный номер при вызове абонента Украины из-за рубежа будет 12-значным (380-ВС-ав ххххх), что на единицу больше рекомендуемого. Но в связи с тем, что в большинстве международных узлов коммутации уже установлено оборудование с программным управлением, требования к значности нумерации при различных видах связи смягчены и сложившаяся ситуация не ограничивает возможности международной связи абонентов Украины.

### 2.2.4 Принципы построения местных телефонных сетей

К местным телефонным сетям относятся сети, обслуживающие территорию города или сельского административного района. Их так и называют городские и сельские телефонные сети (ГТС и СТС). Любая местная теле-

фонная сеть состоит из абонентских терминалов, станционных и линейных сооружений.

К абонентским терминалам относятся телефонные аппараты (ТА), таксофоны (Т), и различные терминалы теле магических служб. К станционным сооружениям относятся АТС, подстанции (ПС), учрежденческо-производственные станции (УПАТС) и коммутационные узлы. Станционные сооружения содержат комплекс различного оборудования: коммутационного, контрольно-измерительного, электропитания, систем передачи и кросса. Подстанцией называется абонентское станционное оборудование, вынесенное из городской АТС и расположенное вблизи группы абонентов удаленных от АТС. Иногда подстанции называют абонентскими концентраторами. Применение ПС позволяет сократить затраты на абонентские линии за счет уменьшения их длины. Учрежденческо-производственные АТС обслуживают абонентов учреждений или предприятий.

В состав линейных сооружений входят линейные кабели, телефонная канализация, распределительные шкафы и коробки. Линейные сооружения подразделяются на абонентские линии (АЛ) и межстанционные соединительные линии. Абонентские линии всегда двухпроводные. Выбор проводности соединительных линий зависит от их длины. От телефонной станции в различных направлениях расходятся кабели большой емкости (до 1200 пар), называемые магистральными. Эти кабели включаются в распределительные шкафы, от которых к отдельным домам подаются распределительные кабели малой емкости (от 10 до 100 пар). Десятипарные кабели внутри подъездов жилых домов оканчиваются телефонными коробками, от которых двухпроводные линии идут непосредственно к телефонным аппаратам (см. рис. 2.8).

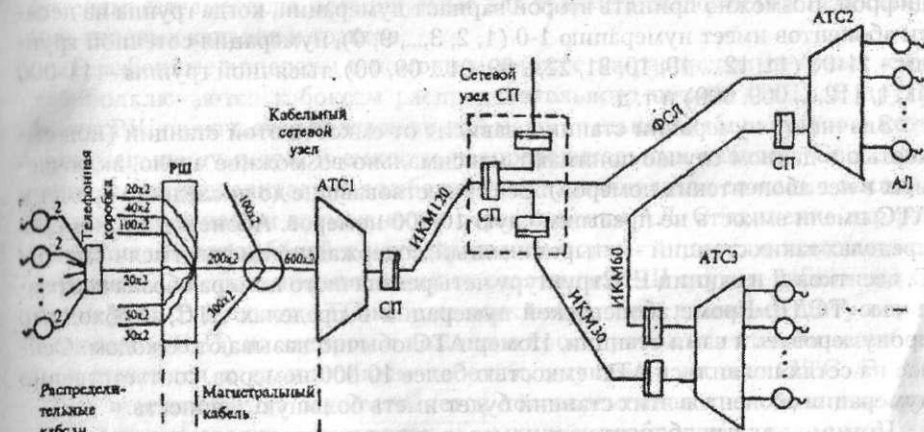


Рис. 2.8

Крупные местные сети насчитывают десятки и сотни тысяч АЛ, поэтому особенно важно уменьшить затраты на их реализацию и эксплуатацию. Это достигается следующими средствами:

- оптимальным построением сети магистральных и распределительных кабелей;
- применением более дешевых кабелей;
- установкой аппаратов с усилителями на линиях удаленных абонентов, что позволяет применять абонентские кабели с меньшим диаметром жил;
- расположением АТС в телефонном центре, т. е. в таком месте, от которого среднее расстояние до оконечных пунктов является минимальным;
- применением подстанций для сокращения протяженности АЛ;
- использованием систем концентрации абонентских линий и спаренного включения телефонных аппаратов для уменьшения числа АЛ;
- уплотнением АЛ;
- районированием ГТС.

### Принципы абонентской нумерации

Каждому телефонному аппарату присваивается собственный абонентский номер. Совокупность номеров всех абонентов сети называется нумерацией этой сети. Указывая нумерацию, чаще всего приводят только два абонентских номера - с наименьшими и с наибольшими цифрами в разрядах единиц, десятков, сотен и т. д. При этом 0 можно считать наименьшей либо наибольшей цифрой. Возможно принять второй вариант нумерации, когда группа из десяти абонентов имеет нумерацию 1-0 (1, 2, 3, ..., 9, 0), нумерация сотенной группы - 11-00 (11, 12, ..., 19, 10, 21, 22, ..., 99, 01, ..., 09, 00), тысячной группы - 111-000 (111, 112, ..., 009, 000) и т. д.

Значность нумерации станции, зависит от емкости этой станции (под емкостью в данном случае понимают максимально возможное число, включаемых в нее абонентских номеров). Все существовавшие до последнего времени АТС имели емкость не превышающую 10 000 номеров. Абонентский номер в пределах таких станций - четырехзначный, содержащий цифры тысяч Т, сотен С, десятков Д и единиц Е. Структуру четырехзначного номера обозначают записью ТСДЕ. Кроме абонентской нумерации в пределах АТС, необходимо пронумеровать и сами станции. Номер АТС обычно называют ее кодом. Сейчас на сетях появились АТС емкостью более 10 000 номеров, соответственно нумерация абонентов этих станций будет иметь большую значность.

Помимо полных абонентских номеров, на местных сетях используют сокращенные двух- и трехзначные номера, присваиваемые различным спецслуж-

бам. Номера всех спецслужб обычно начинаются с цифры 0 (01, 02, 03 и т. д.), поэтому цифра 0 не может быть использована в качестве кода АТС. Абонентские номера не должны начинаться также с цифры 8, которая является индексом выхода на АМТС. С учетом этого, если количество АТС на сети не превышает восьми, а абонентская емкость каждой АТС десяти тысяч - код станции может быть однозначным.

Учрежденческо-производственные АТС предназначены для установления связи в пределах какого-то учреждения или предприятия. В связи с этим преобладающее количество разговоров от абонентов этих станций направлено к абонентам этой же УПАТС. Такие соединения называют внутростанционными, и в этом случае абоненту достаточно набрать сокращенный внутростанционный номер, который в зависимости от емкости УПАТС может быть двух-, трех- или четырехзначным. Для установления соединения с абонентами сети общего пользования абонент УПАТС обычно набирает цифру, называемую индексом внешней связи, а затем полный абонентский номер сети ОП.

### Способы построения и нумерация городских телефонных сетей

Городские телефонные сети создаются на базе местной первичной сети города, охватывающей всю его территорию и служащей основой для организации межстанционных соединительных линий ГТС. В состав местной первичной сети входят: соединительные линии (физические или уплотненные); местные сетевые станции, обеспечивающие организацию и транзит из внутригородской сети типовых каналов и групповых трактов и предоставление их потребителям; сетевые узлы, организуемые для транзита, выделения и переключения типовых каналов и трактов.

Телефонные аппараты с помощью множества распределительных кабелей подключаются к боксам распределительного шкафа (РШ). В другие боксы РШ включается более крупный магистральный кабель, емкость которого меньше суммарной емкости распределительных кабелей. Свободная емкость распределительных кабелей предназначена для создания эксплуатационного запаса и возможности переключения АЛ. Соединение пар распределительных кабелей с магистральным осуществляется с помощью перемычек. Для объединения линий от различных РШ служит кабельный сетевой узел. В кроссах АТС кабели подключаются к главному щиту переключения (ГЩП) на котором с помощью кроссировок эти линейные кабели подключаются к станционным кабелям, идущим в автозал АТС. В РШ, ГЩП и сетевом узле осуществляется долговременная кроссовая коммутация. Для перераспределения этих линий необходимо выполнять перепайки и перекроссировки.



Рассмотренная организация первичной сети АЛ позволяет укрупнить пучки линий, и следовательно уменьшить затраты на линейные сооружения и системы передачи.

Межстанционные соединительные линии ГТС используются для связи абонентов, включенных в различные телефонные станции и могут быть физическими (трех или двухпроводными) или реализованными с помощью каналов СП. На ГТС, как правило, применяются соединительные линии одностороннего действия. При этом исходящая связь осуществляется по одним СЛ, а входящая по другим. На концах соединительных линий в большинстве случаев устанавливаются специальные согласующие устройства, называемые комплектами соединительных линий (КСЛ), обеспечивающие взаимодействие оборудования соединяемых станций.

Способ построения местных телефонных сетей зависит от числа абонентов на сети, размеров обслуживаемой сетью территории и размещения абонентов на этой территории. Для построения ГТС используется два способа: нерайонированный и районированный.

Нерайонированной ГТС используется только одна городская АТС, обслуживающая всех абонентов города. К ней же подключаются и СЛ от УПАТС. Пример построения такой сети показан на рис. 2.9 а), где кроме АТС, емкостью  $N = 4000$  показаны подстанция емкостью 1000 и УПАТС емкостью 500 номеров. Нумерация УПАТС и ПС является составной частью нумерации РАТС, в которую они включены. Эта РАТС называется опорной для включаемых в нее УПАТС и ПС. Связь абонентов ГТС с АМТС осуществляется по ЗСЛ и СЛМ, на рисунке показаны также пучки СЛ для выхода абонентов ГТС к спецслужбам.

Районированная ГТС без узлообразования. При нескольких АТС на сети, вся территория города разбивается на так называемые телефонные районы, не совпадающие с административными районами города. В центре каждого телефонного района устанавливаются районные АТС (РАТС), соединенные между собой полносвязным способом, пучками односторонних соединительных линий. Каждая РАТС обслуживает только абонентов своего телефонного района. Районирование сети позволяет значительно снизить длину АЛ. Реально количество РАТС на районированной ГТС без узлообразования не превышает 6-7 станций, теоретически их не может быть более восьми. На рис 2. 9 б) приведен пример построения районированной ГТС с пятизначной нумерацией. Абонентские линии на рисунке не показаны, но дана их нумерация. На одной из РАТС организован узел спецслужб (УСС) куда включаются пучки СЛ к спецслужбам.

Если емкость сети более 80 000 номеров, то РАТС присваиваются двузначные коды и абонентские номера становятся шестизначными.

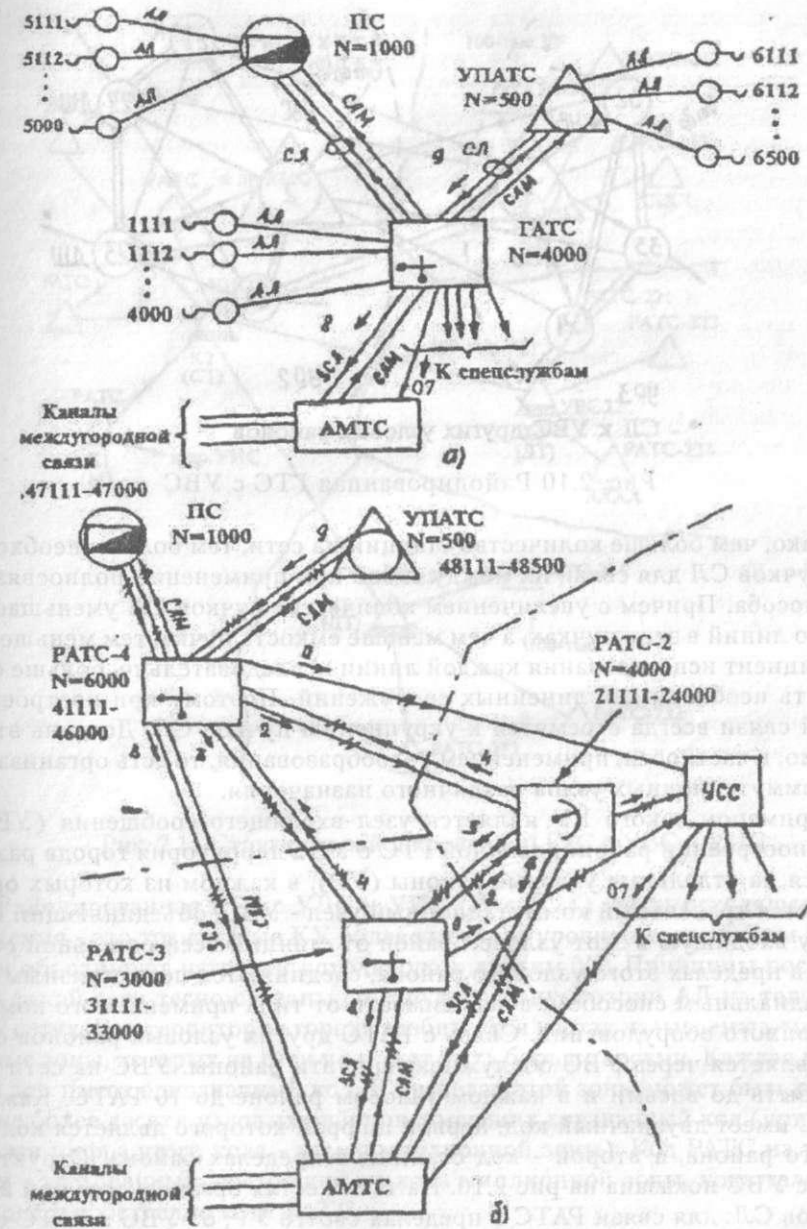


Рис. 2.9 Нерайонированная (а) и районированная (б) ГТС

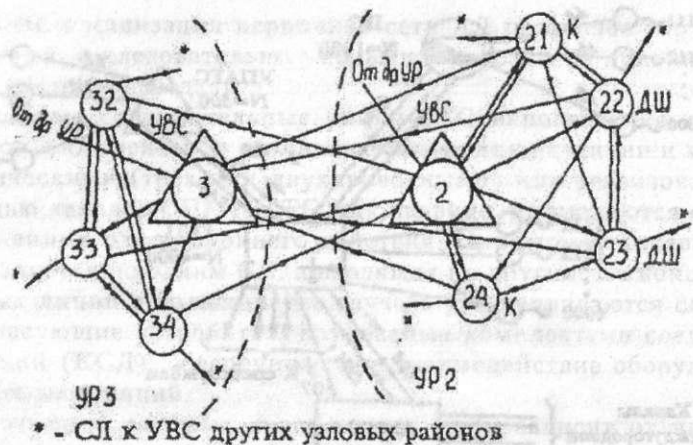


Рис. 2.10 Районированная ГТС с УВС

Однако, чем больше количество станций на сети, тем больше необходимо пучков СЛ для связи их между собой при применении полностью связанного способа. Причем с увеличением количества пучков СЛ уменьшается число линий в этих пучках, а чем меньше емкость пучка, тем меньше коэффициент использования каждой линии и, следовательно, больше стоимость необходимых линейных сооружений. Поэтому при построении сетей связи всегда стремятся к укрупнению пучков СЛ. Достичь этого можно, в частности, применением узлообразования, то есть организацией коммутационных узлов различного назначения.

Примером такого КУ является узел входящего сообщения (УВС). При построении районированной ГТС с УВС территория города разбивается на отдельные узловые районы (УР), в каждом из которых организуется транзитный коммутационный узел - УВС, объединяющий нагрузку входящую в этот узловой район от станций всей остальной сети. АТС в пределах этого узлового района, соединяются полностью связным либо радиальным способом, в зависимости от типа применяемого коммутационного оборудования. Связь с РАТС других узловых районов осуществляется через УВС обслуживающие эти районы. УВС на сети может быть до восьми и в каждом узловом районе до 10 РАТС. Каждая РАТС имеет двузначный код, первой цифрой которого является код узлового района, а второй - код станции в пределах района. Структура ГТС с УВС показана на рис 2.10. На таких сетях организуется три вида пучков СЛ: для связи РАТС в пределах своего УР; от УВС к РАТС своего УР; от РАТС к УВС других УР.

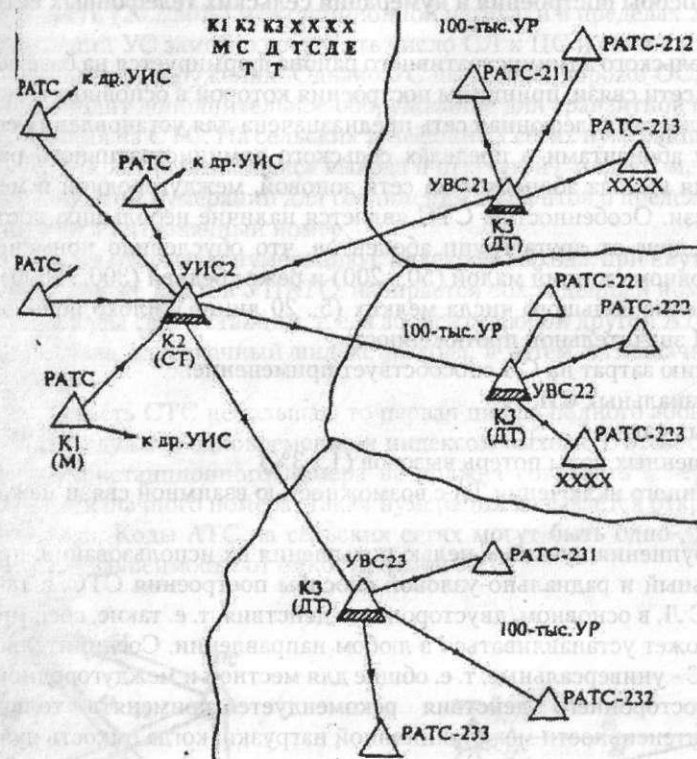


Рис. 2.11 Структура районированной ГТС с УВС и УИС

Районированная ГТС с УВС и УИС (Рис. 2.11). Узлы исходящего сообщения - это транзитные КУ более высокого уровня иерархии чем УВС. Они объединяют нагрузку исходящую к другим УР. Принципы построения такой сети тесно связаны со структурой нумерации АЛ на телефонных сетях. Вся территория города разбивается на, так называемые, миллионные зоны, которых на сети не может быть больше восьми. Каждая из таких зон имеет однозначный код. В пределах этой зоны может быть создано не более десяти узловых районов, имеющих двузначный код (при этом первая цифра этого кода - номер миллионной зоны). Код РАТС на такой сети - трехзначный, состоящий из кода миллионной зоны, кода узлового района и собственно кода РАТС.



## Способы построения и нумерация сельских телефонных сетей

Связь сельского административного района формируется на базе сельской первичной сети связи, принципы построения которой в основном те же, что и на ГТС. Сельская телефонная сеть предназначена для установления соединений между абонентами в пределах сельского административного района и обеспечения выхода абонентов на сети зонавой, междугородной и международной связи. Особенностью СТС является наличие небольших, достаточно удаленных друг от друга групп абонентов, что обусловило применение на СТС в основном станций малой (50... 200) и реже средней (300... 2000) емкости и появление большого числа мелких (5... 20 линий), плохо используемых пучков СЛ значительной протяженности.

Снижению затрат на СЛ способствует применение:

- малоканальных СП;
- сетевых узлов;
- повышенных норм потерь вызовов (1... 3%);
- спаренного включения ТА с возможностью взаимной связи между абонентами.

Для укрупнения пучков, с целью повышения их использования, применяют радиальный и радиально-узловой способы построения СТС, а также используют СЛ, в основном, двустороннего действия, т. е. такие, соединение по которым может устанавливаться в любом направлении. Соединительные линии на СТС - универсальные, т. е. общие для местной и междугородной связи. Линии одностороннего действия рекомендуют применять только при большой интенсивности межстанционной нагрузки, когда емкость пучка превышает 30 линий.

На СТС всегда выделяется одна из АТС (обычно она расположена в райцентре), которая служит транзитным узлом для межстанционной связи всех остальных станций сети и выполняет функции УЗСЛ УСЛМ и УСС. Если ГТС райцентра нерайонированная, то АТС, обслуживающая райцентр, выполняет все вышеперечисленные функции и называется центральной станцией (ЦС) сельской сети. Если же райцентре более одной АТС, то они составляют ГТС райцентра, а функции всех вышеперечисленных узлов выполняет сельско-пригородный узел (УСП).

Структура сети, когда все АТС сельского района связаны с ЦС и не имеют связи между собой называется радиальной. В этом случае все станции сети, кроме ЦС, называются оконечными (ОС) (рис. 2.12 а). Если же СТС достаточно большая в ней могут выделяться отдельные узловое районы, в которых организуются узловые станции (УС), связанные с ЦС и ОС своего района, т. е. применяется радиально-узловое построение сети (рис. 2.12 б). Образование крупного, общего для всех станций УР пучка СЛ к ЦС и замыкание значи-

тельной части (20... 50%) межстанционной нагрузки в пределах УР позволяет при внедрении УС заметно сократить число СЛ к ЦС и снизить общие затраты на линейные сооружения. Однако УС несколько дороже ОС, поскольку в ее состав входит дополнительное оборудование для транзитной связи.

Нумерация на СТС. На сельских телефонных сетях нумерация может быть закрытой, открытой без индекса выхода и открытой с индексом, выхода.

При закрытой нумерации для соединения абонентов в пределах СТС всегда набирается пятизначный номер.

Используя открытую нумерацию с индексом выхода, при внутривидеостанционной связи, так же как и в УПАТС, набирается сокращенный номер, а для выхода за пределы своей станции, т. е. к абоненту любой другой АТС сети, набирается сначала однозначный индекс выхода, а затем пятизначный абонентский номер.

Если емкость СТС небольшая, то первая цифра полного абонентского номера может служить одновременно и индексом выхода. В этом случае первая цифра внутривидеостанционного номера не должна совпадать с первой цифрой полного пятизначного номера. Такая нумерация называется открытой без индекса выхода. Коды АТС на сельских сетях могут быть одно-, двух- и трехзначными, в зависимости от емкости самой АТС.

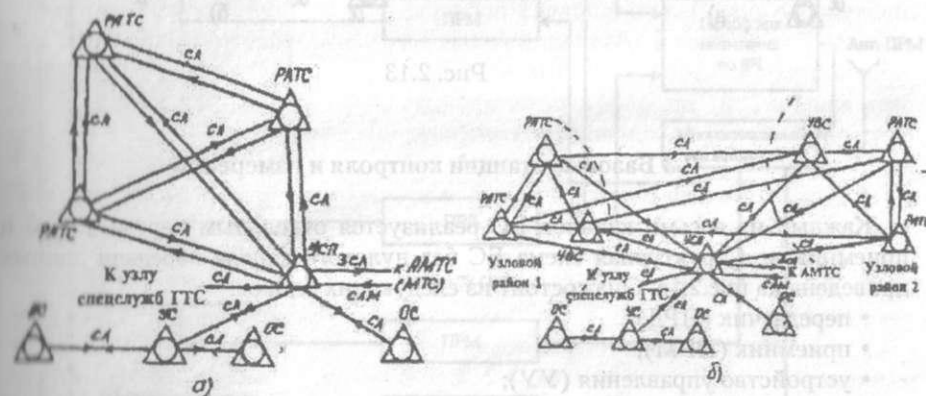


Рис. 2.12 Радиальное и радиально-узловое построение сети. Связь городских и сельских телефонных сетей

В случае нескольких АТС в райцентре, городская сеть райцентра и сельская сеть образуют комбинированную сеть связи. При построении комбинированной сети на ГТС должна предусматривать организацию транзитного узла сельско-пригородной связи, через который осуществляется связь станций

СТС между собой и со станциями ГТС. Кроме того, через УСП обеспечивается связь с УСС городской телефонной сети и исходящая и входящая внутризоновая и междугородная связь абонентов СТС, а иногда и абонентов ГТС.

Если город имеет районированную ГТС без узлообразования и суммарная емкость комбинированной сети не превышает 80 тыс. номеров, то в УСП включаются все сельские АТС и он связывается с городскими РАТС полносвязным способом (рис. 2.13а). Если город имеет районированную сеть с узлообразованием, то УСП включается в ГТС на правах транзитного узла местной и междугородной связи 100-тысячного узлового района (рис. 2.13 б).

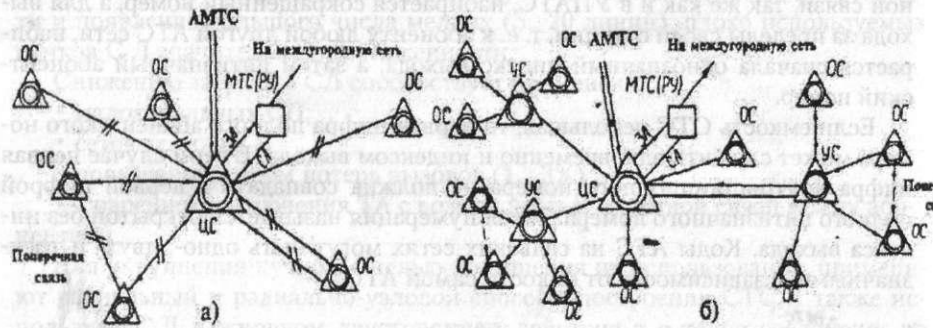


Рис. 2.13

### 2.3 Базовые станции контроля и измерений

Каждый из восьми каналов БС реализуется отдельным передатчиком и приемником. Структурная схема БС без нулевого канала передачи данных приведена на рис.2.14. Она состоит из следующих блоков:

- передатчик (ПРД);
- приемник (ПРМ);
- устройство управления (УУ);
- блок объединения каналов передатчика;
- многоканальный ответвитель приемника;
- приемник - измеритель уровня;
- устройство контроля;
- шлейф для испытаний по ВЧ.

Передатчик и приемник обеспечивают передачу/прием сигналов взаимодействия и речевых сигналов.

Пара передатчик и приемник образуют каналный блок. Разнос частот для дуплексной связи составляет 10МГц (463,0 – 453, 0 = 10 МГц). При разное

частот каналов 25кГц количество каналов в ПС будет 180, а при 20кГц - 225.

Так как на практике используются спаренные БС с общим числом рабочих каналов  $V_{KE} = 2 \cdot 8 = 16$ , то для хорошей развязки по частоте шаг между соседними каналами определится из соотношения:  $180 : 16 \approx [11]$  частотных каналов.

С учетом этого частотная группа базовых станций области трафика будет иметь следующую последовательность для БС: 1, 12, 23, 34, 45, 56, 67, 78.

Частотная группа спаренной БС определяется максимальным номером канала последней в сети базовой станции, например БС 23 имеет последовательность каналов 11, 22, 33, 44, 55, 66, 77; 88, тогда последовательность номеров каналов второй стойки спаренной БС 1 будет: 89, 100, 111, 122, 133, 144, 155, 166.

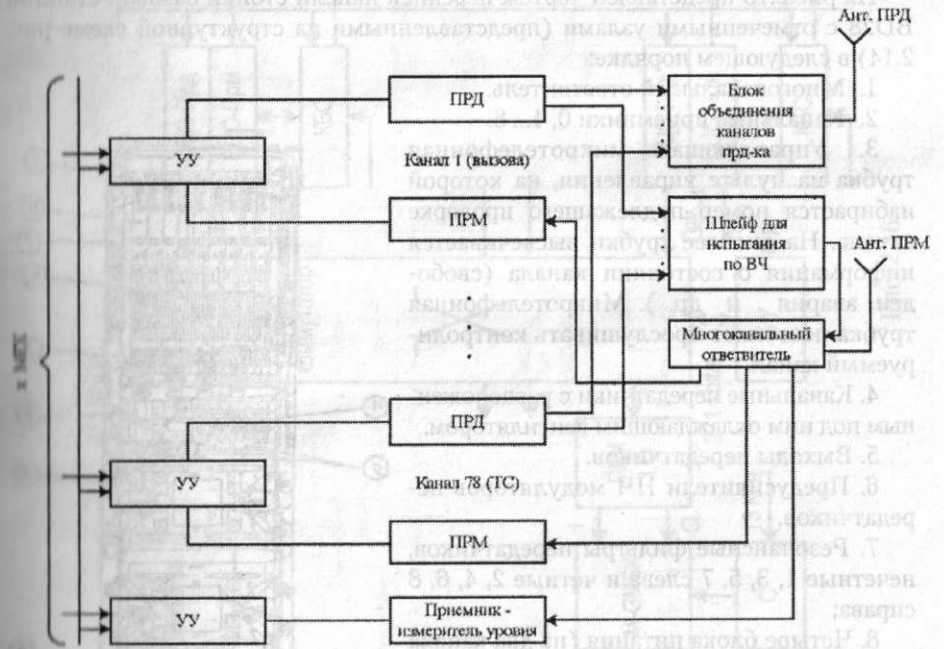


Рис. 2.14 Структурная схема БС без нулевого канала передачи данных

Группы частот могут повторяться для БС, размещенных в сотах, отстоящих друг относительно друга на расстояние не менее двух сот.

Устройство управления (УУ) обеспечивает дистанционное управление базовой станцией из МТХ, а также функции сигнализации между МТХ и БС.



УУ также осуществляет контроль за БС и обмен сообщениями о неисправностях и управляющих сообщений с МТХ.

Для подключения нескольких приемников к общей антенне используется многоканальный ответвитель, содержащий необходимое количество фильтров.

Измерение уровня сигналов по различным каналам по команде из устройства контроля осуществляет приемник - измеритель уровня.

Устройство контроля (УК) обеспечивает стык между логическими средствами в МТХ, с одной стороны, и приемником - измерителем уровня сигналов на базовой станции, с другой. Выдачу команды на проведение измерений и возвращение полученных данных в МТХ по запросу осуществляет устройство контроля. Следует отметить, что устройство контроля полностью совместимо с устройством управления.

На рис.2.15 представлен чертеж передней панели стойки базовой станции BD28 с отмеченными узлами (представленными на структурной схеме рис. 2.14) в следующем порядке:

1. Многоканальный ответвитель.
2. Канальные приемники 0, 1... 8.
3. Управляющая микротелефонная трубка на пульте управления, на которой набирается номер подлежащего проверке канала. На дисплее трубки высвечивается информация о состоянии канала (свободен, авария и др.). Микротелефонная трубка позволяет прослушивать контролируемый канал.
4. Канальные передатчики с расположенным под ним охлаждающим вентилятором.
5. Выходы передатчиков.
6. Предусилители НЧ модуляторов передатчиков.
7. Резонансные фильтры передатчиков, нечетные 1, 3, 5, 7 слева и четные 2, 4, 6, 8 справа;
8. Четыре блока питания (на два канала один блок питания).
9. Основной и резервный задающий генераторы 6.4 МГц.
10. Распределитель питания.
11. Линейный интерфейс, обеспечивающий соединение линии с канальным оборудованием.

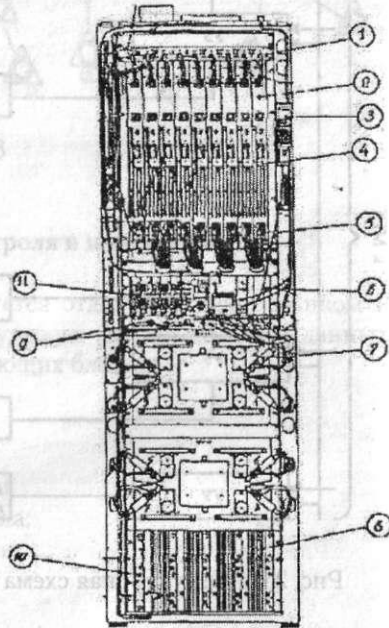


Рис. 2.15

## 2.4 Базовые станции приема/передачи.

Структурная схема передатчика BS изображена на рис. 2.16.

Линейный интерфейс (ЛИ) - обеспечивает связь между контроллером BS (КБС) и РСМ шины передатчика, к которой подключены каналные процессоры для цифровой обработки (ПЦО) и некоторые другие устройства не показанные на схеме.

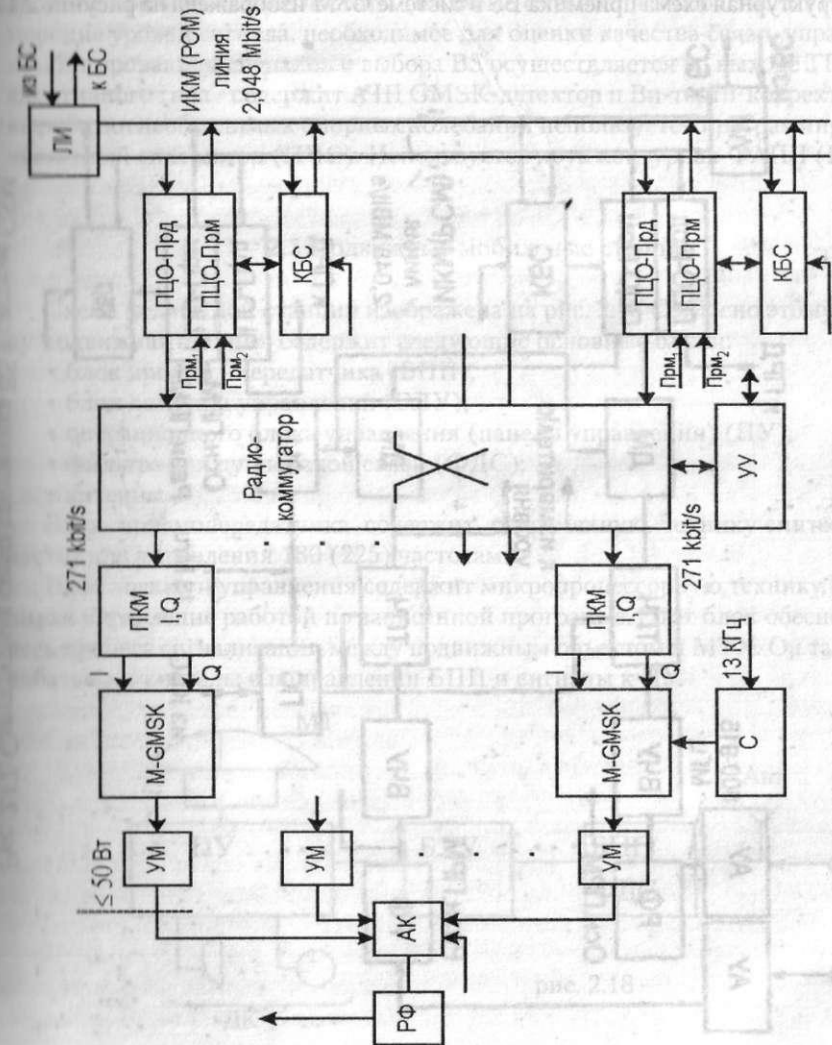


Рис. 2.16

ПКМ формируются 2 квадратурных ортогональных и I, Q сигнала необходимых для осуществления GSMK-модуляции (гауссова модуляция с min девиацией).

Формирование несущих колебаний осуществляется канальными синтезаторами (С). Усиленные канальными усилителями мощности до 50 Вт колебания, через антенный коммутатор и радиопередатчик поступают в антенну BS. Первые мобильных радиотелефонов имеют мощность 0,3-90 Вт.

Структурная схема приемника BS в системе GSM изображена на рисунке 2.17.

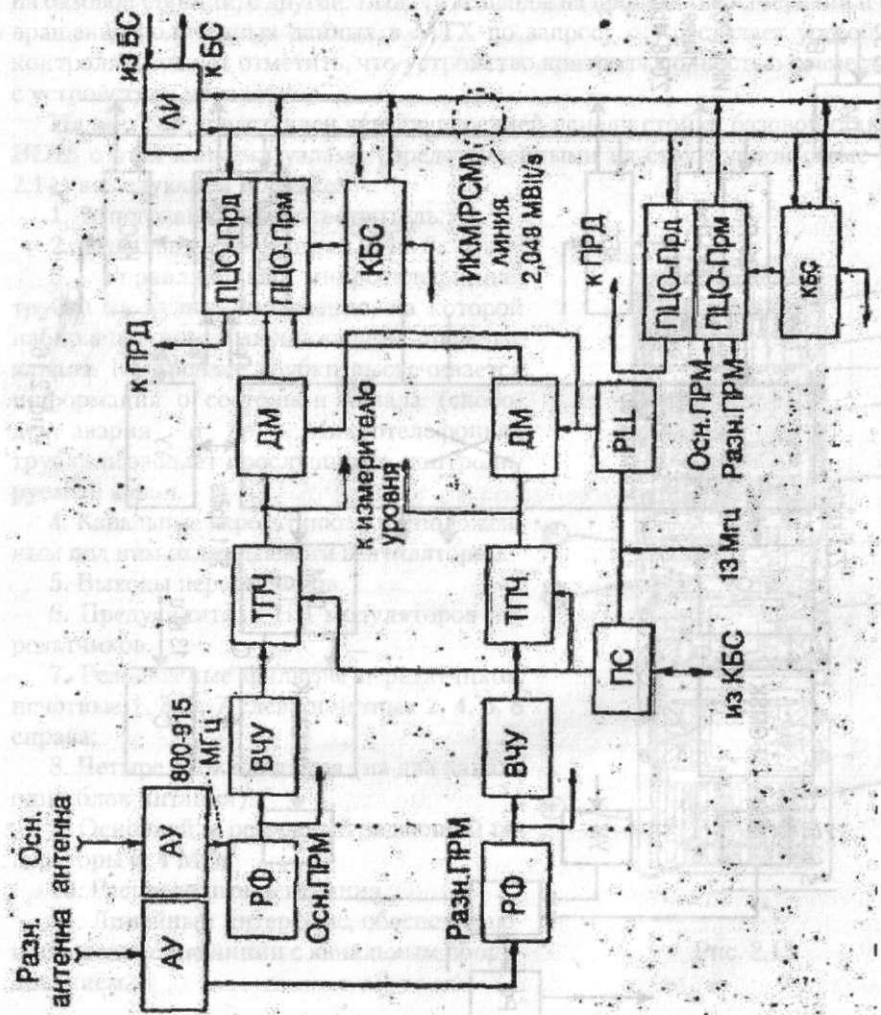


Рис. 2.17. Структурная схема приемника BS в системе GSM.

Приемник содержит два блока. Блок основного приема (Осн. Прм), подключен к Основной Антенне, через антенный усилитель и радиопередатчик (РФ) и блок разнесенного приема (РзПрм). Каждый из этих блоков содержит 12 идентичных каналов, содержащих ВЧ усилители (ВЧУ), промежуточно-частотный тракт (ТПЧ), и демодулятор (ДМ). Объединение основного канала и канала разнесенного приема производится после детектора с помощью процессора цифровой обработки (ПЦО). В каждом канале производится двойное преобразование частоты (на схеме смесители включены в ТПЧ); измерение уровня сигнала, необходимое для оценки качества связи, управление комбинированием сигналов и выбора BS осуществляется на выходе ТПЧ. ДМ адаптивного типа - содержит АЧП GSMK-детектор и Ви-терти-корректор, для выработки необходимых опорных колебаний используется программируемый частотный синтезатор (ПЧС). Используется двух контурная ФАПЧ (PLL).

### 2.5 Подвижные мобильные станции

Схема подвижной станции изображена на рис. 2.18 Согласно этому рисунку подвижная станция содержит следующие основные блоки:

- блок приема - передатчика (БПП);
- блок логики и управления (БЛУ);
- операционного блока управления (панели управления) (ПУ);
- фильтра для дуплексной связи (ФДС);
- антенны.

Блок приемопередатчика содержит современную технику синтезаторов частот для управления 180 (225) частотами.

Блок логики и управления содержит микропроцессорную технику, обеспечивая управление работой по записанной программе. Этот блок обеспечивает весь процесс сигнализации между подвижным объектом и МТХ. Он также обрабатывает сигналы в направлении БПП и сигналы к ПУ.

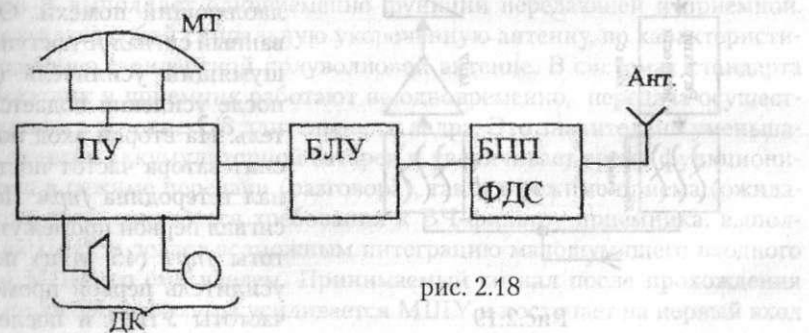


рис. 2.18





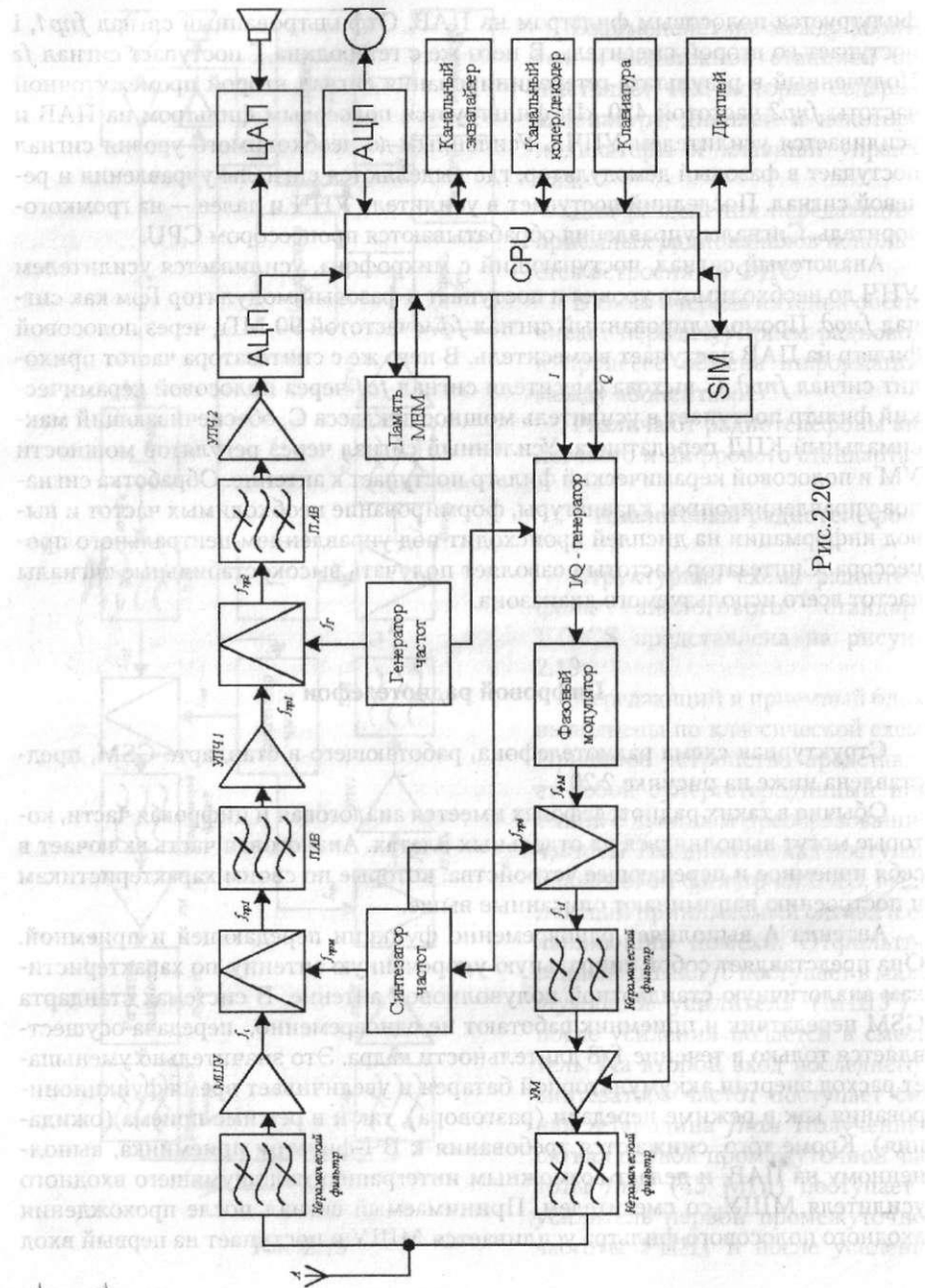


Рис.2.20

смесителя. На второй вход поступает сигнал гетеродина  $f_{нрм}$  с синтезатора частот. Сигнал первой промежуточной частоты  $f_{нр1}$  проходит через полосовой фильтр на ПАВ и усиливается усилителем первой промежуточной частоты УПЧ1, после чего поступает на первый вход второго смесителя. На второй его вход поступает сигнал гетеродина  $f_2$  с генератора частот. Полученный сигнал второй промежуточной частоты  $f_{нр2}$  фильтруется полосовым фильтром на ПАВ, усиливается усилителем УПЧ2 и поступает на аналого-цифровой преобразователь АЦП, где преобразуется в сигнал, необходимый для работы сигнального процессора CPU.

В режиме передачи информационный цифровой сигнал, сформированный в CPU, поступает на I/O-генератор, где происходит формирование модулирующего сигнала. Последний поступает в фазовый модулятор, с которого сигнал  $f_{фм}$  поступает в смеситель. На второй вход смесителя поступает сигнал  $f_{нр2}$  с синтезатора частот. Полученный сигнал  $f_{с1}$  через полосовой фильтр поступает в усилитель мощности УМ, управляемый с помощью CPU. Усиленный до необходимого уровня сигнал  $f_{с1}$  через полосовой керамический фильтр поступает к антенне А и излучается в пространство.

Цифровая логическая часть радиотелефона обеспечивает формирование и обработку всех необходимых сигналов. Она состоит из цифрового сигнального процессора CPU, памяти MEM, канального эквалайзера, канального кодера/декодера, SIM-карты, преобразователей АЦП и ЦАП, клавиатуры и дисплея. Логическая часть выполняет задачи, заключающиеся в демодуляции, кодировании, сжатии и восстановлении речевого сигнала, уменьшении шумов, в обработке информации, вводимой с клавиатуры. Она выводит необходимую информацию на экран дисплея, производит обмен информацией с SIM-картой, обеспечивающей аутентификацию абонента и шифрование данных.

В обоих случаях выполняется следующая спецификация измерений:

- радиочастотные измерения, включая анализ спектральных характеристик сигнала и его формы, частоты и уровня, отношение сигнал/шум;
- анализ параметров модуляции: AM/FM в случае аналоговых стандартов сотовых сетей, цифровых типов модуляции (GMSK, GFSK и т. д.) - в случае цифровых стандартов;
- анализ параметров звуковой частоты, включая анализ мощности постоянного и переменного сигнала, генерацию и измерения в диапазоне звуковых частот, уровень нелинейных искажений, отношение сигнал шум по звуковой частоте, общий уровень нелинейных искажений и шума (Signal Noise And Distortion - SINAD);
- измерения, связанные с кодированием и декодированием сигналов, включая тоновый набор, DTMF и сигнализацию;
- в случае анализа сотовых сетей цифровых стандартов перечисленную спецификацию дополняет анализ каналов по параметру ошибки (BER).



Для выполнения всей перечисленной спецификации измерений обычно используют комплексные анализаторы систем подвижной радиосвязи (цифровых или аналоговых стандартов). В состав этих анализаторов входят все необходимые для организации измерений приборы (анализатор спектра, измеритель мощности, осциллограф, генератор РЧ, звуковой генератор, генераторы и анализаторы различных типов модуляции, кодер/декодер протоколов, мультиметр и т. д.). Эти анализаторы могут успешно использоваться для организации измерений не только сотовых систем радиосвязи, но и перечисленных выше типов систем подвижной связи.

Характеристики анализаторов аналоговых и цифровых сотовых систем радиосвязи приведены в табл. 2.3 и табл. 2.4 соответственно.

Таблица 2.3. Характеристики анализаторов аналоговых систем подвижной радиосвязи

Модель	8920B	2955B	2965B	CMS54	Stabilock 4015	Stabilock 4032
Производитель	HP	Marconi	Marconi	R&S	Wavetek	Wavetek
Синтезированный генератор сигнала AM/FM	+	+	+	+	+	+
Анализатор спектра	+	+	+	+	+	+
Анализатор модуляции	+	+	+	+	+	+
Демодулятор SSB	+	+	+	+	н/д	+
Измеритель мощности РЧ	+	+	+	+	+	+
Частотомер РЧ/измеритель ошибок по частоте	+	+	+	+	+	+
Измеритель звуковой	+	-	+	+	+	+
Измеритель мощности AF	+	+	+	+	+	+
Вольтметр AC	+	-	+	-	+	+
Вольтметр DC	+	-	+	-	+	+
Измеритель искажений	+	+	+	+	+	+
Измеритель SINAD	+	+	+	+	+	+
Источники звуковой	2	1	1	2	1	1
Цифровой осциллограф	+	+	-	+	+	+
Встроенный компьютер	+	+	-	-	-	-
Анализ базовых станций	+	+	+	+	+	+
Анализ мобильных	+	н/д	-	-	н/д	н/д
Декодирование/генерация						
DTMF	+	+	+	+	+	+
POCSAG	+	+	-	+	+	+
NMT-450	+	+	+	+	+	+
NMT-900	+	н/д	+	+	+	+
LTR	+	-	-	-	+	+
AMPS/EAMPS/NAMPS	+	+	+	+	+	+
TACS/ETACS	+	+	+	+	+	+
ITACS/NTACS	+	+	+	+	+	+
EDACS	+	н/д	-	+	+	-
MPT 1327	+	+	+	+	+	+
TDMA – двусторонний	+	-	-	-	-	+
Габариты, мм	188x330x	175x345x	177x370x	320x175x	338x176x	230x375x
Вес, кг	16.8	16.8	18	15	13	18.5

Таблица 2.4. Характеристики анализаторов цифровых систем сотовой связи

Модель	8922 A	8922 B	83220 A/E	8922 S/M	8923 B	2966 A	CMD 55	CMD 54/57	CMD 60	Stabilock
Производитель	HP	HP	HP	HP	HP	Marc	R&S	R&S	R&S	Wavrt
Анализ цифровых сотовых сетей	+	+	-	-	-	+	-	+	-	+
Анализ базовых станций	-	+	-	-	-	+	-	+	-	+
Генератор модуляции	+	+	+	+	+	-	+	+	(GFS)	+
Генератор импульсной модуляции	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+
Анализатор спектра	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+
Детектор пиков	+	+	+	+	+	-	+	+	-	н/д
Анализатор	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+
Модулятор импульсов	+	+	+	+	+	-	+	+	(GFS)	+
Измеритель мощности	+	+	+	+	+	-	-	+	-	н/д
Частотомер РЧ/измеритель ошибок	+	+	+	+	+	н/д	н/д	+	+	+
Генератор звуковой	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
Измеритель звуковой	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
Измеритель мощности	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
Вольтметр AC	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
Вольтметр DC	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
Осциллограф	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
Анализатор BER	+	+	+	+	+	н/д	-	-	-	+
	+	+	+	+	+	+	н/д	+	-	н/д
Кодирование/генерация										
GSM	+	+	-	+	-	+	+	+	-	+
DCS-1800	-	-	+	-	-	+	+	+	-	-
PCS	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
DECT	-	-	-	-	+	-	+	-	+	-

## Глава 3. Организация функционирования систем мобильной связи

### 3.1 Сетевые и радиоинтерфейсы

При проектировании цифровых сотовых систем подвижной связи (ЦССПС) рассматриваются интерфейсы трех видов: для соединения с внешними сетями; между различным оборудованием сетей GSM; между сетью GSM и внешним оборудованием [1,4,53]. Структурная схема функционального оборудования сети GSM и соответствующие ей интерфейсы изображены на рис. 3.1. Все существующие внутренние интерфейсы сетей полностью соответствуют требованиям Рекомендаций ETSI/GSM 03.02.

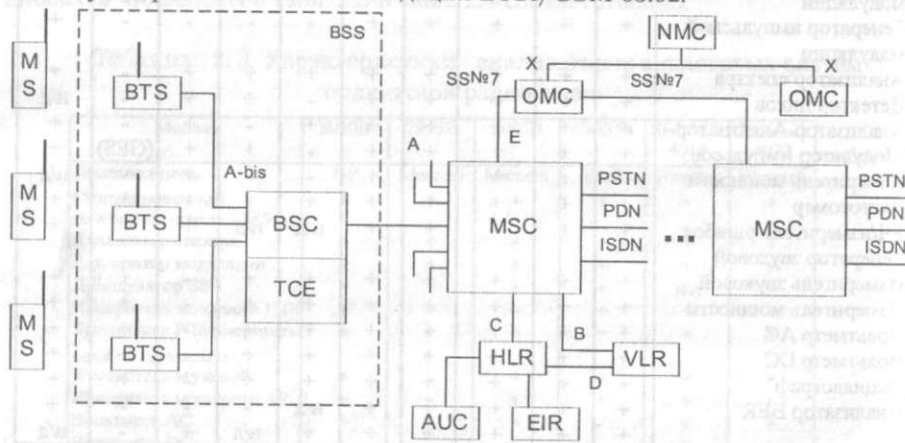


Рис. 3.1 Структурная схема функционального оборудования

Состав оборудования:

- MSC - центр коммутации подвижной связи.
- BSS - оборудование базовой станции.
- OMC - центр управления и обслуживания.
- MS - подвижные станции.
- HLR - регистр положения.
- VLR - регистр перемещения.
- AUC центр аутентификации.
- BSC - контроллер базовой станции.
- BTS - приёмопередатчик базовой станции.
- EIR - регистр идентификации оборудования.
- TCE - оборудования транскодирования.
- NMC-сетевой центр управления.

#### Соединение с PSTN.

Соединение с телефонной сетью общего пользования осуществляется MSC по линии связи 2 Мбит/с в соответствии с системой сигнализации SS №7. Электрические характеристики 2 Мбит/с - интерфейса соответствуют рекомендациям МККТТ G. 703.

#### Соединения с ISDN

Для соединения с создаваемыми сетями ISDN предусматриваются четыре линии связи 2 Мбит/с, поддерживаемые системой сигнализации SS №7 и отвечающие рекомендациям Голубой книги МККТТ Q. 701 - Q. 710, Q. 767, Q. 72x, Q. 71x, Q. 77x, Q. 78x, Q. 79x.

#### Соединение с существующей сетью NMT 450

Центр коммутации подвижной связи соединяется с сетью NMT 450 через четыре стандартные линии связи 2 Мбит/с и системы сигнализации SS №7. При этом должны обеспечиваться требования рекомендаций МККТТ по подсистеме пользователей телефонной сетью (TUP - Telephone User Part) и подсистеме передачи сообщений (MTP - Message Transfer Part) Желтой книги. Электрические характеристики линии 2 Мбит/с соответствуют Рекомендациям МККТТ G. 703.

#### Соединения с международными сетями GSM

В перспективе рассматривается подключение сети GSM в странах СНГ к общеевропейским сетям GSM. Эти соединения должны осуществляться на основе протоколов систем сигнализации (SCCP) и межсетевой коммутации подвижной связи (GMSC).

Интерфейс между MSC и BSS (A - интерфейс) обеспечивает передачу сообщений для управления BSS; передачи вызова; управления передвижением. A - интерфейс объединяет каналы связи и линии сигнализации. Последние используют протоколы SS №7 МККТТ. Полная спецификация A - интерфейса соответствует требованиям серии 08 Рекомендаций ETSI/GSM.

Интерфейс между MSC и HLR совмещен с VLR (B - интерфейс). Когда MSC необходимо определить местоположение подвижной станции, он обращается к VLR. Если подвижная станция инициирует процедуру местоопределения с MSC, он информирует свой VLR, который заносит всю изменяющуюся информацию в свои регистры. Эта процедура происходит всегда, когда MS переходит из одной области местоопределения в другую. В случае, если обо-



нент запрашивает специальные дополнительные услуги или изменяет некоторые свои данные, MSC также информирует VLR, который регистрирует изменения и при необходимости сообщает о них HLR.

Интерфейс между MSC и HLR (C - интерфейс) используется для обеспечения взаимодействия между MSC и HLR. MSC может послать указание (сообщение) HLR в конце сеанса связи для того, чтобы абонент мог оплатить разговор. Когда сеть фиксированной телефонной связи неспособна исполнить процедуру установления вызова подвижного абонента, MSC может запросить HLR с целью определения местоположения абонента для того, чтобы послать вызов MS.

Интерфейс между HLR и VLR (D - интерфейс) используется для расширения обмена данными о положении подвижной станции, управления процессом связи. Основные услуги, предоставляемые подвижному абоненту, заключаются в возможности передавать или принимать сообщения независимо от местоположения. Для этого HLR должен пополнять свои данные. VLR сообщает HLR о положении MS, управляя ей и переписывая ей номера в процессе блуждания; посылает все необходимые данные для обеспечения обслуживания подвижной станции.

Интерфейс между MSC (E - интерфейс) обеспечивает взаимодействие между разными MSC при осуществлении процедуры Handover - «передачи» абонента из зоны в зону при его движении в процессе сеанса связи без ее перерыва.

Интерфейс между BSC и BTS (A-bis интерфейс) служит для связи BSC и BTS и определен рекомендациями ETSI/GSM для процессов установления соединений и управления оборудованием. Передача осуществляется цифровыми потоками со скоростью 2, 048 Мбит/с. Возможно использование физического интерфейса 64 кбит/с.

Интерфейс между BSC и OMC (O - интерфейс) служит для связи BSC с OMC, используется в сетях с пакетной коммутацией МККТТ X. 25.

Внутренний BSC - интерфейс контроллера базовой станции обеспечивает связь между различным оборудованием BSC и оборудованием транскодирования (TCE); использует стандарт ИКМ-передачи 2, 048 Мбит/с и позволяет организовать из четырех каналов со скоростью 16 кбит/с один канал на скорости 64 кбит/с.

Интерфейс между MS и BSS (Um-радио интерфейс) определен в сериях 04 и 05 Рекомендаций ETSI/GSM.

Сетевой интерфейс между OMC и сетью, так называемый управляющий интерфейс между OMC и элементами сети, определен ETSI/GSM рекомендациями 12. 01 и является аналогом интерфейса Q. 3, который определен в многоуровневой модели открытых сетей ISO OSI.

Соединения сети с OMC могут обеспечиваться системой сигнализации МККТТ SS №7 или сетевым протоколом X. 25. Сеть X. 25 может соединяться

с объединенными сетями или с PSPDN в открытом или замкнутом режимах. GSM протокол управления сетью и обслуживанием также должен удовлетворять требованиям Q. 3 интерфейса, который определен в Рекомендациях 12. 01 ETSI/GSM.

Интерфейс между MSC и сервис - центром (SC) необходим для реализации службы коротких сообщений. Он определен в Рекомендациях 03. 40 ETSI/GSM.

Интерфейс к другим OMC.

Каждый центр управления и обслуживания сети должен соединяться с другими OMC, управляющими сетями в других регионах или другими сетями. Эти соединения обеспечиваются «X»-интерфейсами в соответствии с Рекомендациями МККТТ M. 30. Для взаимодействия OMC с сетями высших уровней используется Q. 3 - интерфейс.

### 3.2 Синхронизация сетей связи

*Последнее десятилетие ушедшего века ознаменовалось существенным пересмотром представлений о синхронизации сетей связи.*

Сейчас сформировалась целостная международная нормативная база по сетям синхронизации, которые служат для поддержки существующих и перспективных сетей электросвязи. Индикатором степени завершенности представлений в этой области можно считать практическое руководство ETSI по проектированию сетей синхронизации [147]. Неожиданным для многих оказалось осознание того факта, что без жестких технических требований к синхронизации сеть ATM не может быть сетью общего пользования, а превратится в узкоспециализированную сеть передачи данных [148]. А ведь еще совсем недавно никто не сомневался в том, что «...в сетях с коммутацией пакетов, как известно, проблемы синхронизации не существует вообще» [149]. Однако, как оказалось, даже наиболее востребованные услуги Интернет могут оказаться бесперспективными, если при проектировании сетей не позаботиться о хорошей синхронизации [150,151].

Опыт научно-технических советов, конференций и семинаров показывает, что современные представления о синхронизации сетей электросвязи с большим трудом находят понимание не только в среде технического руководства украинских компаний, но и среди заслуженных специалистов, имеющих ученые степени. Анализ этого психологического явления посвящен даже раздел отчета о разработке отечественной Концепции построения сетей синхронизации [152,153]. Надо отметить, что по-настоящему операторы Украины почти не сталкивались с проблемами синхронизации

именно потому, что их сети еще недостаточно развиты. Даже первичная транспортная сеть синхронной цифровой иерархии (SDH) Укртелекома находится на начальном этапе ее развития. До конца 2001 года она представляла собой несколько пересекающихся магистралей SDH без замкнутых контуров, когда особых проблем с синхронизацией не возникает. В ближайшее время эти проблемы могут возникнуть во-первых, у украинских операторов, которые получили лицензию на собственные международные центры коммутации. Во-вторых у операторов, строящих собственные сети национального масштаба на основе собственных и арендованных магистралей, а в третьих, у всех владельцев цифровых АТС, которые не смогут предоставлять современные и перспективные услуги по той причине, что из-за естественного усложнения первичной сети старые каналы синхронизации не обеспечат требуемой стабильности. Пожалуй, наступает тот момент, когда синхронизация становится реальным фактором рентабельности сетей связи украинских операторов. На наш взгляд все это свидетельствует о том, что обсуждение данной тематики является актуальным. В этой подрубке предпринята попытка обобщить современные представления о сетях синхронизации.

### 3.2.1 Определение понятий

Для сетей электросвязи термин синхронизация означает, что тактовая частота в сети определена одним источником для того, чтобы обеспечить два условия информационного обмена между пользователями:

непрерывность: среднее значение скоростей передачи и приема в связанных между собой оконечных устройствах должно быть одинаковым;

целостность: информационные блоки в оконечном устройстве приема должны появляться в той самой последовательности, с которой они отправлялись от оконечного устройства передачи.

непрерывный процесс поддержания общей для всех узлов синхронной сети тактовой частоты называют синхронизацией сети. Для этого используют каналы синхронизации, соединяющие узлы, которые вместе и образуют сеть синхронизации [147]. Целесообразно не смешивать понятия «сеть синхронизации» и «система синхронизации»: второе из них допустимо для системы передачи между двумя пунктами. Если же появляется третий пункт, то необходимо говорить уже о «сети синхронизации».

По современному определению Рекомендации ITU-T G.810(08/96)/4.3.9 синхронная сеть – это сеть связи, в узлах которой при нормальных условиях долговременная точность тактовой частоты одинакова. Интересно сопоставить его с другим определением (Рекомендация ITU-T G.701(03/93)/7016): «Синхронизированная (синхронная) сеть – это сеть,

в которой значащие моменты тактовых сигналов подстраивают таким образом, чтобы они были синхронными». Оно, во-первых, ориентировано на инженера связи, который знаком с синхронизацией на уровне фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), а во-вторых, основано на определении «синхронных сигналов» из той же Рекомендации ITU-T G.701(03/93)/6016, где синхронными сигналами считают такие, у которых значащие моменты точно соответствуют одной и той же средней частоте. В сознании возникает идеально простая, т.е. понятная картина, когда в любых двух узлах сети «частоты тактовых сигналов равны с точностью до фазы». Опыт ведущей компании мира показал, что в протяженных сетях со сложной структурой на практике такого не бывает [154]. Этот опыт и воплотили в Рекомендации ITU-T G.810(08/96)/4.3.9, используя для синхронной сети через понятие «долговременной частоты», которое определяется на основании вычисления значений показателей нестабильности по результатам прямых измерений во временной области. Стоит подчеркнуть существенное отличие нового определения – оно основано не на интуитивном понятии «синхронного сигнала», а на конкретной измеренной величине нестабильности. Чтобы разобраться в этом, нужно обладать знаниями, которые не включены в обычный курс подготовки инженеров электросвязи [155].

Понимание различий между двумя определениями является ключевым, так как отражает динамику представлений о синхронизации сетей в течение последнего десятилетия. Например, по современному определению синхронной сети можно допустить четыре режима ее работы:

- синхронный,
- плезиохронный,
- псевдо-синхронный (смешанный),
- асинхронный (вырожденный).

В синхронном режиме все устройства синхронизации являются ведомыми единственным первичным устройством синхронизации – Primary Reference Clock (PRC). В какой-то степени этот идеализированный режим имеет право на существование в зоне обслуживания регионального оператора. В плезиохронном режиме все устройства синхронизации работают с одинаковой номинальной частотой, а любые отклонения от нее не должны превышать определенных пределов. Это прежде всего обычный режим работы на границе между национальными операторами при условии, что «определенный предел» отклонений относительной частоты не превышает 10<sup>-11</sup>. В пределах национальной сети плезиохронный режим может иметь место когда в хорошо спланированной сети синхронизации канал синхронизации по каким либо причинам отсутствует. Устройства синхронизации в таком случае переходят в режим удержания частоты (Holdover), или просто работают в режиме свободных колеба-



ний, но их характеристики должны удовлетворять требованиям Рекомендации ITU-T G.811 [152]. Под псевдосинхронным режимом понимают такое состояние сети, когда не все ее устройства синхронизации являются ведомыми одним и тем же PRC. Это обычный режим работы между сетями разных операторов, или между разными регионами обслуживания одного оператора при условии, что его сеть синхронизации основана на частично распределенных PRC. Наконец, асинхронный режим является выжженным в том смысле, что относительная тактовая частота в любых узлах сети превышает нормированные пределы. В транспортной сети SDH целостность трафика может быть сохранена с неопределенным качеством обслуживания до тех пор, пока характеристики всех устройств синхронизации останутся в нормированных пределах [155], т.е. уход относительной частоты не превысит  $4,6 \cdot 10^{-6}$ . По существу, сеть перестает быть синхронной.

### 3.2.2 Архитектура сетей синхронизации

Под архитектурой сети синхронизации принято понимать принципы размещения устройств синхронизации и распределения опорных сигналов на основе технических требований к устройствам, каналам, стыкам и сигналам синхронизации, а также управления сетью в целом. В этой статье мы ограничимся рассмотрением принципов размещения устройств синхронизации и распределения опорных сигналов.

Согласно современным представлениям о сетях синхронизации, существует три основных типа архитектуры сети синхронизации, представленные в табл. 3.1.

Табл. 3.1 Основные типы архитектуры сети синхронизации

Архитектура сети синхронизации	
Сеть с единственным PRC	
Сеть с частично распределенными PRC	Зависимые PRC
	Независимые PRC
Сеть с распределенными PRC	

**Сеть с единственным PRC.** исторически необходимость синхронизации сетей возникла в связи с внедрением цифровых центров коммутации в транспортную среду PDH. Это – «классический» тип сети синхронизации (его еще называют «деспотическим»), для которого определили синхронный режим работы и два жестких статических принципа:

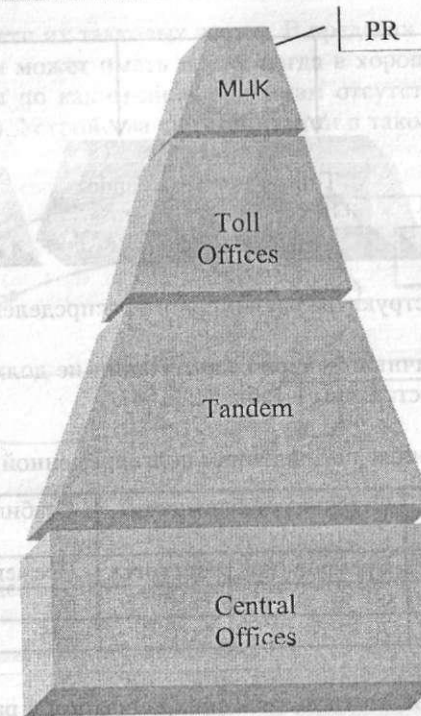


Рис.3.2 Структура сети синхронизации с единственным PRC

- PRC является единственным источником синхронизации для всей сети;
- характеристики ведомых устройств синхронизации должны соответствовать жестким требованиям уровневой иерархии, тесно связанной с иерархией центров коммутации.

В синхронном режиме работы все устройства синхронизации, кроме одного, являются ведомыми по опорному сигналу единственного PRC. В какой-то степени этот идеализированный режим имеет право на существование в зоне обслуживания регионального оператора [147].

Характерным признаком «классического» типа является автономность, т.е. у PRC нет входа внешнего опорного сигнала (отметим однако, что в состав современных PRC, как правило, вводят приемные устройства спутниковых радионавигационных систем (СРНС), таких как ГЛОНАСС (Россия) или/и GPS (США)).

**Сеть с распределенными PRC.** Кратчайшая характеристика такой сети: «PRC в каждом узле» [156]. Такая перспектива навеяна прогнозом Bellcore (Bell Communications Research), согласно которому для предоставления услуг связи в ближайшее время долговременная точность частоты, необходимая

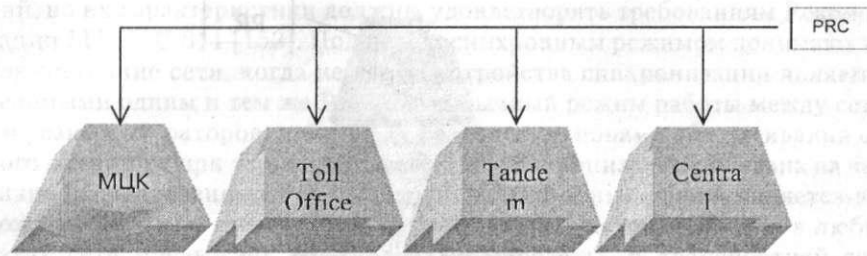


Рис.3.3 “Плоская” структура равномерного распределения опорных сигналов первичным и вторичным центрам коммутации не должна быть хуже значений, которые предоставлены в табл. 3.2 [154].

Табл.3.2 Данные по значениям долговременной точности частоты

Стык Синхронизации	Суточная стабильность		Стабильность за неделю	
	Времени [нс]	Частоты	Времени [нс]	Частоты
Первичный центр	60	$7 \times 10^{-13}$	60	$1 \times 10^{-13}$
Вторичный центр	70	$8 \times 10^{-13}$	185	$3 \times 10^{-13}$

В отличие от первого типа, сеть синхронизации с распределенными PRC никак не связана с иерархией цифровых центров коммутации. В этом случае она является не иерархической, а уплощенной: одну и ту же стабильность обеспечивают в центре коммутации любого уровня – поэтому второй принцип классического варианта здесь не действует. В зависимости от принимаемого технико-экономического, а иногда и политического (если речь идет о сетях национальных операторов), решения по выбору конкретных типов PRC, возможны два варианта:

- использовать PRC на основе квантовых стандартов частоты (генератора на цезиевом пучке или водородного лазера);
- или использовать всемирное координированное время (UTC, Universal Time Coordinated), частоту которого извлекают из навигационных сигналов СРНС.

Оба подхода имеют свои плюсы и минусы, однако подробное рассмотрение технических характеристик, преимуществ и недостатков различных PRC заслуживает отдельных статей, здесь же будут приведены примеры практической реализации сетей синхронизации.

На международном уровне используют фактически *плезихронный* режим работы, когда все устройства синхронизации независимы, но соблюдают-

ся требования к точности их тактовых частот. В пределах национальной сети плезихронный режим может иметь место, когда в хорошо спланированной сети опорные сигналы по каким-либо причинам отсутствуют (например, в аварийных ситуациях). Устройства синхронизации в таком случае переходят

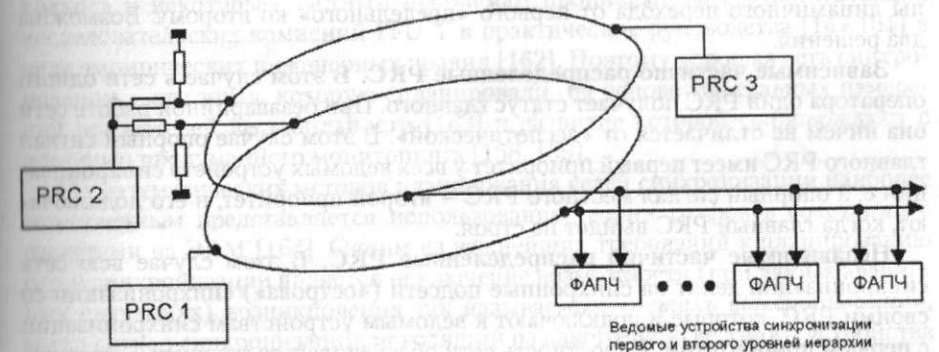


Рис.3.4 Фрагмент сети синхронизации сети связи Швейцарии

Всемирное координированное время UTC (GPST/ГЛОНАСС)



Рис.3.5 Структурные элементы сети синхронизации компании Транстелеком

в режим удержания частоты (Holdover), или просто работают в автономном режиме, но их характеристики также должны удовлетворять требованиям Рекомендации ИТУ-Т G.811, в противном случае синхронная сеть не будет функционировать с должным качеством.

**Сеть с частично распределенными PRC.** Рассмотренные выше два типа сетей синхронизации можно назвать «предельными» в том смысле, что они



представляют два противоположных подхода: либо полная централизация, либо, наоборот, полная независимость. Первый из этих типов является характерным для сетей прошлого, а второй должен быть чуть ли не конечным этапом развития сетей синхронизации в их современном понимании. Очевидно, приемлемы некие компромиссные решения, которые представляют собой этапы динамичного перехода от первого «предельного» ко второму. Возможны два решения.

**Зависимые частично распределенные PRC.** В этом случае в сети одного оператора один PRC получает статус главного. При безаварийной работе сети она ничем не отличается от «деспотической». В этом случае опорный сигнал главного PRC имеет первый приоритет у всех ведомых устройств синхронизации с, а опорный сигнал местного PRC – второй приоритет, и его подключают, когда главный PRC выйдет из строя.

**Независимые частично распределенные PRC.** В этом случае всю сеть синхронизации делят на синхронные подсети («острова») синхронизации со своими PRC, которые и подключают к ведомым устройствам синхронизации с первым приоритетом. Целостность сети обеспечивается точностью местных PRC и их взаимным мониторингом. Мониторинг необходим для того, чтобы ведомые устройства синхронизации синхронной подсети, в которой собственное PRC вышло из строя, могли быть подключены к соседней подсети без нарушения трафика.

Представляется разумным отдавать предпочтение одному из этих вариантов на основе предварительных исследований на конкретных объектах, а именно:

- оценки стабильности сигналов на стыках синхронизации;
- оценки надежности стыков синхронизации.

Другими словами, местный PRC должен быть подключен с первым приоритетом, если оно удовлетворяет двум критериям:

- а) сигнал синхронизации местного PRC имеет лучшие показатели нестабильности, чем сигнал синхронизации на стыке главного PRC;
- б) надежность местного PRC выше, чем надежность канала синхронизации главного PRC.

Соответствие критериям (а) и (б) должно быть четко определено периодическими аттестациями и непрерывным мониторингом стыков синхронизации на соответствие их нормированным пределам.

Наиболее наглядное представление о динамике развития сетей синхронизации можно получить на основе краткого ретроспективного обзора удачных примеров практического их воплощения [154, 157-159].

### 3.2.3 Элементы планирования сетей синхронизации

Современные методы планирования сетей можно охарактеризовать кратко: это методы проб и ошибок, в лучшем случае дополненные системами автоматизированного проектирования. Тем не менее попытки аналитического подхода к некоторым частным проблемам проникают из соответствующих исследовательских комиссий ИТУ-Т в практические руководства [147,161] в виде эмпирических инженерных правил [162]. Поэтому хорошая сеть синхронизации – это такая, которую спланировали на основе тщательных измерений показателей нестабильности [163] и развитие которой сопровождают с помощью продуманного мониторинга [158, 159].

Из математических методов планирования сетей синхронизации наиболее естественным представляется использование теории графов в сочетании с расчетами на ЭВМ [164]. Одним из важнейших требований к планированию сетей синхронизации является исключение возможности (при любых аварийных ситуациях) возникновения так называемых «петель синхронизации», когда сигнал синхронизации, исходящий из какого-либо ведомого устройства синхронизации, пройдя по цепи узлов, оказывается его действующим опорным сигналом. Аварийная сигнализация не в состоянии зафиксировать это явление, которое, по существу, приводит к деградации сети. Аппарат теории графов [164] позволяет определить возможность возникновения петель путем анализа контура простого ориентированного невзвешенного графа фрагмента сети синхронизации. Применение ЭВМ позволяет выполнить трудоемкие вычисления, необходимые для динамического анализа поведения реальной сети, для того, чтобы избежать возникновения контуров при резервировании каналов синхронизации в любых аварийных ситуациях. Обобщение этого метода на взвешенные графы позволит формализовать алгоритм использования **сообщений о состоянии синхронизации (SSM, Synchronization Status Message)** для решения нетривиальной задачи автоматического резервирования. На рис. 3.6 показан простой пример того, как можно избежать петель на фрагменте сети с распределенными PRC, если использовать метод линеаризации графа такого фрагмента [161].

Слева на рисунке (рис.3.2) условно изображен граф топологии участка СС, состоящего из 9 узлов, в том числе 6 узлов уровня SEC. Пунктиром изображены резервные каналы синхронизации. Для поиска возможных петель в сети синхронизации необходимо максимально упростить структуру графа вплоть до линейной (отсюда название метода), что упрощает выявление потенциально опасных участков для образования петель. Справа показан линеаризованный граф, на котором уже легко определяется, что в случае аварии на участке между узлами 4 и 5 вв фрагменте сети возникает петля синхронизации по маршруту 9-4-7-8-6-9.

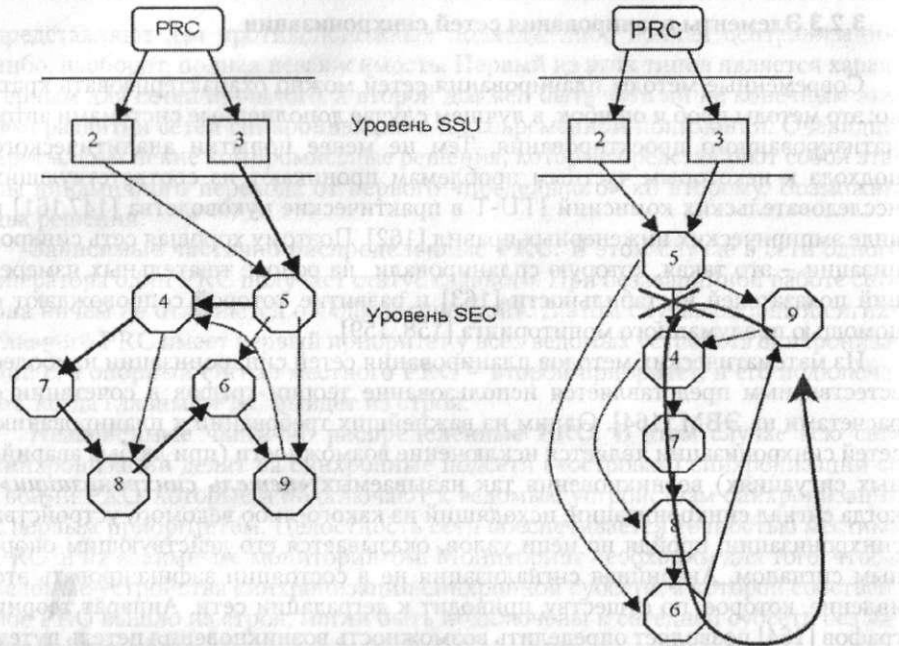


Рис.3.6 Пример исключения возможности возникновения «петель синхронизации» при планировании сетей синхронизации

Существуют общепринятые эмпирические правила планирования сетей синхронизации которые являются практическим дополнением международных нормативных документов:

- в сети синхронизации «петли синхронизации» недопустимы, так как являются причиной ее деградации;
- для того, чтобы обеспечить надежный производственный запас по фазовым шумам, в цепочках синхронизации следует избегать более чем 4 – 6 последовательных SEC между двумя соседними SSU;
- использовать цифровые потоки E1 (2,048 Мбит/с) информационной нагрузки транспортной сети SDH в качестве каналов синхронизации не рекомендуется; для распространения сигналов синхронизации через станционные стыки 2,048 МГц необходимо использовать групповые оптические сигналы STM-N;
- в тех случаях, когда потребители сигналов синхронизации (например цифровые АТС или контроллеры базовых станций) не оборудованы станционными стыками 2,048 МГц, для передачи сигналов синхронизации рекомендуется либо доставлять потоки E1 (2,048 Мбит/с) трактами PDH, либо применять их «перепривязку» к сигналу синхронизации (Retiming).

### 3.3 Сигнализация в системах связи

В процессе установления соединений на сети связи отдельные узлы и станции обмениваются между собой информацией, которая предшествует, сопровождает или следует за передачей сообщения абонента. Этот процесс информационного обмена объектов сет и называется сигнализацией, а способ организации обмена - системой сигнализации. Системы сигнализации характеризуются назначением, способом формирования и способом передачи сигналов.

По назначению сигналы разделяются на:

- линейные, передаваемые по каналам и СЛ между линейными комплектами этих каналов и линий от их занятия до освобождения; линейные сигналы предназначены для фиксации в линейных комплектах этапа установления соединения, состояния каналов и линий и выполнения ряда технических функций;
- управляющие, предназначены для передачи информации между управляющими устройствами только в процессе установления соединения; с помощью этих сигналов выстраивается путь для установления соединения и линия вызываемого абонента;
- информационные, предназначенные для информирования абонента или телефонистки о начале установления соединения, свободности или занятости линий; эти сигналы обычно воспринимаются на слух, поэтому иногда их называют акустическими.

Проблема взаимодействия станций (обмен сигналами) решается путем установки необходимого набора комплектов соединительных линий, количество которых существенным образом влияет на объем оборудования всей станции. Разнообразие используемых на телефонных сетях систем сигнализации усугубляет сложность этой проблемы. Для нормальной работы сети связи необходимо согласовать системы сигнализации, применяемые на различных уровнях иерархии сети.

Обозначенные выше виды сигналов различаются между собой по нескольким признакам: по амплитуде, частоте, фазе, длительности импульсов, числу импульсов и положению импульсов во времени. Система, в которой распознавание сигналов ведется только по одному признаку называется некодированной. При большом числе различных сигналов используют кодированные системы, ведущее распознавание сигналов по двум или более признакам.

Способ передачи линейных сигналов зависит от принадлежности СЛ к междугородным, внутризоновым, местным, городским или сельским сетям, а также от вида линий (ФСЛ, канал СП). Передача линейных сигналов может осуществляться:



1. Постоянным током или гальваническим способом по 2-х и 3-х проводным ФСЛ малой протяженности, подачей на разговорные или сигнальные провода потенциалов различной полярности и длительности. Гальванический способ используется также для передачи сигналов при установлении соединений внутри АТС. Различают передачу шлейфными импульсами, батарейными импульсами, разнополярными импульсами.

2. Индуктивным способом, при котором сигнал постоянного тока преобразуется в два разноименных импульса. Положительный импульс соответствует началу, а отрицательный - концу сигнала. Индуктивный способ используется только на СТС.

3. Цифровым способом, двоичным кодом.

4. Частотным способом, сигналами переменного тока.

При использовании частотного способа система сигнализации может быть организована:

- в полосе разговорных частот, т.е. непосредственно по разговорному телефонному каналу;
- вне полосы разговорных частот;
- по выделенному сигнальному каналу (ВСК).

На междугородных и зонавых телефонных сетях используется одночастотная система сигнализации, в которой линейные сигналы передаются одной частотой 2600 Гц, а сигналы управления многочастотным способом, кодом "2 из 6".

Для международных соединений МККТТ стандартизованы следующие частотные системы сигнализации (SS - signaling system):

● SS N3 - одночастотная, в полосе ТЧ, для каналов одностороннего действия. Здесь и линейные и управляющие сигналы передаются токами одной частоты - 2280 Гц. SS N3 применяется для оконечных соединений на европейском континенте и не рекомендуется для новых направлений связи. SS N3 использует для обозначения каждой цифры комбинацию из четырех импульсов двух видов (наличие или отсутствие тока частотой 2280 Гц) - эквивалент цифрового кодирования с помощью единиц и нулей. С целью определения начала и конца каждой комбинации предусмотрена передача стартового (1) и стопового (0) импульсов. Длительность передачи каждого импульса в этой системе - 50 мс, соответственно длительность передачи одной цифры - 300 мс.

● SS N4 - двухчастотная в полосе ТЧ, для каналов одностороннего действия. Линейные и управляющие сигналы передаются частотами 2040 и 2400 Гц, применяется для оконечных и транзитных соединений. В SS N4 цифры кодируются также двоичной комбинацией из четырех импульсов, каждый из которых имеет частоту или . Длительность каждого импульса и интервала меж-

ду ними составляет 35 мс. Поскольку передача осуществляется с интервалами - нет необходимости в стартовых и стоповых сигналах. Длительность передачи каждой цифры составляет 280 мс.

● SS N5 и 5' - применяются в полосе ТЧ, для каналов одно- и двухстороннего действия. В этих системах линейные сигналы передаются двумя частотами 2400 и 2600 Гц, а сигналы управления многочастотным способом, кодом "2 из 6". Используется для оконечных и транзитных соединений.

● SS R1 и R2 - отличаются от SS N5 и 5' применением для передачи линейных сигналов одной частоты 2600 Гц, и другого набора частот для передачи сигналов управления, при использовании многочастотного способа.

## Глава 4. Позиционирование абонентов в сетях мобильной связи

Бурное развитие систем мобильной связи предложило новые варианты решения проблем местоопределения за счет интеграции технологий мобильной связи и AVL (Automatic Vehicle Location) систем [3,18,19,26,41,80,125,126].

### 4.1 Предпосылки создания новых технологий

С одной стороны, при построении диспетчерских AVL-систем, с помощью которых осуществляется централизованный контроль за местоположением и перемещением подвижных объектов в определенной зоне, одну из наиболее сложных проблем представляет организация надежного канала связи между контролируемыми объектами и диспетчерским центром. Построение специальной сети радиосвязи для системы местоопределения – весьма дорогое удовольствие, которое может быть экономически оправданным только в случае небольших зон, т.к. затраты на создание инфраструктуры сети растут прямо пропорционально размерам территории и количеству контролируемых объектов. Наибольший же интерес представляет создание крупных систем местоопределения, зона действия которых охватывает какой-либо город или регион, а число контролируемых объектов может расширяться в широких пределах.

Поэтому использование в качестве транспортной среды каналов систем сотовой связи с уже реализованной инфраструктурой сети позволяет наиболее оптимально с экономической точки зрения решить данную проблему. Кроме того, сотовые сети поддерживают высокую интенсивность связи и имеют широкую зону охвата.

С другой стороны, заложенные в основу различных стандартов сотовой связи технические принципы их построения, способность расширения функциональных возможностей сотовых телефонов и базовых станций, возможности модификации программного обеспечения центрального оборудования создают предпосылки для реализации AVL-систем на новых технических принципах. Например, для определения координат местонахождения абонента сотовых систем можно использовать результаты работы канала синхронизации систем стандарта GSM или данные, получаемые от имеющейся в оборудовании стандарта CDMA подсистемы точного управления мощностью передатчиков радиотелефонов.

Очевидно, понимая преимущества интеграции технологий и открывающимся на ее основе возможностям, Федеральная комиссия по электросвязи США приняла 12 июня 1996 г. постановление (документ 94-102) об обязательном оснащении служб экстренной помощи системами местоопределения подвижных объектов и определила технические требования к таким

системам. Согласно этому распоряжению к октябрю 2001 г. все операторы сетей мобильной связи должны обеспечить свои сети средствами определения местоположения абонентов, позвонивших по телефону службы спасения 911. При этом точность местоопределения должна быть не хуже 410 футов (около 125 м) в 67 % случаев. Распоряжение Федеральной комиссии по электросвязи США дало мощный стимул для компаний, занимающихся разработкой систем местоопределения и желающих внедриться на американский рынок.

Позднее, 15 сентября 1999 г., Федеральная комиссия утвердила новые требования к предоставлению абонентам сотовых сетей услуг службы спасения. В соответствии с этими требованиями специализированные мобильные телефоны с функцией определения положения должны обеспечивать среднеквадратическую погрешность определения местоположения не хуже 50 метров (для 67% вызовов), а максимальную – не более 150 м (для 95% вызовов). Операторы сетей сотовой связи должны обеспечить выполнение этих требований к 2005 г.

Подобные решения могут быть приняты в ближайшее время и Европейской комиссией по связи.

### 4.2 Технологии местоопределения в сетях мобильной связи

Решение задачи местоопределения радиотелефонов в сетях сотовой связи началось с простейшего метода, который получил название Cell ID. Это метод базируется на определении местоположения абонента с точностью до соты путем фиксации базовой станцией сигнала радиотелефона, а при приеме несколькими станциями – определения максимальной амплитуды сигнала. Территория, в которой может находиться абонент, может быть уточнена, если используются секторные антенны. В этом случае, при приеме сигнала несколькими базовыми станциями грубо вычисляются направления его прихода. Погрешность местонахождения таким способом достаточно низка и может достигать до 30 км.

Поэтому большинство существующих предложений систем местоопределения на основе сотовых сетей базируется на трех более современных конкурирующих технологиях:

- технологии времени прибытия TOA (Time of Arrival), основанной на измерении и сравнении интервалов времени прохождения сигнала от мобильного телефона абонента до нескольких базовых станций;
- технологии разности времен OTD (Observed Time Difference), основанной на измерении и сравнении интервалов времени прохождения сигналов от нескольких базовых станций до мобильного телефона абонента;
- технологии совмещения сотовых телефонов с приемниками спутнико-



вой радионавигации A-GPS (Assisted Global Positioning System), основанной на встраивании GPS-приемников в мобильные телефоны.

Две первые из перечисленных технологий используют так называемый разностно-дальномерный принцип позиционирования и отличаются местом измерения интервалов прохождения сигнала (или на базовых станциях, или в самом мобильном телефоне). Основные принципы, положенные в основу каждой из технологий, достигаемая точность, достоинства и недостатки методов приведены в табл.4.1.

### Технология TOA

При точно известном моменте времени приема сигнала сотового телефона возможно вычисление расстояния от абонента до антенны базовой станции. Однако в случае измерения интервала времени прохождения сигнала одной базовой станцией для определения расстояния требуется жесткая синхронизация работы всех элементов системы с точностью до долей микросекунды, что практически неприемлемо для существующих сетей сотовой связи.

Поэтому более просто реализуется требующий менее жесткой синхронизации метод местоопределения абонента сети сотовой связи по разности моментов времени прихода сигнала радиотелефона в трех или более различных базовых станциях. В ряде источников эту модификацию технологии TOA обозначают как TDOA (Time Difference of Arrival).

Базовые станции, принимающие сигнал радиотелефона, должны быть оснащены блоками определения местоположения LMU (Location Measurement Unit). По различию времени поступления сигнала управляющим компьютером сети сотовой связи с помощью алгоритма, который называется триангуляционным, рассчитывается местоположения передатчика. Процесс позиционирования инициируется абонентом и заканчивается передачей абоненту данных о месте его нахождения.

При использовании технологии TOA достигается достаточно высокая точность местоопределения, которая зависит от ширины полосы частот сигнала, точности синхронизации и среды распространения сигнала. Расчетные данные показывают возможность определения местоположения абонентов сотовых сетей с точностью до 125 м без модификации радиотелефонов. Дальнейшее повышение точности может быть достигнуто при изменении аппаратных и программных ресурсов сотовых телефонов.

К недостаткам данной технологии относится необходимость оснащения практически всех базовых станций блоками LMU, что требует больших зат-

рат на модификацию инфраструктуры сети сотовой связи. Для обеспечения высокой точности необходима синхронизация работы этих блоков в пределах всей сети, что обычно приводит к использованию в составе каждого блока приемника GPS. Программное обеспечение сети также должно быть подвергнуто серьезной модификации для обеспечения приема сигнала сотового телефона не менее чем тремя базовыми станциями.

### Технология OTD

Гораздо меньших затрат в модификацию инфраструктуры сети требует технология OTD, при использовании которой измерение времени прибытия сигнала производятся не базовыми станциями, а самим радиотелефоном.

Управляющий контроллер сотового телефона измеряет время прохождения сигнала от нескольких базовых станций, одна из которых оснащена блоком LMU. Для получения информации о своем местоположении абонент совершает звонок, при котором его телефон до установки речевого соединения посылает специальное короткое сообщение. Данное сообщение включает информацию о временах получения сигналов, непрерывно транслируемых базовыми станциями при нормальной работе сети.

Получив сообщение от телефона, специальный центр мобильной локализации MLC (Mobile Location Centre) производит необходимые вычисления для расчета местоположения, после чего пакет данных с координатами места нахождения абонента пересылается на сотовый телефон. Весь процесс, как правило, занимает не более нескольких секунд.

По сравнению с методом TDOA технология OTD требует меньшего количества LMU, ориентировочно достаточно одного модуля на четыре базовые станции. Модули могут входить в состав базовых станций или размещаться отдельно.

Другим преимуществом является отсутствие необходимости жесткой временной синхронизации работы модулей LMU, т.к. в данном случае известны расстояния между LMU и интервалы времени прохождения сигнала от базовых станций до телефона. Система позиционирования может быть обучаемой, теоретически все возможные положения абонентов на конкретной территории с определенной точностью могут быть вычислены и занесены в базу данных, хранящуюся в памяти центра мобильной локализации.

Вместе с тем, технология OTD требует изменения программного обеспечения мобильных радиотелефонов, что создает неудобства для пользователей, т.к. им придется либо нести свои аппараты в сервисные центры для модификации программного обеспечения (если это еще и возможно!), либо покупать новые модели сотовых телефонов.

## Технология А-GPS

Многие компании, разрабатывающие системы местоопределения подвижных объектов, идут по пути интеграции сотовой связи с глобальной системой спутниковой радионавигации – GPS. Для этого GPS-приемники встраиваются в мобильные телефоны, а при реализации централизованной диспетчерской системы контроля за подвижными объектами информация о местоположении абонентов передается по каналам сотовых систем в виде специальных или стандартных коротких сообщений.

Некоторые компании уже начали производство сотовых радиотелефонов с встроенными GPS-приемниками. Подобные модели были представлены на выставке “Связь-Экспокомм-2001” (г. Москва) финской фирмой Benefon, продемонстрировавшей два варианта сотовых телефонов, совмещенных с GPS-приемниками: профессиональный телематический телефон Benefon Track Pro и персональный навигационный телефон Benefon Esc.

К несомненным достоинствам подобных систем относится высокая точность местоопределения и глобальное покрытие. После снятия ограничений на точность определения местоположения с помощью системы GPS гражданские потребители имеют возможность узнать координаты своего местонахождения с точностью до 10 м. При этом определении местоположения может производиться и вне зоны действия сети сотовой связи.

При внедрении данной технологии инфраструктура сети сотовой связи затрагивается только в части программного обеспечения, установка дополнительных аппаратных модулей на базовых станциях или в центре коммутации не требуется, а спутниковая группировка уже находится на орбите.

Однако для пользователей переход к технологии А-GPS будет означать существенные дополнительные расходы, т.к. необходима замена сотового телефона. При этом очевидно, что встраивание GPS-приемников в телефоны будет увеличивать их габариты, вес и энергопотребление. По крайней мере, в первые годы выпуска подобные модели будут стоить заметно дороже обычных мобильных телефонов.

Стоит упомянуть и о недостатках, присущих глобальной системе позиционирования GPS.

Во-первых, несмотря на глобальность покрытия, определение координат производится только при прямой видимости GPS-приемником не менее трех спутников. Поэтому определение местоположения зачастую невозможно в закрытых помещениях, низинах, в условиях плотной городской застройки или под плотной листвой.

Во-вторых, GPS-приемники требуют большого времени на начальную установку, для приведения приемника в состояние готовности и получения первого отсчета после включения питания может потребоваться 30 – 90 секунд, а в некоторых случаях и больше.

Следует, правда, отметить, что данные недостатки могут частично компенсироваться за счет интеграции с системой сотовой связи: сеть может “подсказывать” недостающую информацию для определения местоположения или инициализации, а также “брать на себя” часть необходимых сложных вычислений для снижения энергопотребления.

Табл. 4.1.

Наименование технологии позиционирования	Основной принцип	Преимущества	Недостатки	Достижимая точность, м
Time of Arrival (TOA)	Измерение и сравнение интервалов времени прохождения сигнала от радиотелефона до нескольких (не менее 3-х) базовых станций	1. Не требуется замена сотовых телефонов и модификация их программного обеспечения.	1. Необходимость больших затрат на расширение инфраструктуры сети (установка модулей LMU) и модификацию программного обеспечения. 2. Жесткие требования к временной синхронизации элементов системы.	До 125
Observed Time Difference (OTD)	Измерение и сравнение интервалов времени прохождения сигналов от нескольких базовых станций до мобильного телефона	1. Снижение затрат на установку модулей LMU по сравнению с методом TOA (примерно в 4 раза). 2. Отсутствие необходимости жесткой временной синхронизации.	1. Необходимость изменения программного обеспечения радиотелефонов или использования новых моделей аппаратов.	
Assisted Global Positioning System (A-GPS)	Совмещение сотовых телефонов с приемниками спутниковой радионавигации GPS	1. Высокая точность позиционирования. 2. Глобальное покрытие	1. Необходимость использования новых моделей телефонов с большими габаритами, весом, энергопотреблением и стоимостью. 2. “Мертвые зоны” для местоопределения в зданиях, туннелях, в условиях плотной городской застройки, под плотной листвой и т.д. 3. Длительное время инициализации GPS-приемника.	До 10



Конкуренция рассмотренных выше технологий позиционирования подвижных объектов в сетях сотовой связи не привела пока к выбору единого подхода или метода. Тем более, что в конкретных системах местоопределения базовые технологии нередко подвергаются определенной модификации за счет совмещения нескольких технологий или добавления элементов других технологий местоопределения, например, угломерных систем. В этом случае, для повышения точности определения местоположения рассчитываются направления прихода сигналов сотовых телефонов. Один из примеров, когда угломерные системы позволяют существенно улучшить точность позиционирования, - это загородные трассы, где базовые станции часто находятся на одной линии вдоль дороги. Подобное расположение ячеек сотовой сети неудобно как для угломерных, так и для разностно-дальномерных систем. Однако комбинация этих технологий позволяет осуществлять точное местоопределение.

Для использования угломерных методов позиционирования на базовых станциях сети устанавливаются фазированные антенные решетки, а пеленгование источника сигнала осуществляется без внесения каких-либо модификаций в абонентское оборудование.

#### Примеры систем

Среди наиболее известных функционирующих или проходящих испытания систем местоопределения в сетях сотовой связи можно назвать:

- систему Cursor английской фирмы Cambridge Positioning Systems (CPS);
- систему Mobile Positioning System компании Ericsson;
- систему RadioCamera фирмы U.S.Wireless Corp.;
- систему персональной идентификации Personal Location System американской компании SnapTrack.

Система **Cursor** английской фирмы CPS использует технологию OTD. По данным проведенных летом 1999 г. фирмой CPS совместно с компанией Vodafone Airtouch и Ассоциацией автомобилистов испытаний точность определения местоположения составляет 125 м в 83 % случаев и 75 м в 51 % случаев. Компания CPS проводит работы по достижению средней точности местоопределения 50 м.

Для работы Cursor требуется установка у оператора дополнительного оборудования в соответствии с принципами технологии OTD (1 модуль LMU на 4 базовые станции) и незначительная модификация программного обеспечения мобильных телефонов, которая может быть достигнута перепрограммированием памяти базовых микросхем мобильного телефона. Принципиально Cursor может работать и с аппаратами, не оснащенными соответствующим программным обеспечением, но в этом случае погрешность местоопределения составляет около километра.

Компания CPS планирует развертывать системы Cursor в Великобритании, других странах Европы и Северной Америке. Компании Ericsson и Sie-

mens уже приобрели лицензию на технологию Cursor. Успешные испытания Cursor проведены в США GSM-оператором VoiceStream. Для продвижения своего продукта CPS заключила соглашение с компанией ARM, крупным поставщиком микросхем для мобильных телефонов ведущих производителей, о записи своего программного обеспечения в данные микросхемы.

Система **Mobile Positioning System (MPS)** компании Ericsson предназначена, в первую очередь, для операторов сотовых сетей стандарта GSM. Отработка системы, построенной, в основном, на базе технологии TOA, проводится совместно с крупнейшим шведским оператором - компанией Telia.

Функционирование MPS не затрагивает программного обеспечения абонентских терминалов. Кроме того, включение функций местоопределения не требует модификации инфраструктуры сети, если у оператора установлено коммутационное оборудование компании Ericsson, поскольку эти функции уже включены в версию GSM R.8 систем GSM данной компании.

Компании Ericsson и Telia утверждают, что в городских условиях с плотной установкой базовых станций система MPS позволяет достичь точности местоопределения в пределах 100-500 м, а в сельской местности, где расстояние между базовыми станциями значительно больше, - несколько километров.

Довольно необычную систему местоопределения подвижных абонентов на основе сетей сотовой связи под названием **RadioCamera** предлагает американская компания U.S.Wireless Corp. Работа системы RadioCamera по определению местоположения абонента с сотовым телефоном основана на измерении не только временных, но и амплитудных и фазовых параметров радиосигнала, а также характеристик его многолучевого распространения. Сигнал мобильного телефона достигает базовой станции, подвергаясь определенным искажениям и зачастую по нескольким маршрутам. Специальный контроллер, подключаемый к базовой станции, измеряет фазовые, временные и амплитудные характеристики радиосигнала телефона, принятого базовой станцией, получая набор параметров, который называют "радиоотпечатком" или "отпечатком пальцев" ("fingerprint"). После этого система RadioCamera анализирует уникальные характеристики сигнала, включая весь набор маршрутов его распространения, и вычисляет некоторый соответствующий конкретному радиоотпечатку условный код, именуемый в данной системе "сигнатурой". Эта сигнатура сравнивается со своей базой таких сигнатур, соответствующих разным вариантам расположения телефонов на местности, после чего идентифицируется положение абонента на местности.

К достоинствам системы следует отнести возможность определения местоположения по сигналу, принятому только одной базовой станцией. Тем са-

мым, не требуется прямой видимости нескольких базовых станций, что делает работу системы RadioCamera высокоэффективной в условиях плотной городской застройки, где, как правило, сосредоточено большинство абонентов сети сотовой связи.

Кроме этого, система RadioCamera хорошо интегрируется с существующей сетевой инфраструктурой и не требует модификации базовых станций и абонентских телефонов. Система является обучаемой, ее база данных автоматически начинает формироваться сразу после развертывания, при этом точность местоопределения постоянно повышается за счет накопления и уточнения информации о сигнатурах, соответствующих конкретным вариантам местонахождения абонентов.

В 1999 г. система RadioCamera успешно прошла семимесячные испытания в г. Балтимор (США) по обеспечению позиционирования абонентов с сотовыми телефонами стандарта AMPS в реальных условиях. Тестирование системы показало, что RadioCamera отвечает требованиям Федеральной комиссии по электросвязи США по точности определения местоположения. Предполагается, что система будет обслуживать абонентов не только сетей AMPS, но и CDMA.

Пожалуй, все-таки, большинство компаний, занимающихся развитием услуг местоопределения на основе сотовых сетей, в качестве базовой выбирает технологию A-GPS. Примером системы позиционирования данного типа является система персональной идентификации **Personal Location System** американской компании SnapTrack, которая одной из первых начала оказывать коммерческие услуги по местоопределению абонентов сетей сотовой связи.

Проведенные в Америке, Японии и Италии испытания системы показали, что точность местоопределения находится в пределах от 5 до 75 м (в сельских районах местоположение определяется с точностью до 4 – 5 м, а в условиях плотной городской застройки компании удалось достичь точности 37 м).

Технически система компании SnapTrack базируется на технологии A-GPS. Кроме того, для повышения точности определения местонахождения абонента в системе используются мощные серверы со специализированным программным обеспечением, решающие задачи цифровой обработки данных путем использования дифференциального режима работы и учета большого числа поправок, снижающих влияние многолучевости и других искажений сигналов.

Компания SnapTrack активно работает над снижением стоимости мобильных телефонов с GPS-приемниками и увеличения продолжительности работы без перезарядки аккумуляторов. Для этого разработано программное обеспечение, позволяющее инфраструктуре сети передавать мобильным телефонам, запрашивающим информацию позиционирования, данные о том, какие спутники следует искать. Таким образом, если традиционные приемники GPS

постоянно ведут обработку информации, поступающей от спутников, то в системе Personal Location System они работают только непосредственно при определении местоположения. За счет “подсказки” достигается резкое сокращение длительности начальной установки GPS-приемника, в результате чего значительно снижается потребляемая мощность и уменьшается время позиционирования.

SnapTrack заключила стратегические соглашения с компаниями Motorola и Texas Instruments, которые позволяют реализовать большую часть программного обеспечения по обработке информации, поступающей от спутников, непосредственно на цифровом процессоре обработки сигналов, встроенном в телефон. Тем самым достигается уменьшение аппаратных ресурсов, которые необходимо добавить в цифровой радиотелефон. По оценкам специалистов компании, стоимость дополнительных аппаратных узлов составляет \$5 – 10 и может быть еще снижена при массовом производстве.

Недавно компания SnapTrack была приобретена корпорацией Qualcomm за \$1 млрд. Qualcomm стремится развивать навигационный сервис на базе своего сотового стандарта CDMA. Представленный сейчас последний вариант технологии, названный SnapSmart, позволяет определять местоположение абонента с большой точностью не только на плоскости, но и по вертикали, что является очень важным для многоэтажных городских зданий. В частности, во время испытаний в Японии система фирмы SnapTrack четко определяла местонахождение абонентов в высотных зданиях в деловой части города. Может быть, именно поэтому компания NTT DoCoMo – крупнейший оператор мобильной связи Японии – выбрала Personal Location System в качестве основы для построения навигационной системы для абонентов своих сетей.

Среди других известных систем местоопределения можно назвать систему позиционирования Sigma-5000 компании SigmaOne Communications Corp. Эта система использует сразу два метода измерений: наряду с разностно-дальномерным методом применен угломерный принцип позиционирования абонента с сотовым телефоном. В дополнение к этому в системе используется запатентованная SigmaOne технология определения положения PowerBoost, включающая специализированные алгоритмы учета многолучевости. Sigma-5000 обеспечивает местоопределение в сотовых сетях стандартов AMPS и TDMA. Испытания системы Sigma-5000 на реальной сети показали во всей рабочей зоне результирующую погрешность не хуже 105 м для 67% случаев и точность лучше 150 м для 95% отсчетов.

Система Sigma-5000 выполняется как независимое дополнение к инфраструктуре сотовой сети и не требует никаких модификаций радиointерфейса, сотовых телефонов или оборудования сотовой сети. Для реализации угломерной технологии используются специально разработанные фазированные антенные решетки, устанавливаемые на базовых станциях.



Аналогичная комбинация технологий реализована и в системе Geometrix, разработанной компанией Allen Telecom Inc. Данная система может работать с сетями сотовой связи стандартов AMPS, TDMA, CDMA, TDMA/AMPS, CDMA/AMPS и транкинговой системой iDEN компании Motorola. В большинстве случаев Geometrix удовлетворяет требованиям по точности Федеральной комиссии по электросвязи США, используя только разностно-дальномерные методы, однако в ряде случаев дополнение системы угломерными методами измерения приносит существенное повышение точности местоопределения.

Компания Benefon на основе уже упоминавшихся мобильных телефонов Benefon Track Pro и Benefon Esc с встроенными GPS-приемниками разработала систему позиционирования, базирующуюся на технологии A-GPS и усовершенствованных методах Cell-ID. «Изюминкой» системы является телематический протокол для мобильных телефонов *Mobile Phone Telematics Protocol* (MPTP), который позволяет передавать широкий спектр информации о местоположении и перемещении, а также прикладных данных между сервером приложения и телефоном.

#### 4.3 Позиционирование подвижных объектов на основе спутниковых навигационных систем

В данном подразделе рассматриваются системы местоопределения, использующие методы спутниковой радионавигации. Материал составлен на основе информационных материалов фирм-производителей (технических описаний, рекламных проспектов и т.п.), поэтому глубина и степень подробности напрямую зависят от того, насколько подробны были представленные материалы. Авторы заранее приносят извинения тем юридическим и физическим лицам, которые сочтут описание их продуктов не вполне точным, и готов к любым формам сотрудничества с ними для восстановления истины. Авторы также далеки от мысли, что в данном подразделе рассмотрены все системы, представленные в настоящее время на рынке.

Сегодня оборудование спутниковых навигационных систем является высокотехнологичным, легко интегрируется с другими видами технического и программного обеспечения. Это позволяет даже небольшим фирмам, имеющим опыт работы с оборудованием подвижной связи и геоинформационным программным обеспечением для персональных компьютеров, браться за создание систем диспетчерского наблюдения за автомобилями, добиваясь определенной степени коммерческого успеха. В простейшем случае структура подобной системы выглядит так:

- на автомобиле устанавливается навигационный приемник, работающий по сигналам CPHC GPS NAVSTAR (в виде OEM-оборудования этот

приемник стоит 150–300 долларов), который через интерфейс RS232 подключается к модему любительской пакетной радиосвязи стандарта TNC-2 (до 200 долларов). Через аудиоинтерфейс модем подключается к произвольной автомобильной радиостанции УКВ диапазона (до 400 долларов), работающей в режиме Conventional Radio;

- в диспетчерском центре работает персональный компьютер, на котором установлены ГИС-пакет MapInfo, отсканированная растровая карта и приложение, написанное на MapBasic, обеспечивающее визуализацию текущего местоположения подвижного объекта на фоне карты;
- к диспетчерскому компьютеру подключается радиомодем (аналогичный тому, что установлен на борту) и радиостанция с антенной.

Несмотря на кажущуюся простоту, подобные системы в ряде случаев могут достаточно эффективно выполнять свои функции. Вместе с тем, для подобной системы свойственны некоторые существенные ограничения, не позволяющие использовать ее для серьезных применений. Во-первых, это неэффективное использование радиочастотного спектра (режим Conventional Radio на выделенных частотах, «перегруженность» протокола AX25, применяемого в пакетных радиомодемах, реализация защиты от ошибок только путем переспроса, низкая скорость передачи данных за счет использования полосы речевого канала и как следствие всего этого — низкая пропускная способность системы). Во-вторых, сложность организации радиопокрытия большой территории. Предусмотренный протоколом AX25 режим передачи через ретрансляторы с повтором (диджитеры) может эффективно работать только вдоль протяженных трасс. В-третьих, полная незащищенность системы от постороннего проникновения — как с целью перехвата данных, так и с целью несанкционированного использования инфраструктуры сети передачи данных. Реально подобная система может обеспечить контроль местоположения 10–20 автомашин с периодом обновления информации 1–5 минут для каждой автомашины.

Использование мобильных систем связи оправдано в случаях, когда необходимо снизить габариты бортовой аппаратуры, уровень собственных электромагнитных излучений (и соответственно потребляемую аппаратурой мощность от бортовой или автономного источника электропитания), а также когда нужно обеспечить большую площадь действия системы. С этой точки зрения сотовые системы перекрывают область действия систем ближнего действия (городские, региональные) и систем глобального действия (благодаря национальному и международному роумингу). В то же время благодаря небольшим размерам и большой площади действия аппаратура на базе сотовых систем может успешно применяться в системах комплексной охраны автомашин VIP-класса как альтернатива системам, работающим на зонавых принципах (радиомаяковые системы типа Lo Jack и KOP3).

В заключение несколько слов о стоимости систем. Следует отметить, что относительно дешевой может быть только система с ограниченными возможностями: для оперативного слежения за ограниченным парком машин (до 30) на ограниченной территории (определяемой зоной действия радиостанции диспетчерского центра). Для такой системы можно сказать, что ее стоимость является простой суммой стоимости абонентского и центрального оборудования или линейно зависит от стоимости своих составных частей. Для более сложных систем зависимость стоимости системы от стоимости ее составляющих в течение полного цикла ее эксплуатации является нелинейной. Более дешевое бортовое оборудование и оборудование системы связи может впоследствии обернуться необходимостью вложить большие средства в получение или аренду ресурсов радиочастотного спектра, создание собственной инфраструктуры связи (сети базовых станций, ретрансляторов, каналов связи между базовыми станциями). В ряде случаев может оказаться выгодно оплачивать тарифы транкинговых или сотовых систем общего пользования, несмотря на кажущуюся их дороговизну. Маркетинговые исследования некоторых зарубежных фирм в отношении стоимости оборудования и оплаты услуг пользователей систем (например, владельцев дорогих автомобилей или перевозчиков грузов) показывают, что общие расходы абонентов систем не должны превышать 4-5% от стоимости их имущества. Украинские производители систем местоопределения оценивают стоимость бортового оборудования для диспетчерских систем и систем обеспечения безопасности автомобиля в диапазоне от 1000 до 2000 долларов. При этом стоимость программного обеспечения диспетчерского центра с электронной картой может варьироваться в пределах от 2000 до 50000 долларов (в зависимости от выполняемых функций, числа объектов контроля, используемой системы связи). Стоимость оплаты аренды каналов связи или оплаты услуг сетей связи общего пользования составляет от \$50 до 200 в месяц для одного транспортного средства.

#### 4.4 Практические применения технологий позиционирования в сетях мобильной связи

Как уже было сказано, основной движущей силой развития услуг позиционирования стала необходимость *автоматического определения местоположения абонента сотовой сети при оказании экстренной помощи*. Достаточно сказать, что служба 911 в США получает около 100 тыс. звонков с мобильных телефонов ежедневно и пока еще не имеет полноценной возможности точного определения местоположения клиента. Именно с целью устранения этого недостатка и было выпущено пресловутое распоряжение Федеральной комиссии по электросвязи США.

Часто в экстренных ситуациях человек не может четко определить и сообщить свое местонахождение. Причем это касается не только служб спасения, но и служб оказания *технической помощи на дорогах*. Проведенные в Великобритании исследования показали, что более половины водителей автомобилей заинтересованы в услуге автоматического определения своих координат для возможности получения технической помощи. Поэтому услуги позиционирования в сетях сотовой связи считаются одним из важнейших средств привлечения новых абонентов.

*Навигационные услуги* – одно из наиболее перспективных направлений применения систем местоопределения подвижных объектов. Разнообразные путеводители, услуги по предоставлению информации об определенном маршруте и об условиях движения по данному маршруту весьма актуальны для водителей транспортных средств и также могут привлечь потенциальных абонентов сотовых сетей.

Например, компания Citikey еще в 1999 г. ввела в эксплуатацию мобильный путеводитель в Стокгольме под названием “город у вас на ладони”. Абоненты имеют возможность определить свое местоположение по карте города, а затем запросить информацию о ближайших ресторанах, гостиницах, театрах или других объектах.

В качестве одного из приложений своей системы RadioCamera компания U.S.Wireless Corp. планирует предоставление водителям информации о пробках на дорогах. Для этого берется под контроль некоторое количество сотовых телефонов абонентов, находящихся на различных участках той или иной магистрали. Не составляет труда в течение некоторого времени определить направление и скорость движения абонентов. Если средняя скорость нескольких абонентов с сотовыми телефонами на одном и том же участке ниже 10 км, то с большой вероятностью можно утверждать, что там пробка. А если телефоны не перемещаются в течение длительного времени – на этом участке трассы скорее всего произошла авария.

Другим не менее перспективным направлением является создание *систем управления автотранспортом или персоналом компаний*. Это могут быть системы диспетчеризации общественного или специального автотранспорта, слежения за перемещением особо важных грузов или людей, автомобильные охранные системы и т.д.

Внедрение средств местоопределения в сотовые сети означает, что зона контроля охватывает всю территорию обслуживания сети, а зачастую это могут быть целые регионы. Поэтому транспортные компании, заинтересованные в услугах местоопределения, нередко делают выбор в пользу инфраструктуры уже развернутых сотовых сетей для передачи информации о местоположении транспортных средств по отношению к построе-



нию собственных сетей корпоративной транкинговой радиосвязи. Это в очередной раз говорит о внедрении сотовой связи в сектор профессиональной радиосвязи.

В [128] приведен обзор зарубежных разработок в этой области, описаны основные компоненты систем диспетчеризации. В Украине СП «ИТС» – оператор сети связи «CDMA Украина», «РКС» и ООО «Тессарт Украина» развернули автоматическую систему диспетчерского управления пассажирским транспортом Киева [127]. Разработанная система может применяться не только для автоматизированного диспетчерского управления пассажирским транспортом, но и для банковских инкассаторских служб, государственных и негосударственных служб охраны, «Скорой помощи» и т.д.

Автоматическое местоопределение сотовых телефонов предоставляет новые возможности по *установлению специальных тарифов* при использовании мобильной связи в зависимости от местонахождения. Например, для привлечения абонентов может использоваться т.н. метод «домашней зоны», когда клиенту предоставляется несколько минут бесплатного времени для переговоров по мобильному телефону, что может оказаться удобнее, чем использование стационарного телефона. Возможно также снижение тарифов при переговорах в деловых или торговых районах города.

По оценкам экспертов, большой коммерческий потенциал для сетей сотовой связи заключен в предоставлении возможности *контроля за местонахождением детей*, эти услуги получили название семейных.

Например, проект компании Siemens, осуществляемый в рамках единой стратегии развития услуг подвижной связи департамента «Мобильные сети связи и передачи информации», призван организовать непрерывный контакт между детьми и родителями. Благодаря применению внедряемой системы, родители при помощи мобильного телефона смогут в любую минуту узнать, где находится их ребенок.

Услуги местоопределения могут иметь самые разнообразные приложения. Например, в Стокгольме функционирует служба, позволяющая знакомиться при помощи сотового телефона, причем знакомиться именно в том районе, где вы находитесь. А компании Benefon и Vitaphone предлагают новую *телематическую медицинскую систему Cardiophone*, которую они продемонстрировали на последней медицинской выставке в Дюссельдорфе. Технической основой системы являются сотовые телефоны Benefon Track, модифицированные для использования в системе оказания медицинской помощи. Аппарат может использоваться как обычный телефон, однако в рамках системы Cardiophone его основная функция состоит в регистрации электрокардиограммы (ЭКГ) его обладателя, для чего достаточно приложить телефон тыльной стороной к левой стороне груди. После снятия ЭКГ вместе с координатами, полученными от GPS, данные по каналам сети GSM пересылаются в медицинский центр Vi-

tarphone, где дежурные врачи анализируют полученную информацию, определяют диагноз и принимают решение о необходимых мерах помощи. Компания Vitaphone уже проводит испытания первой партии аппаратов, выпущенных корпорацией Benefon. Общая сумма первоначального контракта составляет 22 млн. евро.

Эксперты утверждают, что услуги позиционирования в сотовых сетях имеют большое будущее. Наиболее тщательные прогнозные исследования предполагаемого рынка данного сервиса, на которые ссылается большинство экспертов, были проведены исследовательским центром компании Ovum.

По оценкам Ovum, к 2005 г., когда системы местоопределения станут стандартным приложением в сетях сотовой связи, в США будет 129 млн., а в Западной Европе - 188 млн. абонентов, пользующихся услугами позиционирования. По тем же оценкам, рынок автомобильных средств местоопределения в США будет составлять 3,3 млн. личных автомобилей (в Западной Европе – 8 млн.) и 3,8 млн. автомашин транспортных компаний (в Западной Европе – 1,9 млн.). Общий объем мирового рынка, по прогнозам Ovum, в 2005 г. будет составлять \$9,75 млрд. при количестве в 376 млн. абонентов.

Похуже оценки дают эксперты из компании Consultants Strategis, которые предполагают, что чуть раньше, в 2004 г., мировой объем услуг по определению местонахождения составит около \$4 млрд.

По данным *The Nikkei Business Daily*, услуги, основанные на технологии определения местонахождения абонента набирают популярность благодаря технологиям Java и BREW, считают специалисты компании SiRF Technology Inc, занимающейся производством GPS-чипов. По их словам, услуги, основанные на определении местоположения звонящего абонента, ранее разрабатывавшиеся для разнообразных платформ, требовавших собственных терминалов (автомобильные навигационные системы, карты для путешественников и т.д.), теперь могут быть ориентированы на стандартную платформу (Java или конкурирующая с ней технология BREW) для мобильных телефонов, что существенно увеличит пользовательскую базу данного вида услуг. Кроме того разработчики получают возможность создавать приложения с дополнительными функциями, например, SiRF предложил технологию «динамической навигации», посредством которой уменьшается расход энергии мобильного телефона и соответственно продлевается время работы аккумуляторов при регистрации телефона в базовых станциях при движении абонента в автомобиле или поезде.

В марте 2003 года оператор спутниковой телефонии Globalstar на базе этой технологии представил в США услугу по мониторингу перемещения автомобилей и других объектов. Для работы с ней необходим симплексный модем размером с ладонь, разработанный Globalstar вместе с AeroAstro Inc. Сейчас в сети пока порядка 400 модемов, которые тестируются на контейнерах с различными грузами. Устройства посылают данные регулярно через установ-

ленный интервал и отдельно - в случае возникновения события, на которое стоит прерывание.

Однако в Ираке спутниковые GPS- устройства в руках репортера – угроза антииракской коалиции, считают американские эксперты. Поэтому у репортеров, движущихся с частями антииракской коалиции, военные стали изымать спутниковые телефоны с GPS-приемниками - возникло подозрение, что благодаря им может быть обнаружено местоположение частей войск оккупантов.

Журналистам, которым было позволено вести репортажи из передовых частей американских и британских вооруженных сил, победно марширующих по тоталитарному Ираку, предложено отказаться от использования спутниковых телефонов. Пока запрет касается тех из них, кто работает с компанией *Thuraya Satellite Telecommunications* - поставщиком услуг спутниковой связи, базирующейся в эмирате Абу-Даби. Ограничения введены только для репортеров, которые находятся в передовых частях войск, и - как ожидается - будут носить временный характер. Армейское командование предложило владельцам неудобных аппаратов пользоваться телефонами своих коллег, абонентов спутниковой связи других провайдеров, а также обещало предоставлять для передачи информации стандартные армейские средства связи. Кроме того, на передовые позиции будет доставлено “чистое” оборудование спутниковой связи.

Ричард Лэнгли (Richard Langley), эксперт в области GPS из университета Нью-Брунсвика (Канада), полагает, что, по всей видимости, в министерстве обороны США осознали, что информация о положении абонента спутникового телефона Thuraya может быть передана вместе с полезным сигналом, перехвачена иракскими силами и тут же использована ими - в антигуманных целях, для нанесения ударов по освободителям. Правда, подчеркнул он, хотя это и возможно теоретически, на практике такой перехват - дело весьма непростое. Антенна спутникового телефона имеет относительно узкую диаграмму направленности и ориентирована на спутник, и перехватить его сигнал с земли чрезвычайно сложно, тем более в боевой обстановке.

Гораздо проще сделать это уже вблизи приемной антенны компании-оператора. Но и в этом случае перехваченный сигнал еще придется расшифровать.

Возможно также, что американцев обеспокоила перспектива возможного взлома компьютеров, в которых хранится информация о звонках. Правда, для военных эта информация ценна до тех пор, пока абонент не покинул место, откуда был сделан последний звонок. Так что гипотетическим иракским хакерам нужно действовать быстро.

Телефоны компании Thuraya могут работать как обычные сотовые телефоны стандарта GSM, если находятся в пределах зоны покрытия, и как спутниковые - в более удаленных районах. Кроме того, телефон можно использовать и как обычный GPS-приемник. Если режим GPS-позиционирования вклю-

чен, информацию о текущих координатах звонящего можно автоматически передавать собеседнику через спутник связи. В Украине услуги спутниковой системы Thuraya предоставляет компания “Турая Украина”.

В Украине дело пока не дошло до полномасштабных испытаний, а тем более опытной эксплуатации систем местоопределения в сетях сотовой связи. Вместе с тем, ряд фирм уже предлагает свои продукты, направленные на развитие услуг позиционирования на основе систем мобильной связи. Следует отметить, что большинство разработчиков ориентируется на технологию A-GPS, т.к. в Украине имеется достаточный задел по системам местоопределения на базе спутниковой радионавигации, где в качестве транспортной среды выступают конвенциональные и транкинговые сети УКВ-радиосвязи или глобальные спутниковые системы.

#### 4.5 Технологии позиционирования следующего поколения

После иракской кампании военные разработчики многих стран очень пристальное внимание уделяют вопросам совершенствования систем позиционирования. Как известно, во время этих событий американские военные обеспечили повышенную точность GPS-позиционирования.

Фактически была достигнута точность работы системы в пределах трёх метров, тогда как в обычном режиме допуск составляет примерно шестнадцать метров. Повышения точности удалось добиться путём постоянного контроля за спутниками, отвечающими за ближневосточный регион. Вокруг земли обращаются 24 GPS-спутника, объединённых в группы по шесть штук. Группы движутся по орбитам, покрывая, в зависимости от времени суток, тот или иной регион земной поверхности. Когда какая-либо группа спутников оказывалась над Ближним Востоком, наземные станции на Азорских островах в Атлантике и на острове Диего-Гарсия в Тихом Океане производили загрузку информации в память спутников. Загружались так называемые “эфемериды” (точные координаты спутников) и прочие данные, повышающие точность позиционирования. Усилиями Второй космической эскадрильи ВВС США, расквартированной на авиабазе Шривер в штате Колорадо, точность GPS-систем в районе Багдада достигала 2,66 м.

В ближайшее время планируется новое усовершенствование системы GPS в военных целях — применение новых антенн, которые невосприимчивы к сигналам “глушилок”. Хотя в последней войне и не было отмечено случаев интерференции сигналов GPS-оборудования и станций радиоподавления, военные занялись этим вопросом. Новые антенны, разрабатываемые в компании Legospace, будут использовать адаптивные алгоритмы для выделения GPS-сигналов из шума “глушилок”. Другая перспективная разработка - **многолучевые антенны**, автоматически находящие сигнал с каждого спутника в группе.



В настоящее время собственная спутниковая навигационная система имеется только у США. Она включает в себя 24 действующих спутника и используется как в военных, так и в гражданских целях.

26 мая 2003 года правительства европейских стран приняли решение о начале долгосрочной спутниковой **программы Галлилео**, которая рассматривается как конкурент американской системы GPS. Европейская система «Galileo», в отличие от американской GPS, будет абсолютно гражданского направления.

В распространенном Европейским космическим агентством (ЕКА) заявлении говорится, что соглашение, достигнутое между странами-участниками - Норвегией, Швейцарией и 15 государствами Европейского Союза, не считая Грецию и Люксембург - окончательно закрепляет условия их участия в проекте.

Система Галлилео, основой которой станут 30 спутников, размещаемых на трех круговых орбитах, потребует создания около 140 тысяч рабочих мест. Стендовые испытания глобальной спутниковой навигационной системы Galileo запланированы на 2005 г. Представители США уже подвергли критике планы по созданию системы, назвав ее излишней. Однако, многие мировые эксперты поддерживают принятые шаги.

По заявлениям ЕКА, система Галлилео, которая, как планируется, начнет работу к 2008 году, будет гражданской системой и послужит дополнением к существующей американской системе GPS.

“Европейское Космическое Агентство сейчас имеет возможность окончательно определить условия участия стран в программе по созданию навигационной системы Галлилео и одобрить документ об учреждении совместного предприятия, который будет вскоре подписан между ЕКА и Европейским Союзом”, - говорится в заявлении.

Представители ЕС заявили, что программа Галлилео имеет большое значение для европейской космической промышленности. Ожидается, что она позволит предоставлять услуги по глобальному определению местоположения для нужд транспорта, безопасности и досуга.

Проект неоднократно задерживался, сначала из-за скептического отношения со стороны Великобритании, Германии и Нидерландов к необходимости создания системы, а затем из-за споров между странами-участниками ЕКА. Напомним, что ЕКА является не зависимой от ЕС организацией, которая координирует европейские космические программы. В прошлом году проект застопорился из-за борьбы за влияние между Италией и Германией. Затем Испания выступила против соглашения между Италией и Германией, так как оно, по словам испанцев, занижало роль Испании в проекте.

“Сознавая экономическую, промышленную и стратегическую важность спутниковой навигации, страны-участники достигли соглашения во имя об-

щего блага”, - написал в заявлении Генеральный Директор ЕКА Антонио Родота.

Так называемое совместное предприятие Галлилео, штаб-квартира которого будет располагаться в Брюсселе, теперь возьмет на себя разработку и утверждение проекта, а также подготовку системы к развертыванию и эксплуатации.

При этом для испытаний аппаратуры этой навигационной системы будут использоваться российские спутники “Глонасс-М”. В дальнейшем не исключено постепенное объединение ресурсов ГЛОНАСС и Galileo.

Украина планирует присоединиться к европейскому проекту создания глобальной спутниковой навигационной системы Galileo, сообщила в марте этого года пресс-служба Национального космического агентства Украины (НКАУ, г.Киев). Данная перспектива обсуждалась на встрече вице-премьера Украины Андрея Клюева и гендиректора Гендиректората Еврокомиссии по вопросам транспорта и энергетики Франсуа Ламурьо. В частности, они договорились о начале переговоров о получении ассоциированного членства Украины в программе Galileo. Стороны также предварительно договорились о проведении консультаций по данному вопросу в 2004 г. в Киеве.

В 2004 году Россия, в основном, завершит строительство собственной системы глобальной спутниковой навигации ГЛОНАСС. В четвертом квартале будут запущены три навигационных спутника “Ураган”. Это позволит стране к 2005 году иметь на орбите полноценную группировку системы ГЛОНАСС в составе 16-18 аппаратов.

По словам представителей Росавиакосмоса, система ГЛОНАСС позволит непрерывно определять координаты воздушных, морских, наземных и космических объектов с точностью до одного метра. Введение в строй полноценной системы глобальной навигации считается одной из важных составляющих эффективного обеспечения обороноспособности России и защиты ее национальных интересов.

Два “Урагана” и один аппарат нового поколения “Ураган-М” с семилетним рабочим ресурсом будут отправлены на геостационарную орбиту ракетопосителем тяжелого класса “Протон”. Между тем, указали в Росавиакосмосе, в этом же году начнутся испытания преемника “Урагана-М” - перспективного малогабаритного спутника “Ураган-К”, способного проработать на орбите свыше десяти лет.

**Китай также планирует развернуть собственную систему спутниковой навигации**, причём пробные спутники уже запущены без согласования с Международным союзом связи (International Telecommunications Union). Считается, что китайская система навигации будет работать в том же диапазоне, что и американская GPS и европейская Galileo. Кстати, Европейский со-

юз выступил недавно с требованием, чтобы американские самолёты, находясь в воздушном пространстве Европы, пользовались для навигации исключительно данными Galileo.

24 мая 2003 года китайская ракета-носитель “Чанчжэн-3А” (“Великий Поход”) успешно вывела на орбиту последний элемент спутниковой навигационной системы, которая даст пользователям возможность с высокой точностью определять свои координаты (в том числе, высоту).

Трехступенчатая ракета-носитель “Чанчжэн-3А”, стартовавшая с космодрома Сичхан в провинции Сычуань 24 мая (в 16.34 по Гринвичу), вывела третий навигационный спутник “Бэйдоу” (“Путеводная звезда”). Через 20 минут после старта спутник был выведен на промежуточную геосинхронную орбиту, сообщило агентство «Синьхуа». Новый спутник пополнит орбитальный сегмент китайской национальной системы позиционирования, в которую входят два аналогичных спутника, запущенных еще в конце 2000 года. Вскоре спутник “Бэйдоу-3” будет переведен на рабочую круговую геостационарную орбиту. По окончании тестирования систем спутника он приступит к работе.

По данным «Синьхуа», китайская система спутникового позиционирования найдет применение в самых различных областях народного хозяйства - на транспорте, в метеорологии, планировании природоохранных мероприятий, службах быстрого реагирования, а также в телекоммуникационной сфере. При этом спутники позволят получать информацию о координатах пользователя по широте, долготе и по высоте. Западные аналитики полагают, что китайские военные также не преминут воспользоваться новой системой. В частности, у Китая появится возможность высокоточного наведения боеприпасов на цель по сигналам со спутника - аналогично тому, как совсем недавно это делали американцы в Ираке, Афганистане и Югославии. Судя по данным об орбите спутника, китайская навигационная система не является глобальной и не будет функционировать, как минимум, в высоких широтах.



Для Китая новый запуск стал уже 28-м подряд успешным стартом ракеты-носителя “Великий поход”, начиная с 1996 года. Во всемирном масштабе это 21-й запуск ракеты-носителя в 2004 году.

В свою очередь США приступили к **разработке принципиально новой космической навигационной системы**. Предполагается, что в ней орбитальный сегмент из высокоорбитальных искусственных спутников Земли, как в уже существующих американской NAVSTAR и российской ГЛОНАСС, будет отсутствовать в принципе — его роль будут выполнять высокостабильные сигналы рентгеновских пульсаров. Это должно резко повысить надежность космических систем Пентагона.

Агентство передовых оборонных проектов США начало разработку системы мгновенного позиционирования для спутников, в которой в качестве источников сигналов будет использоваться рентгеновское излучение пульсаров. Разработка ведется в рамках **программы XNAV** (X-ray Source-based Navigation for Autonomous Position Determination), известна также под названием «сеть пульсаров» (Pulsar Network). Об этом сообщил в середине августа 2004 года директор агентства Тони Тетер (Tony Tether) на конференции Small Satellites: Complimentary or Disruptive Technology, прошедшей в университете штата Юта. Напомнив, что в GPS-аппаратуре используется специальный параметр Dilution of Precision, характеризующий потерю точности GPS-приемника вследствие геометрического фактора, он отметил, что в случае с пульсарами с этим «проблем не будет». «Прежде всего надо сказать, что имеется множество пульсаров, — отметил он. — Что еще предстоит сделать — это описать их характеристики. Их сигналами можно будет пользоваться где угодно в Солнечной системе... это отличный способ навигации в пространстве».

В рамках программы XNAV Пентагон планирует изучить возможность разработки системы автономного определения местоположения и ориентации своих космических средств, а также временной их синхронизации по рентгеновскому излучению астрономических объектов — пульсаров. Система XNAV позволит использовать ротационные и аккреционные пульсары для решения навигационных задач спутников на низкой околоземной орбите (LEO), геосинхронной (GEO), орбитах с большим эксцентриситетом (HEO), а также межпланетных космических аппаратов. Строго говоря, излучение звезд (в оптическом диапазоне) используется в системах ориентации космических аппаратов (в так называемых «звездных датчиках») уже давно, однако в данном случае планируется использовать их также и для определения местоположения аппарата и контроля часов. В спецификациях системы указывается, что апертура детектора рентгеновского диапазона должна быть менее 1 мЛ, поле зрения — 60х60 угловых минут, временное разрешение — менее 10 наносекунд, энергетическое разрешение в диапазоне 0,1 — 20 кЭв — не хуже 150 эВ.

Создание системы XNAV позволит резко повысить надежность навигационных систем военных спутников, поскольку они перестают зависеть от работоспособности спутников GPS. Потенциальный противник, в принципе, может вывести их из строя, уничтожить, либо заблокировать посылаемые ими радиосигналы. Еще одно преимущество подобной навигационной системы — ею можно пользоваться не только в околоземном космическом пространстве, но и в любой точке Солнечной системы. Более того, новая система координат уже не будет геоцентрической.



## Глава 5. Маршрутизация в сетях связи с подвижными объектами

В последние годы наблюдается быстрый рост цифровых сетей подвижной связи. Мобильность становится новым стимулом для дальнейших исследований в компьютерных сетях. Зрелость беспроводных технологий и массовость портативных компьютеров делают возможным реализацию мечты – «связь в любом месте и в любое время».

В настоящее время известны две основные архитектуры построения радиосетей: фиксированная и динамическая. Фиксированная строится в соответствии с сотовым принципом организации связи, согласно которому зона обслуживания делится на ячейки (соты). В каждой ячейке находится базовая станция, обслуживающая все подвижные станции (абонентские радиотерминалы) в пределах своей ячейки. При перемещении абонента из одной ячейки в другую происходит передача его обслуживания от одной базовой станции к другой.

Целью статьи является рассмотрение динамической архитектуры построения сетей радиосвязи, которая не имеет базовых станций и фиксированных маршрутов передачи информации. Все узлы (хосты) сети мобильны и обмениваются информацией непосредственно между собой (или применяют ретрансляцию передаваемых пакетов) по мере необходимости. Под узлом сети понимается радиотерминал с функциями маршрутизатора или переносной компьютер, оснащенный маршрутизатором и приемопередатчиком. Примерами применения таких сетей могут служить сети радиосвязи создаваемые в условиях чрезвычайных ситуаций (наводнение, авария, землетрясения и т.п.) (рис.5.1), при обмене информацией во время проведения различных конференций (рис. 5.2), а также для организации системы обмена информацией в армейских подразделениях (особенно в тактическом звене управления).

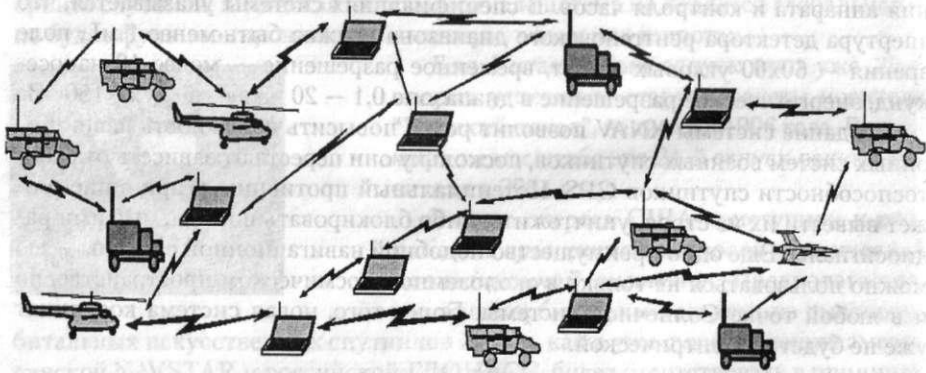


Рис. 5.1. Пример создаваемой радиосети в условиях чрезвычайной ситуации

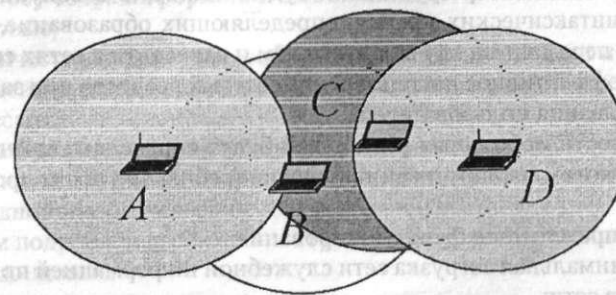


Рис.5.2. Пример радиосети во время проведения конференций

Данные сети характеризуются следующими основными особенностями:

- динамической топологиею: узлы сети мобильны, подвержены отказам (уничтожению); каналы нестабильны и имеют ограниченную дальность связи и пропускную способность, зависящие от характера местности, мощности передатчика, протокола доступа к каналу, величины затухания сигнала, помех и т.п.;
- ограниченной энергетической возможностью некоторых узлов вследствие использования аккумуляторных батарей;
- ограниченной засекреченностью (из-за самой природы радиоканала);
- значительной размерностью (десятки и сотни узлов).

Начало работ по исследованию протоколов в данных сетях положил в 70-80-е годы проект DAPRA PRNET (Defense Advanced Research Project Agency Packet Radio Networks) [90]. В настоящее время многочисленные протоколы разработаны рабочей исследовательской группой IETF (Internet Engineering Task Force) [91] для сетей MANET (Mobile Ad Hoc Networks). Целью данной рабочей группы является стандартизация протоколов маршрутизации, которые, используя традиционные IP сервисы, обеспечивали эффективную маршрутизацию в мобильных радиосетях с динамической топологией. В ближайшее время планируется внедрение протокола IPv6, который позволит создать в Internet гибкую и масштабируемую структуру маршрутизации за счет иерархической адресации. Однако, до конца не решенной остается проблема создания эффективных протоколов маршрутизации IP пакетов мобильных хостов в сетях Internet, т.к. существующие протоколы (включая IP, Netware IPX, ISO CLNP, AppleTalk) не поддерживают мобильные хосты.

В статье предлагается провести анализ современного состояния протоколов маршрутизации в мобильных радиосетях (сетях MANET) и определить направления дальнейших исследований.

Под протоколом маршрутизации будем понимать совокупность семантических и синтаксических правил, определяющих образование, поддержание маршрутов передачи между отправителем и адресатом в сетях связи и обеспечивающих эффективное использование сетевых ресурсов при заданном качестве обслуживания пользователей.

Особенности мобильных радиосетей будут определять ключевые требования к протоколам маршрутизации (многие требования носят противоречивый характер):

- распределенное функционирование;
- минимальная загрузка сети служебной информацией при реакциях на изменения в сети;
- отсутствие заикливания маршрутов;
- быстрая сходимость;
- получение маршрута по мере необходимости;
- обеспечение нескольких маршрутов доставки информации к адресату;
- обеспечение режима «молчания» в случае необходимости;
- поддержка однонаправленных каналов.

В целом, основными вопросами, которые должны быть решены при разработке протоколов маршрутизации являются: «какую информацию собирать о состоянии сети?», «как часто?», «каким образом?», «в каком виде ее хранить?» и «как использовать?».

Поэтому все протоколы маршрутизации, предложенные для применения в мобильных радиосетях, можно классифицировать по следующим признакам (рис.5.3):

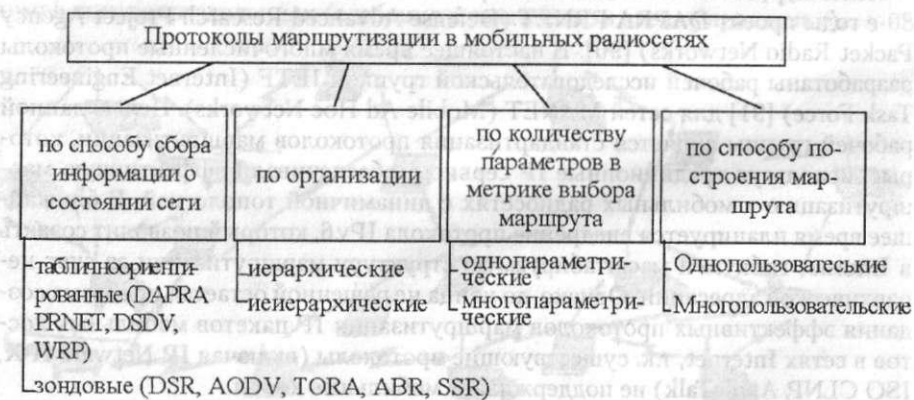


Рис.5.3. Классификация применяемых в мобильных радиосетях протоколов маршрутизации

- по способу сбора информации о состоянии сети: таблично-ориентированные и зондовые;
- по количеству параметров, собираемых о состоянии сети и участвующих при принятии решения о выборе маршрута: однопараметрические и многопараметрические;
- по организации: иерархические и неиерархические;
- по наличию групповых маршрутов передачи: многопользовательские (multicast) и однопользовательские.

Рассмотрим подробнее две основные группы протоколов: таблично-ориентированные и зондовые.

### 5.1 Таблично-ориентированные протоколы

Данный класс протоколов реализован на основе распределенной версии алгоритма Беллмана-Форда [92] (алгоритм вектора-расстояний, Distance Vector Algorithms, DVA), который изначально был реализован в сети ARPANET, а сегодня в виде версии RIP (Routing Internet Protocol) функционирует в Internet.

Представителями данного класса протоколов в мобильных радиосетях являются DAPRA PRNET, DSDV, WRP протоколы.

Данные протоколы предполагают ведение каждым узлом одной или нескольких таблиц, хранящих информацию о маршрутах доставки информации по всем адресатам сети. Всегда присутствует основная таблица – маршрутная. Рассмотрим ее содержание на примере протокола маршрутизации сети **DAPRA PRNET** [90]. Каждый маршрут хранится в виде отдельного входа: адресат ( $j$ ), следующий узел ( $K_j$ ) в маршруте передачи к адресату и стоимость маршрута ( $D_j$ ) (рис. 5.4).

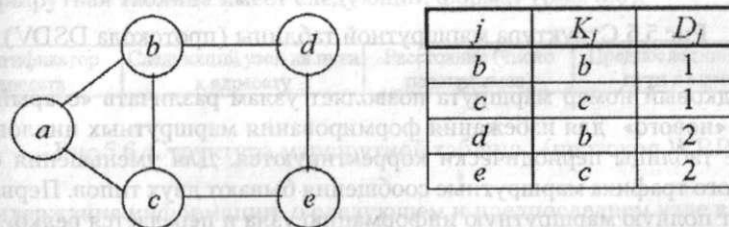


Рис. 5.4. Пример маршрутной таблицы для узла  $a$  (протокол DAPRA PRNET)

Стоимость маршрута предполагает сумму метрик каждого канала. В качестве метрики обычно используется число ретрансляционных участков, но могут быть задержка доставки пакетов, качество канала и другие. Если исполь-



зуются одновременно несколько параметров, то говорят о **многопараметрической** маршрутизации.

Каждый узел периодически информирует (рассылает маршрутные сообщения, содержащие измененные входы маршрутных таблиц) своих соседей о своих маршрутах к адресату. Приняв маршрутное сообщение, узел  $i$  модифицирует свои входы маршрутных таблиц, используя формулу [92]:

$$D(i, j) = \min_k [d(i, k) + D(k, j)]$$

где  $D(i, j)$  – стоимость кратчайшего пути от узла  $i$  к адресату  $j$ ,  $d(i, k)$  – стоимость передачи непосредственно от узла  $i$  к узлу  $k$ ,  $k$  – сосед узла  $i$ . После корректировки маршрутных таблиц узел рассылает маршрутные сообщения своим соседям.

Недостатком данного протокола является необходимость решения так называемой проблемы «конечного счета». Алгоритм требует большего количества итераций для завершения работы (в наихудшем случае  $N$  итераций, где  $N$  – число узлов сети), вызывает заикливание маршрутов, в некоторых ситуациях генерирует большее количество маршрутных сообщений.

**Destination-Sequenced Distance-Vector (DSDV) Routing** протокол [93] представляет пример таблично-ориентированного протокола, основанного на классическом алгоритме Беллмана-Форда и улучшивший его за счет исключения заикливания маршрутов.

Каждый мобильный узел поддерживает маршрутную таблицу ко всем возможным адресатам сети. Каждый ее вход помечается порядковым номером, определенным адресатом (рис. 5.5).

Идентификатор адресата	Следующий узел на пути к адресату	Расстояние (число переприемов)	Порядковый номер маршрута
------------------------	-----------------------------------	--------------------------------	---------------------------

Рис.5.5 Структура маршрутной таблицы (протокола DSDV)

Порядковый номер маршрута позволяет узлам различать «старый» маршрут от «нового» для избежания формирования маршрутных циклов. Маршрутные таблицы периодически корректируются. Для уменьшения объема служебного трафика маршрутные сообщения бывают двух типов. Первый тип содержит полную маршрутную информацию узла и передается редко, второй – только измененную маршрутную информацию и может включаться в пакет канального доступа.

При отказе канала маршруту, проходящему через него, назначается бесконечная метрика и корректируется его порядковый номер.

Все маршрутные сообщения также нумеруются. Нумерация позволяет различать новую и старую информацию и гарантирует, что каждое мар-

шрутное сообщение будет передаваться каждым узлом своим соседям не более одного раза.

DSDV также применяет механизм уменьшения колебаний маршрутов. Колебания маршрутов возможны вследствие асинхронной передачи маршрутной информации. Например, узел может принять информацию о двух маршрутах к одному адресату с одинаковым номером, однако у одного из них хуже стоимость, но он получен первым. Протокол решает эту проблему ожидая некоторое определенное время («время установления маршрута») маршрутных сообщений с информацией о маршрутах передачи. Задержка в принятии решения по выбору маршрута предотвращает частую корректировку маршрутных таблиц и поэтому число маршрутных сообщений уменьшается.

Преимущество данного протокола – он всегда обеспечивает отсутствие заикливания маршрутов.

Недостатки:

- трудность определения оптимального значения максимального «времени установки маршрута» для отдельного адресата, что может привести к колебаниям маршрута и дополнительной рассылке маршрутных сообщений;
- использует оба вида рассылки маршрутной информации: периодическую и событийную, что приводит к лишней загрузке сети служебной информацией;
- узел для корректировки входа маршрутной таблицы к определенному адресату ожидает маршрутное сообщение от этого адресата;
- не поддерживает многопользовательскую маршрутизацию.

**Wireless Routing Protocol (WRP)** [94,95] – таблично-ориентированный протокол. Каждый узел поддерживает маршруты ко всем адресатам сети с помощью четырех таблиц: маршрутной, расстояний, стоимости каналов и таблицы учета передач маршрутных сообщений.

Маршрутная таблица имеет следующий формат (рис. 5.6):

Идентификатор адресата	Следующий узел на пути к адресату	Расстояние (число переприемов)	Предпоследний узел на пути к адресату
------------------------	-----------------------------------	--------------------------------	---------------------------------------

Рис.5.6. Структура маршрутной таблицы (протокол WRP)

Поддержание информации о следующем и предпоследнем узле в маршруте позволяет обнаруживать циклы и решать проблему «конечного счета».

Таблица расстояний узла  $i$  содержит расстояния к каждому адресату  $j$  через соседей  $k$ , т.е. хранит информацию о маршрутных таблицах соседних узлов.

Таблица стоимости каналов ведет подсчет времени безошибочной работы (числа передач) с соседними узлами.

Таблица учета передачи маршрутных сообщений подсчитывает число переданных маршрутных сообщений соседним узлам без получения на них квитанции.

Маршрутные сообщения посылаются периодически или при изменении маршрутной таблицы. Если за период рассылки маршрутных сообщений не произошло изменение маршрутной таблицы, то передается пакет присутствия (hello-пакет). Приняв маршрутное сообщение, узел корректирует таблицу расстояний и формирует новый маршрут (по критерию минимального числа ретрансляций). Если такой маршрут существует, то корректируется маршрутная таблица и рассылаются маршрутные сообщения своим соседям.

Достоинства протокола: отсутствие заикливания маршрутов, быстрая сходимость, возможность получения нескольких маршрутов доставки информации.

Недостатки: применение hello-пакетов, большое число маршрутных сообщений при высокой динамике сетевой топологии.

В таблице 5.1 представлена сравнительная оценка таблично-ориентированных методов маршрутизации.

Табл.5.1

№ п/п	Протокол Параметр	DAPRA PRNET	DSDV	WRP
1.	Временная сложность (отказ/появление канала)	$O(d)$	$O(d)$	$O(h)$
2.	Связная сложность (отказ/появление канала)	$O(x=N)$	$O(x=N)$	$O(x=N)$
3.	Возможность применения иерархической маршрутизации	Да	Нет	Да
4.	Отсутствие заикливания маршрутов	Нет	Да	Да, но не многовенно
5.	Возможность многопользовательской маршрутизации	Нет	Нет	Нет
6.	Число необходимых таблиц	3	2	4
7.	Частота рассылки маршрутных сообщений	Периодическая и по событиям		
8.	Глубина рассылки маршрутных сообщений	Только соседям		
9.	Использование порядковой нумерации маршрутов	Нет	Да	Да
10.	Применение hello-пакетов	Да	Нет	Да
11.	Маршрутная метрика	Ретрансляционный участок, кратчайший путь		

Обозначения:  $N$  – число узлов сети,  $d$  – ее диаметр,  $h$  – вес маршрутного дерева,  $x$  – число узлов, на которых воздействует изменение топологии.

### 5.2 Зондовые протоколы маршрутизации

Основное отличие зондовых методов маршрутизации (в зарубежной литературе они называются реактивными или по требованию) от таблично-ориентированных методов в том, что узлы формируют маршрут передачи информации по мере необходимости путем рассылки по сети специальных пакетов (зондов-запросов) и сбора зондов-ответов, содержащих информацию о возможных маршрутах передачи информации. Поэтому зондовая маршрутизация предполагает два основных этапа функционирования: создание маршрута и его поддержание в актуальном состоянии. Рассмотрим реализацию зондовых протоколов маршрутизации на примерах DSR, AODV, TORA, ABR, SSR.

**DSR (Dynamic Source Routing)** предложен в [96] и предусматривает два этапа его функционирования.

1. Создание маршрута. Отправитель (узел 1), не имея маршрута и желая передать пакет адресату (узлу 8), передает соседним узлам зонд-запрос, содержащий идентификатор адресата (рис. 5.7). Узел, принявший зонд-запрос, может поступить следующим образом. Если он не знает маршрута к адресату, то он добавляет свой идентификатор в зонд-запрос и передает его далее своим соседям (это позволит получить обратный путь передачи и избежать заикливания маршрута). В противном случае (или при достижении зондом-запросом адресата) отправителю посылается зонд-ответ с указанием маршрута. Узел отправитель, получив зонд-ответ, помещает маршрут в свой кэш. Промежуточные узлы, передающие зонды-ответы, также сохраняют полученные маршруты к адресату и отправителю.



Рис.5.7. Этап создания маршрута (протокол DSR)



2. Поддержание маршрута. Поддержание маршрута может осуществляться двумя способами: активным и пассивным. В первом случае, если промежуточный узел  $k$  обнаружил отказ канала (который является составной частью маршрута для  $i$ -го узла), то узел  $k$  посылает зонд-отказ узлу  $i$ . Во втором случае, любой узел может прослушивать наличие ретрансляций соседа и осуществлять пассивный контроль наличия маршрута на расстоянии одного ретрансляционного участка.

При получении узлом зонда-отказа он инициирует процесс создания нового маршрута.

Достоинства протокола: быстрая адаптация к изменению топологии сети; отсутствие периодической посылки служебной информации (что характерно для зондовых методов).

Недостаток: требует рассылки достаточно большого объема служебной информации.

**Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV)** предложен в [97]. В сущности представляет собой комбинацию протоколов DSR и DSDV. Построение и поддержание маршрутов осуществляется зондовыми методами, для поддержания информации о «новых» маршрутах используется порядковая нумерация маршрутов. Протокол использует четыре типа сообщений: зонд-запрос, зонд-ответ, зонд-корректировку и hello-сообщение.

Формат зондов показан на рис.5.8 и рис.5.9 (в квадратных скобках показано число отведенных бит).

Тип сообщения [8]	Резервное поле [11]	Число ретрансляций [8]
Идентификатор ширококвещательной передачи [32]		
IP адресата [32]		
Порядковый номер адресата [32]		
IP отправителя [32]		
Порядковый номер отправителя [32]		

Рис.5.8. Формат зонда-запроса (протокол AODV)

Тип сообщения [8]	L=1	Резервное поле [11]	Число ретрансляций
IP адресата [32]			
Порядковый номер адресата [32]			
Время принятия зонда-запроса [32]			

Рис.5.9. Формат зонда-ответа (протокол AODV)

Формат hello-пакета похожий на формат зонда-ответа. Содержание его полей следующее:  $L=0$ , «число ретрансляций» имеет значение нуля, в полях «IP адресата и его номер» записан свой собственный IP адрес и номер и, кроме этого, содержится список соседних узлов.

Зонд-корректировка имеет поля аналогичные зонду-ответу, кроме поля «число ретрансляций», которое установлено в «бесконечность» и значение поля «порядковый номер адресата» увеличено на единицу.

Маршрутная таблица каждого узла содержит следующую информацию: IP адресата и его порядковый номер, число ретрансляций до адресата, следующий узел в пути к адресату, время функционирования маршрута, список активных соседей.

Функционирование протокола происходит следующим образом. При необходимости передачи пакета узел обращается к маршрутной таблице за маршрутом. В случае его отсутствия передается зонд-запрос всем соседним узлам. Промежуточные узлы, приняв зонд-запрос и не имея маршрута к адресату, ретранслируют его далее.

Адресат, получивший зонд-запрос, формирует зонд-ответ и посылает его отправителю. Отправитель, получив зонд-ответ, корректирует свою маршрутную таблицу.

Достоинства метода: обеспечивает отсутствие заикливания маршрутов, решает проблему «конечного счета», гарантирует получение новых маршрутов и может поддерживать многопользовательскую маршрутизацию.

Недостаток: использование hello-сообщений.

**Temporally Ordered Routing Algorithm (TORA)** [98] – адаптивный распределенный алгоритм маршрутизации, основанный на построении каждым узлом (по мере необходимости) весового направленного ациклического графа с корнем в узле-отправителе и тупиковой вершиной в узле-адресате.

Функционирование алгоритма включает три этапа: создание маршрута, его поддержание и уничтожение.

Для исключения заикливания маршрутов в весовую метрику включен параметр «логическое время отказа канала», т.е. TORA предполагает временную синхронизацию узлов (например, используя Global Position System).

Построение маршрута начинается посылкой отправителем зонда-запроса на установление маршрута (содержащего его вес) и сбора зондов-ответов, сообщающих о весах в узлах сети (рис. 5.10).

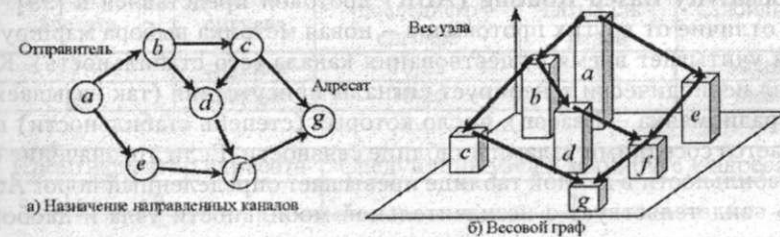


Рис.5.10. Этап построение маршрута (протокол TORA)

Поддержание маршрута происходит следующим образом. Узел, не имеющий маршрута к адресату, выбирает новый вес, который становится глобальным максимумом и рассылает его (с помощью зонда-корректировки) своим соседям.

Соседние узлы согласовывают свой вес с узлом отправителем, изменяют направления каналов и передают зонды-корректировки далее. На рис.5.11 показан процесс изменения весов и направлений каналов.

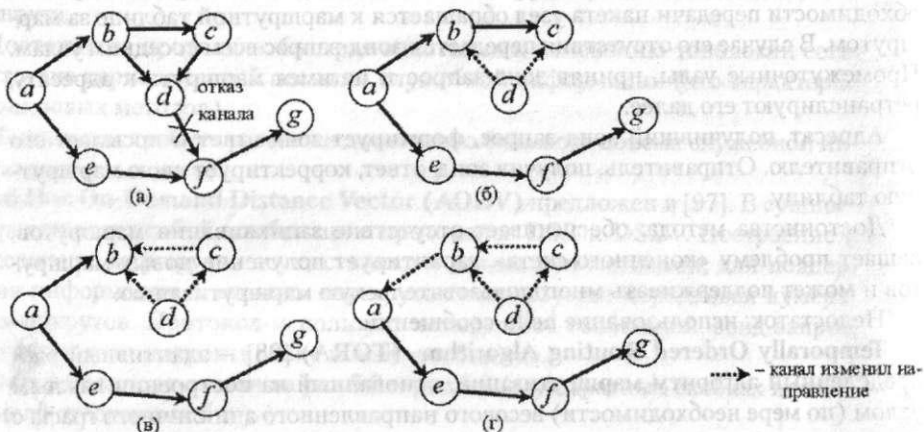


Рис.5.11. Этап поддержания маршрута (протокол TORA)

На этапе уничтожения маршрута узел посылает зонд-стирания.

Достоинства протокола: быстрая сходимость, распределенное функционирование, обеспечение нескольких маршрутов доставки информации к адресату.

Недостаток: необходимость временной синхронизации узлов, возможны временные колебания маршрутов.

**Associativity-Based Routing (ABR)** протокол представлен в [99]. Основное отличие от других протоколов – новая метрика выбора маршрутов, которая учитывает время существования канала (его стабильность). Каждый узел периодически генерирует сигналы присутствия (так называемый сигнал радиомаяка – Beacon), число которых (степень стабильности) подсчитывается соседними узлами в таблице связности. Если это значение степени стабильности в данной таблице превышает определенный порог Астаб, то это свидетельствует о незначительной мобильности узла и наоборот. Т.о. метод пытается использовать маршруты с длительным временем существования.

Метод предполагает три основных этапа функционирования: создание маршрута, его поддержание и уничтожение.

Построение маршрута начинается послылкой узлом-отправителем зонда-запроса, содержащего идентификаторы отправителя, адресата и степени стабильности каналов с соседними узлами. Адресат, получив зонды-запросы, выбирает лучший маршрут (при одинаковом качестве маршрута адресат выбирает маршрут с минимальным числом ретрансляций) и посылает по нему отправителю зонд-ответ. Промежуточные узлы (через которые передается данный зонд-ответ) помечают себе данный маршрут как действительный и записывают в таблицу. Все другие маршруты помечаются как неактивные для устранения возможности получения дубликатов пакетов.

Процесс поддержания маршрута может содержать частично элементы построения, корректировки и стирания маршрутов в зависимости от того, какой узел движется по этому маршруту.

Перемещение узла-отправителя приводит к новому процессу построения маршрута. При перемещении адресата (или промежуточного узла) узел, предшествующий ему в маршруте к адресату, пытается локализовать процесс восстановления маршрута путем послылки зонда-запроса и приема зондов-ответов.

Достоинства метода: выбор маршрутов с наибольшим временем существования каналов приводит к меньшему числу реконструкций маршрутов, гарантирует отсутствие дубликатов зондов.

Недостатки: выбранные пути не являются кратчайшими путями, необходимость передавать сигнал присутствия.

**Signal Stability Routing [SSR]** описан в [100]. Данный метод выбирает маршрут используя временной и энергетический параметры: продолжительность существования канала и мощность сигнала. Каждый узел содержит сигнальную таблицу и маршрутную. В сигнальной хранится информация о качестве каналов с соседними узлами, в маршрутной – следующий узел в пути к адресату (рис.5.12):

Идентификатор адресата	Мощность сигнала	Время приема последнего сигнала	Число принятых сигналов	Стабильность
c	сильная	10:23	7	высокая
g	слабая	10:26	5	низкая

Идентификатор адресата	Следующий узел в маршруте к адресату
g	m

Рис.5.12. Форматы сигнальной и маршрутной таблиц (протокол SSR)



Построение маршрута аналогично протоколу DSR. При необходимости маршрута узел-отправитель посылает зонд-запрос. Формат зонда-запроса содержит поле, определяющее желаемое качество маршрута (только высокостабильный, предпочтительно высокостабильный, любой). Предполагается, что требование высокостабильного маршрута используется только при первой попытке получения маршрута. Принимающий узел распространяет зонд-запрос только в случае его приема по высокостабильному каналу и если он не был отправлен ранее.

Распространение зонда-запроса прекращается при достижении ним адресата. Заметим, что зонд-ответ будет посылаться отправителю на первый принятый зонд-запрос, т.к. вероятней всего это будет кратчайший и наименее загруженный маршрут. Промежуточные узлы (при прохождении зонда-ответа) добавляют маршруты в свои маршрутные таблицы.

Если отправитель в течении определенного времени ожидания не получил зонда-ответа, то он посылает повторно зонд-запрос с более низкими требованиями к качеству маршрута. При обнаружении узлом отказа канала, он посылает отправителю зонд-корректировку, который затем начнет этап стирания маршрута.

Достоинство: выбирает более стабильные маршруты.

Недостатки: промежуточные узлы не могут сообщить отправителю о имеющемся маршруте к адресату, что приводит к значительной задержке при построении маршрута; выбираются не всегда кратчайшие маршруты.

Основные характеристики зондовых протоколов [101] представлены в табл.5.2.

Общее сравнение зондовых и таблично-ориентированных протоколов представлено в табл. 5.3.

Таким образом, в настоящее время предложено большое количество протоколов маршрутизации для мобильных радиосетей с динамичной топологией. Каждый из них обладает достоинствами и недостатками, расходует различное количество временных, связных и вычислительных ресурсов на построение маршрута, имеет особенности в реализации. Сделать однозначный вывод о предпочтительности того или иного протокола без рассмотрения конкретной сети невозможно.

Поэтому выбор (синтез) конкретного протокола маршрутизации будет определяться следующими условиями:

- выполнением требований, предъявляемых к данному протоколу (например, нельзя использовать “сигналы присутствия” узла);
- учетом характеристик конкретной сети (число узлов, пропускная способность каналов, мощность передатчика и др.) и условий ее функционирования (динамика изменения топологии и нагрузки, интенсивность отказов элементов сети и т.д.);

№ п/п	Метод Характеристика	AODV	DSR	TORA	ASR	SSR
1.	Временная сложность (инициализация/отказ)	$O(2d)$	$O(2d)$	$O(2d)$	$O(d+z)/O(l+z)$	$O(d+z)/O(l+z)$
2.	Связная сложность (инициализация/отказ)	$O(2N)$	$O(2N)$	$O(2N)/O(2x)$	$O(N+y)/O(x+y)$	$O(N+y)/O(x+y)$
3.	Возможность иерархической маршрутизации	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
4.	Отсутствие закливания маршрутов	Да	Да	Да	Да	Да
5.	Возможность групповой передачи	Да	Нет	Нет	Нет	Нет
6.	Необходимость «пакетов присутствия»	Нет	Нет	Нет	Да	Да
7.	Возможность многопользовательской маршрутизации	Нет	Да	Да	Нет	Нет
8.	Сохранение маршрутов	таблица, кэш	кэш	таблица	таблицы	таблицы
9.	Методология реконфигурирования маршрутов	стирание маршрута, извещение отправителя	стирание маршрута, извещение отправителя	изменение направлений каналов	локализация передаваемых зондов-запросов	стирание маршрута, извещение отправителя
10.	Маршрутная метрика	кратчайший и «новый» маршрут	кратчайший маршрут	кратчайший маршрут	стабильный и кратчайший маршрут	стабильный и качественный маршрут

Обозначения:  $l$  – диаметр фрагмента сети, участвующего в построении маршрута;  $y$  – общее число узлов в направленном пути при передаче зонда-запроса;  $z$  – диаметр направленного пути при передаче зонда-запроса.

Табл.5.3

Характеристика	Метод	Зондовые	Таблично-ориентированные
Построение маршрутов		Каждым узлом к определенным адресатам по мере необходимости	Каждым узлом ко всем адресатам сети
Возможность иерархической маршрутизации		нет	да
Периодическая корректировка маршрутов		не требуется	требуется
Объем служебной информации: - высокая динамика топологии - низкая динамика топологии		меньше больше	больше меньше
Возможность обслуживать интегральный трафик (QoS) (многопараметрическая маршрутизация)		да, но при условии построения маршрутов с минимальным числом ретрансляций	да, основной параметр – минимальное число ретрансляций

– обеспечения эффективного использования сетевых ресурсов при заданном качестве обслуживания пользователей.

Перспективными направлениями совершенствования протоколов маршрутизации являются:

- обеспечение интегрированного качества обслуживания (QoS) для различных видов информации (речь, данные, видеoinформация);
- многопользовательская маршрутизация (т.е. проблема построения и поддержания одного маршрута доставки информации к нескольким адресатам);
- использование многопараметрической маршрутизации (в качестве параметров в метрике выбора маршрута использовать географическое положение узла, мощность передатчика, степень связности и др.).

### Краткие выводы

В главе проведен анализ и классификация протоколов маршрутизации, применяемых в динамичных мобильных радиосетях. Проведена сравнительная оценка двух основных классов маршрутизации: таблично-ориентированных и зондовых, даны рекомендации о предпочтительности использования того или иного протокола в конкретной сети. В дальнейшем необходимо провести исследования поведения протоколов маршрутизации при различных сценариях поведения сети (изменение входящей нагрузки, динамики сетевой топологии и др.).

## Глава 6. Характеристика условий функционирования систем связи с подвижными объектами

### 6.1 Особенности условий функционирования систем мобильной связи

Используемые в мобильной связи дециметровые радиоволны слабо огибают препятствия, т.е. распространяются в основном по прямой, но испытывают многочисленные отражения от окружающих объектов и подстилающей поверхности. Одним из следствий такого многолучевого распространения является более быстрое, чем в свободном пространстве, убывание интенсивности принимаемого сигнала с расстоянием. Другое следствие - замирания и искажения результирующего сигнала. Именно эти эффекты мы и рассмотрим несколько подробнее [3,4,18,19,22,25,61,104,120,121].

Картина многолучевого распространения схематически иллюстрируется рис. 6.1. Фактически область существенных отражений ограничивается обычно сравнительно небольшим участком в окрестности подвижной станции - порядка нескольких сотен длин волн, т.е. порядка нескольких десятков или сотен метров. При движении подвижной станции эта область перемещается вместе с ней таким образом, что подвижная станция все время остается вблизи центра области. При сложении нескольких сигналов, прошедших по разным путям и имеющих в точке приема в общем случае различные фазы, результирующий сигнал может быть как несколько выше среднего уровня, так и заметно ниже, причем провалы, или замирания сигнала, образующиеся при взаимной компенсации сигналов вследствие неблагоприятного сочетания их фаз и амплитуд, могут быть достаточно глубокими. Искажения результирующего сигнала, или межсимвольная интерференция, имеет место в том случае, когда более или менее синфазные составляющие сигналы с соизмеримыми амплитудами настолько отличаются по разности хода, что символы одного сигнала «наезжают» на соседние символы другого.

Колебания уровня (замирания) принимаемого сигнала практически всегда имеют две составляющие - быструю и медленную. Быстрые замирания, являющиеся прямым следствием многолучевого распространения, описываются релейским законом распределения, и потому их иногда называют релейскими замираниями. Диапазон изменений уровня сигнала при быстрых замираниях может достигать 40 дБ, из которых примерно 10 дБ - превышение над средним уровнем и 30 дБ - провалы ниже среднего уровня, причем более глубокие провалы встречаются реже, чем менее глубокие. При неподвижном абонентском аппарате интенсивность принимаемого сигнала, естественно, не меняется. При перемещении подвижной станции периодичность флуктуации в пространстве составляет около полуволны, т.е. порядка 10...15 см в линейной



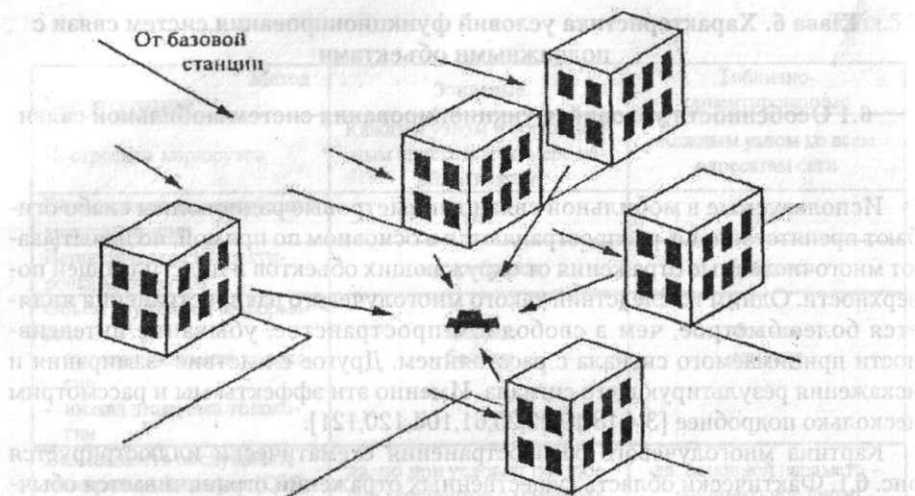


Рис 6.1 Схема многолучевого распространения в условиях плотной городской застройки

мере. Период флуктуации во времени зависит от скорости перемещения подвижной станции: например, при скорости 50 км/ч период флуктуации составляет около 10 мс, а при 100 км/ч - около 5 мс. Частота замираний глубиной 30...10 дБ при скорости порядка 50 км/ч составляет 5...50 провалов в секунду соответственно, а средняя длительность замираний ниже уровня 30...10 дБ при той же скорости - порядка 0,2...2 мс.

Медленные замирания обусловлены изменением условий затенения при перемещении подвижной станции и подчиняются логарифмически нормальному закону распределения. Интенсивность медленных флуктуаций не превышает 5...10 дБ, а их периодичность соответствует перемещению подвижной станции на десятки метров. Фактически медленные замирания представляют собой изменение среднего уровня сигнала при перемещении подвижной станции, на которые накладываются быстрые замирания вследствие многолучевого распространения.

Основную неприятность при сотовой связи составляют быстрые замирания, поскольку они бывают достаточно глубокими, и при этом отношение сигнал/шум падает настолько сильно, что полезная информация может существенно искажаться шумами, вплоть до полной ее потери. Для борьбы с быстрыми замираниями используются два основных метода:

- разнесенный прием, т.е. одновременное использование двух или более приемных антенн;

- работа с расширением спектра - использование скачков по частоте, а также метода CDMA [44-50].

Межсимвольная интерференция, как мы уже упоминали выше, может иметь место при значительных разностях хода между различными лучами в условиях многолучевого распространения. Практически разности хода в городских условиях могут достигать единиц микросекунд. В методе CDMA, при использовании широкополосных сигналов и рейк-приемников, наиболее сильные сигналы выравниваются по задержке и после этого складываются, так что проблема межсимвольной интерференции в значительной мере снимается. В относительно узкополосных системах сотовой связи, использующих метод TDMA, для борьбы с межсимвольными искажениями применяются эквалайзеры - адаптивные фильтры, устанавливаемые в приемном тракте цифровой обработки сигналов, которые позволяют в некоторой степени компенсировать межсимвольные искажения CDMA [51]. Наконец, для борьбы с последствиями многолучевого распространения, а именно для устранения ошибок, обусловленных как замираниями сигналов, так и межсимвольной интерференцией, используется помехоустойчивое канальное кодирование: блочное и сверточное кодирование, а также перемежение.

О канальном кодировании и методе CDMA мы рассмотрим в главе 8, а ниже обсудим применение разнесенного приема, скачков по частоте и эквалайзеров.

## 6.2 Проблемы электромагнитной совместимости систем мобильной связи

Увеличение числа радиоэлектронных средств (РЭС) подвижных систем связи привело к появлению проблем электромагнитной совместимости (ЭМС) как внутрисистемных, так и межсистемного характера. Особое значение приобретает соблюдение условий ЭМС на межсистемном уровне, когда средства систем подвижной связи (базовые станции) взаимодействуют с другими радиоэлектронными средствами (РЭС) связи в совместных частотных диапазонах. При этом необходимо учитывать помехи не только по основному, но также и по побочным каналам приема.

Учитывая то, что электромагнитная обстановка (ЭМО) в группировках систем подвижной связи непрерывно и достаточно быстро изменяется, возникает необходимость рассмотрения вопросов интермодуляционного влияния данных систем на системы связи, работающие в совместных либо близких диапазонах частот. Как пример подобного взаимодействия в Украине может рассматриваться работа РЕЗ таких стандартов (технологий) как CDMA, D-AMPS и GSM в верхней части диапазона 800 МГц.

Задача электромагнитной совместимости (ЭМС) совокупности излучателей и рецепторов электромагнитного поля определяется не только электромагнитной обстановкой в точках размещения рецепторов, но и их восприимчивостью к полю. К параметрам, определяющим восприимчивость радиоприемного устройства, относятся:

- чувствительность основного и побочных каналов приема, избирательность;
- нелинейные эффекты блокирования, перекрестных искажений и интермодуляции;
- коэффициенты сетевых радиопомех, электрической индукции и переноса радиопомех.

Широкое применение в настоящее время находит математическая модель приемника на основе его внешних характеристик, которые могут быть получены путем измерений без анализа его внутренней структуры. Некоторые из характеристик должны определяться в широкой полосе частот (до декады и больше в обе стороны относительно рабочей частоты приемника), что является характерной особенностью задач ЭМС. Характеристики приемника, представленные в виде совокупности измерений, после статистической обработки формируют в виде математических моделей, совокупность которых и является моделью приемника, характеризуя как его линейные, так и нелинейные свойства. Такое представление приемника позволяет строить гибкие алгоритмы оценки ЭМС, включая в них каждый раз, те элементы, которые отражают эффекты, представляющие интерес на данном этапе исследования.

Стремительный рост количества абонентов сотовой связи требует от операторов дальнейшего развития состава услуг, предоставление их с качеством не хуже, чем в современных цифровых сетях фиксированной связи. Эти требования в разной степени могут быть реализованы в сетях связи 2,5 и третьего поколений (2,5G, 3G). Следует учитывать, что теперь те или иные технологии связи перестают быть приоритетными. Главными приоритетами становятся сами услуги, динамика их развития, разбиение по этапам внедрения и условия предоставления пользователям.

С другой стороны, при переходе в GSM от режима коммутации каналов к режиму коммутации пакетов (GPRS) повышаются требования к качеству канала связи: для GPRS необходимо обеспечить более высокое отношение сигнал/помеха, значение которого зависит от используемой схемы кодирования (CS). Так, при используемой в настоящее время в GPRS схеме кодирования CS2 отношение сигнал/помеха должно быть выше на 2...3 дБ по отношению к передаче речевых сообщений в режиме с коммутацией каналов (9 дБ). Отсюда следует, что применение режима GPRS без перепланирования радиосети может привести к снижению радиуса связи, т.е. сокращению

размеров соты. В этом случае для обеспечения непрерывной зоны покрытия необходима установка дополнительных базовых станций (БС). Например, при уменьшении радиуса соты в режиме GPRS на 10% непрерывность связи может быть обеспечена путем увеличения количества базовых станций на 23%. При снижении радиуса соты на 20% нужно дополнительно образовать около 56% новых сот. Кроме того, использование дополнительных базовых станций приведет к необходимости установки новых контроллеров БС и транскодеров, расширению инфраструктуры систем передачи, включая радиорелейные линии и волоконно-оптические линии связи.

### 6.2.1 Модели, используемые при анализе интермодуляционного влияния между РЭС различных систем сотовой связи

#### Причины интермодуляционных помех в сетях подвижной радиосвязи

Назначение частот радиоэлектронным средствам систем подвижной радиосвязи различных стандартов осуществляется таким образом, чтобы исключалась возможность создания помех по основным каналам приема. Все операторы подвижной радиосвязи в каждом из регионов Украины имеют «свои» полосы частот для планирования сетей, которые не пересекаются с полосами частот других операторов. В результате этого в любом регионе передатчик РЭС одного оператора не может быть настроен на частоту приема РЭС другого оператора. Таким образом, все операторы могут независимо друг от друга производить планирование своих сетей, будучи уверенными, в том, что по основному каналу приема они никому не будут создавать помех, а также в том, что они ни от кого их не будут принимать. Все возможные помехи по основному каналу приема могут быть только внутрисистемными, т.е. образованными РЭС того же оператора. Возможными причинами этого является или плохое планирование сети или недостаток частотного ресурса у оператора, когда он сознательно идет на некоторое ухудшение характеристик радиоканала с целью обеспечения большего покрытия или большей емкости сети при ограничении на используемый частотный ресурс.

Однако даже при полном не перекрывающемся распределении частот между операторами все равно остается потенциальная возможность создания как внутрисистемных, так и межсистемных помех. Причина этого — не идеальность характеристик радиооборудования, а именно, передатчиков и приемников базовых и абонентских станций. Результатом этой не идеальности являются такие эффекты как интермодуляция в передатчике и в приемнике, а также блокирование приемника при попадании на его вход больших уровней сигналов. Таким образом, простое разделение частот между операторами не является достаточным условием



для того, чтобы исключить межсистемные помехи. Для того, чтобы быть уверенным в том, что условия ЭМС будут выполняться, необходимо в каждом конкретном случае присвоения рабочих частот РЭС производить расчет, в котором учитывать все работающие в этом районе РЭС. Однако могут существовать определенные диапазоны частот или группы частот внутри диапазонов, использование которых лишь в малой мере будет влиять на работу РЭС в рассматриваемом районе, в смысле создания интермодуляционных помех. Здесь будут рассмотрены вопросы формирования интермодуляционных помех третьего порядка и помех по блокированию приемников на примере сетей подвижной радиосвязи стандарта GSM в диапазоне 900 МГц.

### Перечень возможных сценариев формирования помех

При анализе внутрисистемных и межсистемных помех будем рассматривать два основных механизма их возникновения: интермодуляция в приемнике и блокирование приемников. Оба этих механизма необходимо учитывать при рассмотрении различных сценариев формирования помех. Для определения общего перечня возможных сценариев необходимо рассмотреть частотные планы систем подвижной радиосвязи, которые работают в Украине в диапазоне 800 и 900 МГц. А именно, системы подвижной радиосвязи стандартов GSM, CDMA и D-AMPS. Исходя из анализа частотного плана, можно предложить следующий перечень возможных сценариев формирования помех сетям подвижной радиосвязи стандарта GSM, которые необходимо здесь рассмотреть:

- помехи от базовых станций (БС) GSM в направлении мобильных станций (МС) GSM;
- помехи от МС GSM в направлении БС GSM;
- помехи от БС CDMA и D-AMPS в направлении БС GSM.

Для проведения анализа влияния одних РЭС на другие в соответствии с перечисленными сценариями необходимо знание технических характеристик передатчиков и приемников базовых и мобильных станций взаимодействующих систем. С целью упрощения разработки методики расчетов и непосредственного проведения расчетов определим параметры приемников и передатчиков типичных базовых и мобильных станций на основе характеристик соответствующих станций стандарта GSM. Ниже приводятся технические характеристики РЭС стандарта GSM. Для РЭС других стандартов, в случае если их параметры отличаются от параметров РЭС стандарта GSM, по тексту будут приведены отличия.

### Технические характеристики РЭС, необходимые для проведения расчетов

#### Технические характеристики БС.

Характеристики передатчика.

Мощность передатчика – 20 Вт (43 дБм).

Коэффициент усиления антенны в направлении максимального излучения +15 дБ.

Маска спектра излучения стандарта GSM приведена в таблице 6.1. Полоса частот, в которой проводятся измерения побочных излучений, составляет 30 кГц при расстройках до 1800 кГц от центральной частоты излучения и 100 кГц при расстройках превышающих 1800 кГц.

Таблица 6.1.

Расстройка относительно центральной частоты излучения, кГц	100	200	250	400	600-1200	1200-1800	1800-6000	Свыше 6000
Уровень излучения относительно уровня основного излучения, дБ или абсолютный уровень излучения, дБм	0,5	-30	-33	-60	-27 дБм	-30 дБм	-32 дБм	-80

Интермодуляционные излучения передатчика в пределах расстроек до 6 МГц относительно центральной частоты настройки не должны превышать пределы, указанные в таблице 6.1. При превышении величины расстройки относительно центральной частоты настройки передатчика значения 6 МГц, но в пределах полосы частот выделенной для работы передатчиков данного стандарта (935-960 МГц для стандарта GSM, 869-894 МГц для стандартов CDMA и D-AMPS) мощность побочного (интермодуляционного) излучения измеренного в полосе 300 кГц не должна превышать абсолютных значений: -36 дБм или -70 дБ относительно мощности основного излучения. За пределами полос предназначенных для работы передатчиков данного стандарта действительны общие требования к побочным излучениям передатчиков РЭС систем подвижной радиосвязи, в соответствии с которыми мощность побочных излучений передатчиков ограничена абсолютными величинами -36 дБм в полосах частот от 9 кГц до 1 ГГц и -30 дБм в полосах частот от 1 ГГц до 12,75 ГГц.

**Характеристики приемника.**

Чувствительность приемника:

-104 дБм для БС GSM;

Коэффициент усиления антенны в направлении максимального излучения – 15 дБ.

Уровни блокирования приемника определяются таблицей 6.2. Для определения уровней блокирования приемника вводятся понятие полос in-band и out-band. Для приемников БС стандарта GSM полоса in-band определяется как 870-925 МГц. Полосы частот ниже 870 МГц, а также выше 925 МГц для приемников БС стандарта GSM определяются как полосы out-band.

Таблица 6.2

Тип полосы	Величина расстройки $\Delta f$ , кГц	Уровень блокирования приемника, дБм
In-band	$600 \leq \Delta f < 800$	-26
	$800 \leq \Delta f < 1600$	-16
	$1600 \leq \Delta f < 3000$	-16
	$3000 \leq \Delta f$	-13
Out-band	-	8

Уровень чувствительности приемника БС к интермодуляции третьего порядка составляет -43 дБм.

Под величиной чувствительности приемника к интермодуляции третьего порядка  $R_{\text{вх3}}$  понимается уровень помех на входе приемника на частотах  $f_1$  и  $f_2$ , подобранных таким образом, что выполняется одно из двух условий ( $f_0 = 2f_1 - f_2$  или  $f_0 = 2f_2 - f_1$ ), при котором приемник сохраняет свою работоспособность в приеме сигнала на 3 дБ превышающего его уровень чувствительности. Здесь под  $f_0$  понимается частота настройки приемника.

**Технические характеристики МС.**

Характеристики передатчика.

Мощность передатчика – 2 Вт (33 дБм).

Коэффициент усиления антенны – 0 дБ.

Маска спектра излучения стандарта GSM приведена в таблице 6.3. Полоса частот, в которой проводятся измерения побочных излучений, составляет 30 кГц при расстройках до 1800 кГц от центральной частоты излучения и 100 кГц при расстройках превышающих 1800 кГц.

Таблица 6.3.

Расстройка относительно центральной частоты излучения, кГц	100	200	250	400	600-1800	1800-3000	3000-6000	Свыше 6000
Уровень излучения относительно уровня основного излучения, дБ или абсолютный уровень излучения, дБм	0,5	-30	-33	-60	-27 дБм	-30 дБм	-32 дБм	-38 дБм

Интермодуляционные излучения передатчика в пределах расстроек до 6 МГц относительно центральной частоты настройки не должны превышать пределы, указанные в таблице 6.3. При превышении величины расстройки относительно центральной частоты настройки передатчика значения 6 МГц, но в пределах полосы частот выделенной для работы передатчиков данного стандарта (890-915 МГц для стандарта GSM) мощность побочного (интермодуляционного) излучения измеренного в полосе 300 кГц не должна превышать абсолютного значения -36 дБм или -70 дБ относительно мощности основного излучения, которое из них больше. За пределами полос предназначенных для работы передатчиков данного стандарта действительны общие требования к побочным излучениям передатчиков РЭС систем подвижной радиосвязи, в соответствии с которыми мощность побочных излучений передатчиков ограничена абсолютными величинами -36 дБм в полосах частот от 9 кГц до 1 ГГц и -30 дБм в полосах частот от 1 ГГц до 12,75 ГГц.

**Характеристики приемника МС.**

Чувствительность приемника:

-104 дБм для МС GSM;

Коэффициент усиления антенны – 0 дБ.

Уровни блокирования приемника определяются таблицей 6.4. Полоса in-band для приемника МС стандарта GSM определена как 915-980 МГц. Полосы частот ниже 915 МГц, а также выше 980 МГц для приемников БС стандарта GSM определяются как полосы out-band.

Таблица 6.4

Тип полосы	Величина расстройки $\Delta f$ , кГц	Уровень блокирования приемника, дБм
In-band	$600 \leq \Delta f < 800$	-38
	$800 \leq \Delta f < 1600$	-33
	$1600 \leq \Delta f < 3000$	-23
	$3000 \leq \Delta f$	-23
Out-band	-	0



## 8.8 Общие алгоритмы анализа условий ЭМС

**Критерии выполнения условий ЭМС в системах подвижной связи.**

Среди большого количества критериев, которыми можно пользоваться при анализе ЭМС РЭС для целей настоящего исследования наиболее подходящими являются энергетические критерии, которые при их использовании предполагают расчет величин помехи и сигнала и сравнение их с величинами защитных отношений рассчитанных для данного сочетания взаимодействующих сигналов. На основании энергетических критериев возможно получение величин необходимого пространственного разнесения между взаимодействующими РЭС. Решение о выполнении условий ЭМС будет приниматься, если отношение сигнал/помеха на входе демодулятора приемника мобильной или базовой станции будет превышать величину 9 дБ. Эта величина рекомендуется в качестве базовой для стандарта GSM.

**Модели затухания сигналов на трассах распространения.**

При использовании энергетических критериев оценки ЭМС важным моментом является расчет затухания на трассе распространения радиоволн. В качестве модели распространения целесообразно выбрать модель распространения на трассах прямой видимости при расчете затухания между базовыми станциями различных сетей. Для трасс БС-МС и МС-МС целесообразно выбрать модель Хата. При расчетах величин затуханий будем определять медианные значения затуханий. Высоту поднятия антенн базовых станций для всех случаев будем принимать равной 50 метрам, а мобильных станций – 1,5 метрам. Затухание в свободном пространстве определяется из формулы

$$L_{fr[дБ]} = 22 + 20 \lg\left(\frac{d}{\lambda}\right) \quad (6.1)$$

здесь:  $d$  – расстояние и  $\lambda$  – длина волны, выраженные в одинаковых величинах

Для частоты 900 МГц формулу (6.1) можно преобразовать в следующую

$$L_{bs-bs} = 91,5 + 20 \lg(R) \quad (6.2)$$

здесь  $R$  – расстояние, выраженное в километрах.

Для обозначения величины затухания между базовыми станциями в дальнейшем будем использовать выражение  $L_{bs-bs}$ .

В соответствии с Рекомендацией ITU-R P.529-3, напряженность поля, создаваемая передатчиком с эффективной изотропно излучаемой мощностью 1 кВт, выраженная в децибелах относительно 1 мкВ/м может быть определена формулой

$$E_{[дБ(мкВ/м)]} = 69,82 + 6,16 \lg(f) + 13,82 \lg(h_1) + 1 + a(h_2)(44,9 + 6,55 \lg(h_1)) \lg(R)^b \quad (6.3)$$

где:  $f$  – частота в мегагерцах;

$h_1$  – высота подъема антенны базовой станции в метрах

$h_2$  – высота подъема антенны мобильной станции в метрах

$R$  – расстояние в километрах

$a(h_2) = (1,1 \lg(f) - 0,7)h_2 - (1,56 \lg(f) - 0,8)$

Так как нас интересуют эффекты, происходящие в приемниках при поступлении на их входы больших сигналов, что возможно только при близком расположении РЭС, то в качестве коэффициента  $b$  выберем значение равное 1, что в соответствии с требованиями рекомендации P.529-3 справедливо для расстояний меньших 20 км.

С учетом принятых для расчетов исходных данных, а именно  $f = 900$  МГц,  $h_1 = 50$  м,  $h_2 = 1,5$  м формула (6.3) упрощается

$$E = 75,11 - 38,8 \lg(R) \quad (6.4)$$

Для определения величины затухания на трассе распространения необходимо использовать формулу пересчета, приведенную в Рекомендации ITU-R PN.525-2, которая определяет величину мощности принятую изотропной антенной по известной напряженности поля созданного передатчиком с изотропно излучаемой мощностью равной 1 кВт.

$$P_r = E - 20 \lg(f) + 167,2 \quad (6.5)$$

здесь:  $P$  – мощность принятая изотропной антенной в дБВт;

$E$  – напряженность поля в дБ(мкВ/м);

$f$  – частота в ГГц

Принимая во внимание, что в (6.5) используется напряженность поля создаваемая передатчиком с ЭИИМ 1кВт выражение для затухания сигнала на трассе распространения можно записать как

$$L_{bs-ms} = 121,2 + 33,8 \lg(R) \quad (6.6)$$

Под обозначением  $L_{bs-ms}$  в дальнейшем будем понимать затухание на трассе распространения между базовой и мобильной станцией.

Для определения затухания на трассах распространения между двумя мобильными станциями необходимо использовать модифицированную модель Хата, описанную, в частности в отчете ERC 68. В этом случае для используемых в текущих исследованиях исходных данных формула будет иметь вид

$$L_{bs-ms} = 152,6 + 35,2 \lg(R) \quad (6.7)$$

Формулы (6.6) и (6.7) необходимо использовать для расстояний  $R \geq 0,1$  км. При расстояниях меньших 40 метров ( $R \geq 0,04$  км) используется модель прямой видимости и для случая линии радиосвязи между мобильными станциями, учитывая, что высоты обоих мобильных станций равны 1,5 метра, должна использоваться формула (6.2). Для линии между базовой станцией и мобильной станцией, для учета разницы высот расположения антенн необходимо использовать модифицированную формулу (6.2), а именно

$$L_{bs-ms} = 91,5 + 20 \lg(R') \quad (6.8)$$

здесь  $R' = (R^2 + 0,0485^2)^{1/2}$  - расстояние по прямой между геометрическими центрами антенн с учетом разности в высотах подъема антенн равной 48,5 метра.

В переходной зоне, на расстояниях между 40 и 100 метрами затухание на линиях МС-МС и БС-МС определяется использованием линейной интерполяции в предположении, что затухание (в дБ) линейно возрастает с расстоянием. Для фиксированных значений высот антенн и частоты, значения затухания (в дБ) в зоне  $0,04 \leq R \leq 0,1$  можно записать следующими выражениями

$$L_{ms-ms} = 63,5 + 900(R - 0,04) \quad (6.9)$$

$$L_{bs-ms} = 67,5 + 333(R - 0,04) \quad (6.10)$$

Поскольку в процессе исследований чаще всего придется по известной величине необходимого затухания находить необходимое расстояние, то полученные формулы необходимо преобразовать к следующему виду.

Для линий между базовыми станциями необходимое расстояние в километрах должно определяться по формуле

$$R = 10^{\frac{L-91,5}{20}} \quad (6.11)$$

Для линий между базовыми станциями и абонентскими станциями в зависимости от значения необходимого затухания расстояние в километрах должно определяться по одной из трех следующих формул.

При  $L > 87,4$  дБ

$$R = 10^{\frac{L-121,2}{33,8}} \quad (6.12)$$

при  $67,5 > L > 87,4$  дБ

$$R = 0,04 + \frac{L - 67,5}{333} \quad (6.13)$$

при  $L < 67,5$  дБ

$$R = \sqrt{10^{\frac{L-91,5}{10}} - 0,002352225} \quad (6.14)$$

Значения затухания  $L < 65,2$  дБ являются некорректными при рассматриваемых исходных данных для данного типа трассы. При  $L < 65,2$  дБ значение расстояния принимается равным 0 метров.

Для линий между мобильными станциями, в зависимости от значения необходимого затухания, расстояние в километрах должно определяться по следующим формулам

При  $L > 117,4$  дБ

$$R = 10^{\frac{L-152,6}{35,2}} \quad (6.15)$$

при  $63,5 \leq L \leq 117,4$  дБ

$$R = 0,04 + \frac{L - 63,5}{900} \quad (6.16)$$

при  $L < 63,5$  дБ

$$R = 10^{\frac{L-91,5}{20}} \quad (6.17)$$

### 6.2.2 Методики определения интермодуляционного влияния между РЭС различных систем сотовой связи.

#### Помехи от базовых станций GSM в направлении мобильных станций GSM

##### Помехи, приводящие к блокированию приемников.

Блокирование приемников мобильных станций происходит при попадании на его вход уровней сигналов превышающих значения указанные в таблице 2.4. В зависимости от своего месторасположения МС работает с той БС, с которой она имеет наилучшую связь или, если ближняя станция перегружена, с другой БС принимаемый сигнал от которой является наибольшим. При такой организации связи помеха по блокированию приемника МС будет возникать под воздействием передачи БС чужой сети GSM или находящейся поблизости соседней БС своей сети GSM.



Определим, на каких расстояниях от БС должен находиться приемник МС чтобы он был подвержен воздействию помехи по блокированию для различных частотных расстройек.

Запишем формулу для расчета уровня приемного сигнала от БС на входе приемника МС.

$$P_r = P_{tbs} + G_{abs} + G_{ams} - L_{bs-ms} \quad (6.18)$$

где:  $P_{tbs}$  – мощность на выходе передатчика БС, в нашем случае 13 дБВт;  
 $G_{abs}, G_{ams}$  – коэффициенты усиления антенн базовой и мобильной станции соответственно. В нашем случае  $G_{abs} = 15$  дБ и  $G_{ams} = 0$  дБ;  
 $L_{bs-ms}$  – затухание на трассе распространения БС–МС.

Для нахождения необходимого затухания, которое должен претерпеть сигнал на пути распространения, формулу (6.18) преобразуем как

$$L_{bs-ms} = P_{tbs} + G_{abs} + G_{ams} - P_r \quad (6.19)$$

Результаты расчета необходимых расстояний приведены в таблице 6.5

Таблица 6.5

Расстройка $\Delta f$ , кГц	Необходимое затухание, дБ	Необходимое расстояние, м.
$600 \leq \Delta f < 800$	96	180
$800 \leq \Delta f < 1600$	91	128
$1600 \leq \Delta f$	81	81

Проведенные расчеты показывают, что приемники МС стандарта GSM испытывают помехи по блокированию от любых базовых станций стандарта GSM при нахождении от них на расстояниях менее 80 метров, а в некоторых случаях, при малых частотных расстройках, и на расстояниях до 180 метров. Как правило, мешающей является БС другого оператора, т.к. слишком мала вероятность такого события, что в радиусе 80-180 метров развернуто несколько БС стандарта GSM одного оператора, работающих мощностью 20 Ватт каждая (а именно для таких мощностей передачи получены результаты, приведенные в таблице 6.5). Если же такие ситуации и возникают, то для избежания помех по блокированию внутри одной сети при развертывании БС с мощностью передатчиков 20 Вт и с расстоянием между ними менее 1802=360 метров, рабочие частоты этих БС должны различаться не менее чем на 800 кГц. При расстояниях между БС менее 250 метров, их рабочие частоты

должны различаться на величину не менее чем 1600 кГц. При частотных расстройках больших, чем 1600 кГц для исключения помех приемникам МС по блокированию расстояния между двумя БС сети не должно быть меньше 160 метров. При развертывании более густой сети БС, должны использоваться БС с более низкими значениями мощностей передатчиков.

Таким образом, в пределах зон обслуживания БС сети GSM вокруг всех БС чужих сетей образуется зона радиусом не менее 80 метров, в пределах которой приемник МС будет подвержен воздействию помехи по блокированию, вызванной работой близко расположенного передатчика чужой сети GSM. При разнице частот между  $f_0$  (частотой передачи БС своей сети) и  $f_1$  (частотой передачи БС чужой сети, которая расположена в пределах зоны обслуживания своей БС с частотой передачи  $f_0$ ) меньшей, чем 1600 кГц, радиус пораженной зоны вокруг чужой станции возрастет почти до 130 метров, а при разнице частот меньше 800 кГц – до 180 метров.

#### **Помехи, приводящие к возникновению интермодуляционных помех в приемнике.**

Для возникновения интермодуляции в приемнике МС необходимо чтобы на его входе присутствовало не менее двух мешающих сигналов имеющих определенное частотное соотношение и достаточный для образования интермодуляционной помехи уровень.

Порядок расчета помех, вызванных интермодуляцией в приемнике, определен в Рекомендации ITU-R SM.1134. В соответствии с ним уровень эквивалентной интермодуляционной помехи вида  $2f_1 - f_2$  на входе приемника может быть определен из выражения

$$P_{int} = 2(P_1 - \beta_1) + (P_2 - \beta_2) - K_{2,1} \quad (6.20)$$

где:  $P_1$  и  $P_2$  – уровни мешающих сигналов на выходе антенны на частотах  $f_1$  и  $f_2$  соответственно, дБВт;

$\beta_1$  и  $\beta_2$  – величины затухания мешающих сигналов в преселекторе (в приемном фильтре дуплексера) на частотах  $f_1$  и  $f_2$ , дБ;

$K_{2,1}$  – коэффициент интермодуляции третьего порядка, который может быть рассчитан по результатам измерений интермодуляционных характеристик или получен из технического описания приемника, дБ.

Получение достоверного значения коэффициента  $K_{2,1}$  является наиболее сложной задачей расчета с использованием (6.20). Его величину можно получить косвенным методом. В стандарте ETSI EN 300 910, в котором описаны общие требования к техническим характеристикам приемников и передатчиков мобильных и базовых станций стандарта GSM, определены следующие требования к интермодуляционным характеристикам приемника МС стан-

дарта GSM-900. Приемник должен сохранять свою работоспособность при наличии на его входе:

- полезного сигнала с частотой  $f_0$  и уровнем на 3 дБ превышающим уровень чувствительности (для МС GSM-900 уровень чувствительности приемника принимается равным минус 134 дБВт);
- мешающих сигналов с частотами  $f_1$  и  $f_2$ , удовлетворяющими условию  $f_0 = 2f_1 - f_2$ , и уровнями  $P_{вх3} = -73$  дБВт.

Принимая во внимание, что в описываемом случае частоты  $f_1$  и  $f_2$  попадают в рабочий диапазон приемника (т.е.  $\beta_1 = \beta_2 = 0$ ), и что величина защитного соотношения для соканальной помехи в сетях GSM составляет 9 дБ можно определить значение  $K_{2,1}$  из (1.20) для приемника БС GSM-900 как

$$K_{2,1} = 2(-73 \text{ дБВт}) + (-73 \text{ дБВт}) - (-134 \text{ дБВт} + 3 \text{ дБ} - 9 \text{ дБ}) = -79 \text{ дБ}$$

В результате для случая определения уровня интермодуляционной помехи от передатчиков БС стандарта GSM приемникам МС стандарта GSM выражение (6.20) приобретает вид

$$P_{umm} = 2P_1 + P_2 + 79 \text{ дБ} \quad (6.21)$$

Исходя из (6.21), а также требований стандарта ETSI EN 300 910, значение уровня помех на входе приемника МС при котором не будет возникать ощутимой интермодуляционной помехи не должно превышать (при условии их одинакового уровня) величины -73 дБВт. С учетом этого из (6.19) можно определить необходимую величину затухания, которое должны претерпеть помехи от базовых станций в процессе распространения от антенны БС до антенны МС.

$$L_{bs-ms} = P_{tbs} + G_{abs} + G_{ams} - P_r = 13 \text{ дБВт} + 15 \text{ дБ} + 0 \text{ дБ} - (-73 \text{ дБВт}) = 101 \text{ дБ}.$$

В соответствии с (6.12) можно рассчитать расстояние, с которого возможно создание интермодуляционной помехи

$$R = 10^{\frac{L-121.2}{33.8}} = 10^{\frac{101-121.2}{33.8}} = 10^{-0.598} = 0,252 \text{ км}. \quad (6.22)$$

Полученный результат можно интерпретировать следующим образом. При нахождении МС с частотой приема  $f_0$  на одинаковом расстоянии равном 252 метра от двух базовых станций частоты передачи, которых ( $f_1$  и  $f_2$ ) удовлетворяют равенству  $2f_1 - f_2 = f_0$ , на входе приемника МС образуется интермодуляционная помеха на приемной частоте с уровнем -143 дБВт. Уровень помехи -143 дБВт соответствует максимальному возможному уровню помехи при котором приемником МС возможен прием полезного сигнала равного чувствительности приемника (-134 дБВт) без ухудшения качества связи (с требуемым защитным отношением 9 дБ).

Если расстояния от МС до двух БС различны, то для нахождения безопасного сочетания расстояний можно пользоваться следующим выражением

$$R_1^2 R_2 = R^3, \quad (6.23)$$

где  $R_1$  – расстояние от МС до БС с частотой передачи  $f_1$ ,  
 $R_2$  – расстояние от МС до БС с частотой передачи  $f_2$ ,  
 $R$  – расстояние, полученное из (6.22), а именно 252 метра.

Из (6.23) можно получить следующие два выражения для определения необходимого минимального расстояния  $R_1$  ( $R_2$ ) по известному фиксированному расстоянию  $R_2$  ( $R_1$ )

$$R_1 = \sqrt{\frac{0,016}{R_2}} \quad (6.24)$$

$$R_2 = \frac{0,016}{R_1^2} \quad (6.25)$$

Отличия в (6.24) и (6.25) объясняются тем, что в исходном выражении (6.20) уровень входного сигнала на частоте  $f_1$  ( $P_1$ ) берется с коэффициентом 2, а уровень входного сигнала на частоте  $f_2$  берется с коэффициентом 1.

Необходимо отметить, что выражения (6.23) – (6.25) справедливы только для случаев, когда значения  $R_1$  и  $R_2$  превышают 100 метров.

При значениях  $R_1 < 100$  метров величины допустимого расстояния от БС с частотой передачи  $f_1$  до МС может быть найдено из таблицы 6.6.

Таблица 6.6.

Расстояние $R_1$ , м.	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Расстояние $R_2$ , км.	24,3	19,2	15,5	12,3	9,7	7,8	6,2	4,9	3,95	3,15	2,5	2	1,6

В таблице 6.6 представлены значения величин  $R_1$  для случаев, когда  $R_2 < 100$  метров.

Таблица 6.7.

Расстояние $R_2$ , м	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Расстояние $R_1$ , м	790	750	710	665	630	595	560	530	505	475	450	425	400



Результаты расчетов по (6.22) – (6.25) и приведенные в таблицах 6.6 и 6.7 показывают, что при нахождении МС в радиусе 250 метров от БС чужой сети возникает потенциальная возможность поражения приемника МС интермодуляционной помехой. Такая помеха может возникнуть, если при нахождении МС, работающей на прием на частоте  $f_0$ , вблизи БС другой сети с частотой передачи  $f_1$ , расстояние до БС любой сети GSM с частотой  $f_{21} = 2f_1 - f_0$  или с частотой  $f_{22} = (f_0 + f_1)/2$  меньше чем определяемое по (6.23) – (6.25) или из таблиц 6.6 и 6.7. При этом для определения допустимого расстояния до БС с частотой передачи  $f_{21}$  необходимо пользоваться формулой (6.24) и таблицей 6.6 принимая за  $R_1$  расстояние до БС с частотой передачи  $f_1$ . При определении допустимого расстояния до БС с частотой передачи  $f_{22}$  необходимо пользоваться формулой (6.25) и таблицей 6.7.

Наиболее опасным, с точки зрения возникновения интермодуляционных помех, будет случай близкого расположения (менее 80 метров) МС от передатчика БС (с частотой передачи  $f_1$ ) чужой сети при использовании в рассматриваемом регионе частоты  $f_{21} = 2f_1 - f_0$ , так как в этом случае минимально допустимые расстояния до БС с частотой передачи  $f_{21}$  могут достигать 10 км. При этом, для БС с частотой передачи  $f_{22} = (f_0 + f_1)/2$  достаточным, для того чтобы не создавать заметных интермодуляционных помех, оказывается расстояние от МС равное 1 км.

Таким образом, при рассмотрении интермодуляционных помех от передатчиков БС стандарта GSM приемникам МС стандарта GSM возможно определить зоны, внутри которых приемники МС будут подвержены интермодуляционным помехам. Для этого необходимо для каждой БС своей сети GSM выполнить следующие действия.

Определить зону обслуживания БС (сектора БС) с частотой передачи  $f_0$ .

Определить БС других сетей GSM, которые находятся в пределах зоны обслуживания рассматриваемой БС (сектора БС).

Для каждой из рабочих частот БС чужих сетей GSM, работающих в пределах зоны обслуживания рассматриваемой БС, определить частоты  $f_{21} = 2f_1 - f_0$  и  $f_{22} = (f_0 + f_1)/2$ , где  $f_1$  – рабочая частота БС чужой сети GSM.

Определить минимальные расстояния от БС чужой сети с частотой передачи  $f_1$  до БС с частотой передачи  $f_{21}$  и  $f_{22}$  ( $R_2$  для БС с частотой передачи  $f_{21}$  и  $R_1$  для БС с частотой передачи  $f_{22}$ ).

С использованием формул (6.23) – (6.25) и таблиц 6.6 и 6.7 найти радиусы зон  $R_1$  и  $R_2$  вокруг БС чужой сети с частотой передачи  $f_1$ , пораженных интермодуляционной помехой. Большая из этих зон будет результирующей зоной вокруг БС чужой сети, пораженной интермодуляционной помехой, образованной частотой передачи  $f_1$  и одной из частот  $f_{21}$  или  $f_{22}$ .

### Анализ полученных результатов.

Проведенные расчеты показали, что при развертывании на одной территории нескольких сетей сотовой связи стандарта GSM возможно создание помех от передатчиков БС к приемникам МС чужих сетей приводящих к блокированию приемников и возникновению интермодуляционных помех.

Вокруг каждой БС обязательно образуется зона, радиусом от 80 до 180 метров, внутри которой приемники МС чужих сетей GSM будут испытывать помеху по блокированию.

Также вокруг каждой БС может образовываться зона, радиусом до 250 метров, в пределах которой приемники МС чужих сетей GSM могут подвергаться воздействию интермодуляционных помех. Наличие и размеры такой зоны будут зависеть от значений частот, которые назначены другим БС, расположенным на расстояниях до 10-15 км от рассматриваемой БС.

### Помехи от мобильных станций GSM в направлении базовых станций GSM

#### Помехи, приводящие к блокированию приемников базовых станций.

Блокирование приемника БС происходит при попадании на его вход уровней сигналов превышающих значения, указанные в таблице 6.6. Помехи такого типа могут быть вызваны работой мобильных терминалов других сетей стандарта GSM вблизи БС. Для определения расстояния, с которого передатчик МС может блокировать приемник БС, необходимо пользоваться следующими выражениями. Мощность помехи на входе приемника базовой станции  $P_r$  определяется как

$$P_r = P_{ms} + G_{ams} + G_{abs} - L_{ms-bs} \quad (6.26)$$

Здесь:  $P_{ms}$  – мощность на выходе передатчика МС, в нашем случае 3 дБВт;

$G_{ams}, G_{abs}$  – коэффициенты усиления антенн базовой и мобильной станции соответственно. В нашем случае  $G_{ams} = 0$  дБ и  $G_{abs} = 15$  дБ;  $L_{ms-bs}$  – затухание на трассе распространения МС – БС.

Из (6.26) можно выразить величину необходимого затухания, которое должен претерпеть сигнал на пути распространения

$$L_{ms-bs} = P_{ms} + G_{ams} + G_{abs} - P_r \quad (6.27)$$

Результаты расчета необходимых расстояний между БС и МС приведены в таблице 6.8.

Таблица 6.8

Расстройка $\Delta f$ , кГц	Необходимое затухание, дБ	Необходимое расстояние, м
$600 \leq \Delta f < 800$	74	60
$800 \leq \Delta f < 3000$	64	0
$3000 \leq \Delta f$	61	0

Нулевые расстояния в таблице 6.8 означают, что даже если МС будет находиться непосредственно под антенной БС, то при распространении радиоволн в свободном пространстве расстояние 48,5 метров равное разности высот антенн БС и МС является достаточным, для того, чтобы получить необходимое затухание. Для этого случая оно равно 65,2 дБ.

Таким образом, в соответствии с результатами расчетов, опасными с точки зрения создания помех по блокированию приемника БС будут являться МС чужих сетей GSM, расположенные в радиусе 60 метров от БС, при том условии, что частота излучения МС отличается от частоты настройки приемника БС на 600 кГц.

#### Помехи, приводящие к интермодуляции в приемнике БС.

Для того чтобы в приемнике БС стандарта GSM возникли интермодуляционные помехи необходимо, чтобы в окрестности БС одновременно работало не менее двух МС других сетей. При этом между частотами передачи этих МС должно выполняться определенное соотношение. Кроме этого, принимая во внимание, что МС работают на передачу только в своих временных слотах, для возникновения интермодуляционной помехи необходимо пересечение во времени временных слотов работающих МС. Поскольку временные слоты разных сетей не синхронизированы, то они могут пересекаться на различное время, и интермодуляционная помеха будет формироваться в виде последовательности импульсов произвольной длины с длительностью колеблющейся от 0 до полной длительности временного слота при совпадении времени начала слотов. Для оценки условной вероятности пересечения временных слотов на входе приемника БС от двух МС разных сетей, при условии их одновременной работы можно провести следующие рассуждения. Если предположить что в одной из МС используется для передачи, например, пятый слот, то интермодуляционная помеха возникнет только в том случае если момент начала активного слота второй МС будет приходиться на длительность четвертого или пятого слота первой МС. При начале активного слота второй МС во время длительности четвертого слота первой МС интермодуляционная помеха будет формироваться в течение времени с начала пятого слота первой МС до мо-

мента окончания активного слота второй МС. При начале активного слота второй МС во время длительности пятого слота первой МС интермодуляционная помеха будет формироваться с момента начала активного слота второй МС до момента окончания пятого слота первой МС. Учитывая, что временной цикл стандарта GSM состоит из 8 временных слотов условную вероятность пересечения во времени двух активных слотов двух различных сетей GSM можно оценить как  $2/8=0,25$ . Это означает, что даже если две абонентские станции различных сетей GSM с необходимым соотношением частот находятся вблизи БС, которой они могут создать интермодуляционную помеху, и обе они одновременно работают на передачу, то помеха образуется только в четверти подобных случаев.

Для оценки расстояния, с которого возможно создание интермодуляционной помехи приемнику БС используем выражение (6.20). Учитывая то, что характеристики приемника БС в смысле противостояния интермодуляции аналогичны характеристикам приемника МС, рассмотренным выше, для определения необходимой величины затухания, которое должны претерпеть помехи от мобильных станций в процессе распространения от антенны МС до антенны БС, из (1.20) и (1.21) запишем

$$L_{ms-bs} = P_{tms} + G_{ams} + G_{abs} - P_r = 3\text{дБВт} + 0\text{дБ} + 15\text{дБ} - (-73\text{дБВт}) = 91\text{ дБ}$$

В соответствии с (6.12) можно рассчитать расстояние, соответствующее затуханию 91 дБ.

$$R = 10^{\frac{L-121,2}{33,8}} = 10^{\frac{91-121,2}{33,8}} = 10^{-0,893} = 0,128\text{ км} \quad (6.28)$$

Таким образом, создается потенциальная опасность возникновения интермодуляционной помехи в направлении приемника БС при нахождении двух работающих МС других сетей GSM на расстояниях от БС равных 128 метрам. Если МС, работающие на частотах передачи  $f_1$  и  $f_2$  находятся на различных расстояниях от БС, работающей на частоте  $f_0$ , и выполняется соотношение  $f_0 = 2f_1 - f_2$ , то предельные расстояния могут быть найдены из выражения

$$R_1^2 R_2 = R^3 \quad (6.29)$$

Здесь  $R_1$  – расстояние от БС до МС с частотой передачи  $f_1$ ,  
 $R_2$  – расстояние от БС до МС с частотой передачи  $f_2$ ,  
 $R$  – расстояние, полученное из (6.11), а именно 128 метра.



Из (6.29) можно получить следующие два выражения для определения необходимого минимального расстояния  $R_1$  ( $R_2$ ) по известному фиксированному расстоянию  $R_2$  ( $R_1$ )

$$R_1 = \sqrt{\frac{0,0021}{R_2}} \quad (6.30)$$

$$R_2 = \frac{0,0021}{R_1^2} \quad (6.31)$$

Необходимо отметить, что выражения (6.29) – (6.31) справедливы только для случаев, когда значения  $R_1$  и  $R_2$  превышают 100 метров. При значениях  $R_1 < 100$  метров величины допустимого расстояния от МС с частотой передачи  $f_1$  до БС может быть найдено из таблицы 6.9.

Таблица 6.9

Расстояние $R_1$ , м.	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Расстояние $R_2$ , м.	3150	2500	2000	1600	1270	1030	800	635	515	410	325	260	205

В таблице 6.10 представлены значения величин  $R_1$  для случаев, когда  $R_2 < 100$  метров.

Таблица 6.10

Расстояние $R_2$ , м.	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Расстояние $R_1$ , м.	285	270	255	240	226	212	200	190	180	170	160	150	140

С использованием (6.29) – (6.31) и таблиц 6.9 и 6.10 возможно определить зоны нахождения, в которых МС других сетей потенциально могут привести к созданию интермодуляционных помех приемникам БС стандарта GSM. Для этого нужно выполнить следующие действия.

Определить, в зоне обслуживания каких БС чужих сетей GSM территориально расположена рассматриваемая БС своей сети с рабочей приемной частотой  $f_0$ , и чему равны рабочие частоты приемников этих БС.

Для каждой из таких рабочих частот (например  $f_1$ ) определить две частоты в комбинации, с которыми частота  $f_1$  может создать интермодуляцион-

ную помеху третьего порядка на частоте  $f_0$  по формулам  $f_{21} = 2f_1 - f_0$  и  $f_{22} = (f_1 + f_0)/2$ .

Найти минимальные расстояния от своей БС до границ зон обслуживания БС других сетей с рабочими частотами приемников  $f_{21}$  и  $f_{22}$  ( $R_2$ ) для БС с частотой передачи  $f_{21}$  и  $R_1$  для БС с частотой передачи  $f_{22}$ .

С использованием формул (6.29) – (6.31) и таблиц 6.9 и 6.10 найти радиусы зон  $R_1$  и  $R_2$  вокруг своей БС с частотой приема  $f_0$ , пораженных интермодуляционной помехой. Большая из этих зон будет результирующей зоной вокруг своей БС, при нахождении внутри которой МС чужой сети GSM с частотой излучения  $f_1$  будет сохраняться потенциальная возможность возникновения интермодуляционной помехи.

При этом вокруг своей БС возможно определить несколько таких зон с различными радиусами. Каждая из таких зон будет определена по отношению к рабочей частоте приемника чужой БС, в зоне обслуживания которой территориально расположена своя БС.

#### Анализ полученных результатов.

Проведенные расчеты показали, что при работе на одной территории нескольких сетей GSM помехи от передатчиков МС приемникам БС по блокированию возможны только при небольших (меньших 800 кГц) расстройках между БС разных операторов с перекрывающимися зонами обслуживания при нахождении МС на расстоянии менее 60 метров от БС. Кроме этого, для каждой из БС может быть определена зона радиусом до 128 метров, работа внутри которой МС другой сети может привести к созданию интермодуляционной помехи. Размеры этой зоны в общем случае меньше размеров аналогичных зон, внутри которых передатчики БС создают помехи приемникам МС и зависят от расстояний между рассматриваемой БС своей сети и зоной обслуживания других БС имеющих определенные значения рабочих частот. В значительной мере влияние работы МС на создание интермодуляционных помех ослабляется тем фактором, что МС в отличие от БС излучение передатчика не является непрерывным, даже в момент ведения связи.

#### Помехи от БС CDMA и D-AMPS в направлении БС GSM

Проанализировав частотные планы ССС в диапазоне 800-900 МГц (рис.6.2) можно прийти к выводу, что из всех возможных направлений формирования помех наиболее проблемным, с точки зрения возникновения интермодуляционных помех и помех по блокированию приемников, является направление от передатчиков базовых станций (БС) стандартов D-AMPS и CDMA к приемникам БС стандарта GSM. Это обусловлено, в первую очередь, тем, что в этом направлении разница между частотными диапазонами

передачи и приема минимальна (рабочие диапазоны частот частично перекрываются), что в значительной мере затрудняет подавление мешающих сигналов в преселекторе. К этому необходимо добавить, что радиолиния между двумя БС имеет наивысший энергетический потенциал, вследствие использования на передаче и на приеме направленных антенн и более мощных чем у мобильных станций (МС) передатчиков, а также то, что в пределах города в большинстве случаев между антеннами БС имеется прямая видимость.

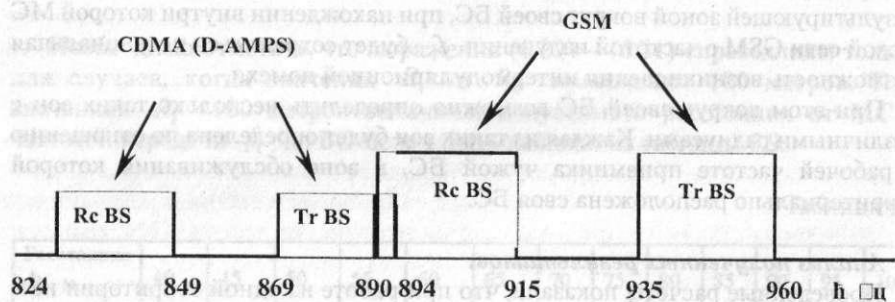


Рис.6.2

**Помехи от передатчиков БС стандартов CDMA (D-AMPS) приводящие к блокированию приемников БС стандарта GSM.**

Рассмотрим условия возникновения помех по блокированию приемников БС стандарта GSM, вызванных работой сетей сотовой связи других стандартов, для типичных характеристик БС. Неблагоприятным результатом будем считать выполнение условия

$$P_{вх.пр} > P_{блок} \quad (6.32)$$

где  $P_{вх.пр}$  – медианный уровень мешающего сигнала на входе приемника, который с достаточной степенью точности может быть определен как

$$P_{вх.пр} = P_{прд} + G_{прд} + G_{прм} - L_з - L_ф \quad (6.33)$$

где:  $P_{прд}$  – мощность передатчика базовой станции D-AMPS (CDMA), при расчетах принимается равной 13 дБВт (20 Вт);

$G_{прд}, G_{прм}$  – коэффициенты усиления антенн базовых станций стандартов D-AMPS (CDMA) и GSM соответственно, при расчетах принимаются равными 15 дБ;

$L_з$  – медианное затухание радиосигнала на линии прямой видимости, определяемое как

$$L_{з[дБ]} = 32,4 + 20 \lg(f_{[МГц]}) + 20 \lg(d_{[км]}) \quad (6.34)$$

$L_ф$  – затухание в преселекторе, функции которого в БС стандарта GSM выполняет приемный фильтр дуплексера. Измеренная характеристика затухания такого фильтра приведена на Рис. 6.3

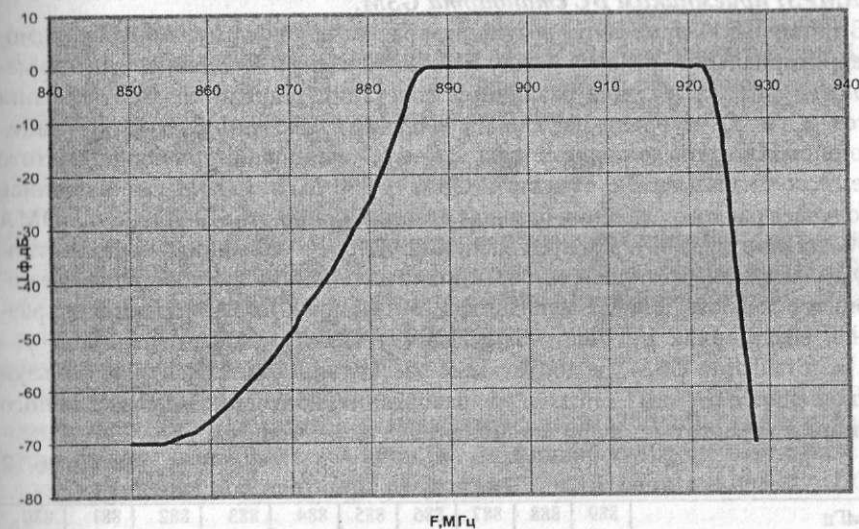


Рис. 6.3

Результаты расчета допустимых минимальных расстояний между БС (таблица 6.11) показывают, что для исключения помех по блокированию приемников БС стандарта GSM-900 при назначении частот базовым станциям стандартов D-AMPS и CDMA в верхней части частотного диапазона необходимо обеспечивать территориальный разнос между БС, который составляет несколько сотен метров. Это требование практически исключает возможность работы БС стандартов D-AMPS (CDMA) и GSM на совместных площадках.



Таблица 6.11

Частота передачи БС D-AMPS (CDMA), МГц	874	878	880	883	884	887	888	889
Необходимое расстояние между БС, м.	5	15	38	68	171	540	760	760

**Интермодуляционные помехи от передатчиков БС стандартов CDMA (D-AMPS) приемникам БС стандарта GSM.**

В таблице 6.11 приведены результаты расчетов по формулам необходимого территориального разнеса между БС в зависимости от верхней частоты мешающего сигнала  $f_1$  для различных сочетаний стандартов. Соотношения частот  $f_1$  и  $f_2$  выбраны из условия создания в приемнике интермодуляционной помехи третьего порядка вида  $2f_1 - f_2$  на нижней граничной частоте приемного диапазона БС стандарта GSM – 890 МГц. Расчеты проводились для случаев равного удаления базовых станций стандартов D-AMPS и CDMA от БС стандарта GSM и для трех значений  $\Delta P_{\text{экв}}$  – снижения эквивалентного суммарного энергетического потенциала радиолиний распространения мешающих сигналов. Если БС стандартов D-AMPS и CDMA находятся на различных расстояниях  $d_1$  (частота передачи  $f_1$ ) и  $d_2$  (частота передачи  $f_2$ ) от БС стандарта GSM, то допустимые расстояния можно найти, используя соотношение  $d_1^2 d_2 = d^3$ , где  $d$  – расстояние, полученное для указанного соотношения частот  $f_1$  и  $f_2$  из табл.6.12.

Таблица 6.12

$f_1$ , МГц		889	888	887	886	885	884	883	882	881	880		
$f_2$ , МГц		888	886	884	882	880	878	876	874	872	870		
$f_1$	$f_2$	$\Delta P_{\text{экв}}$ , дБ		$d$ , км									
D-AMPS	D-AMPS	0		17.2	16.5	11.3	7.97	4.66	2.52	1.47	0.91	0.61	0.42
D-AMPS	CDMA	0		12.6	12.2	8.29	5.87	3.43	1.85	1.08	0.67	0.45	0.31
CDMA	D-AMPS	0		9.3	8.95	6.1	4.32	2.52	1.36	0.8	0.49	0.33	0.22
CDMA	CDMA	0		6.84	6.58	4.48	3.17	1.85	1	0.59	0.36	0.24	0.17
D-AMPS	D-AMPS	50		2.51	2.41	1.65	1.17	0.68	0.37	0.22	0.13	0.09	0.06
D-AMPS	CDMA	50		1.85	1.78	1.21	0.86	0.50	0.27	0.16	0.1	0.07	0.04
CDMA	D-AMPS	50		1.36	1.31	0.89	0.63	0.37	0.2	0.12	0.07	0.05	0.03
CDMA	CDMA	50		1	0.96	0.66	0.46	0.27	0.15	0.09	0.05	0.04	0.02
D-AMPS	D-AMPS	100		0.37	0.36	0.24	0.17	0.1	0.054	0.032	0.02	0.013	0.01
D-AMPS	CDMA	100		0.27	0.26	0.18	0.13	0.07	0.04	0.023	0.015	0.01	0.007
CDMA	D-AMPS	100		0.20	0.19	0.13	0.09	0.05	0.03	0.017	0.011	0.007	0.005
CDMA	CDMA	100		0.15	0.14	0.1	0.07	0.04	0.021	0.013	0.008	0.005	0.003

Значения, полученные в таблице 6.12 для  $\Delta P_{\text{экв}} = 0$ дБ, соответствуют наилучшему случаю, когда между БС имеется прямая видимость, излучаемая мощность и коэффициенты усиления антенн в направлении взаимодействующих БС максимальны, а способность приемника противостоять интермодуляционным помехам, определяемая величиной  $P_{\text{экв}}$ , минимально удовлетворяет требованиям стандарта. Во всех других случаях значения  $d$  могут быть получены из выражения

$$d = d_0 10^{\frac{\Delta P_{\text{экв}}}{60}}$$

где  $d_0$  – расстояние, полученное для  $\Delta P_{\text{экв}} = 0$  (приведено в таблице 6.12),

Величина  $\Delta P_{\text{экв}}$  может быть определена как

$$\Delta P_{\text{экв}[дБ]} = 2\Delta P_1 + \Delta P_2 + 3\Delta P_{\text{экв}}$$

где:  $\Delta P_{1(2)}$  – величина снижения энергетического потенциала радиолинии: мешающая БС с частотой передачи  $f_{1(2)}$  – БС стандарта GSM;  $3\Delta P_{\text{экв}}$  – величина улучшения чувствительности конкретного приемника БС стандарта GSM к интермодуляции третьего порядка по сравнению со стандартным значением -73 дБВт.

Значения  $\Delta P_{1(2)}$  складываются из величин снижения мощности передатчика, коэффициентов усиления передающей и приемной антенн в направлении взаимодействующих БС и дополнительного затухания при распространении радиоволн при отсутствии прямой видимости между БС.

**Анализ полученных результатов.**

Анализ результатов, представленных в таблице 6.11 показывает, что в условиях одного города практически невозможна совместная работа подвижных сетей стандартов CDMA, D-AMPS и GSM без создания значительных помех работе сетей стандарта GSM. Этот вывод подтверждает и тот факт, что в большинстве Европейских стран ССС стандартов CDMA и D-AMPS в рассматриваемом диапазоне частот не используются. Опыт совместной работы в Украине ССС стандартов CDMA, D-AMPS и GSM показывает, что приемники БС стандарта GSM работают в условиях помех, особенно в нижней части частотного диапазона.

Одна из причин возникновения подобных помех заключается в недостаточной крутизне характеристики затухания приемного фильтра дуплекера БС стандарта GSM (рис.6.2) в области частот ниже 890 МГц. Этот недостаток объясняется тем, что стандарт GSM является европейским

стандартом ССС и, при его разработке, не предполагалась работа в Европе ССС предназначенных для других Регионов.

В сложившихся условиях для уменьшения уровня интермодуляционных помех и помех вследствие блокирования приемников можно рекомендовать следующие меры, каждая из которых имеет и свои недостатки.

Использование в БС стандарта GSM на входе приемников дополнительных фильтров. Недостатком такого метода является то, что введение в приемный тракт пассивных устройств ведет к внесению в него дополнительного затухания и, как следствие, к ухудшению чувствительности приемника. Кроме этого здесь существует некоторая нелогичность с коммерческой точки зрения – помехи создают одни операторы подвижной связи, а тратить средства на разработку и установку дополнительных фильтров должны другие...

С целью исключения возникновения в приемниках продуктов интермодуляции третьего порядка, попадающих в приемный диапазон БС стандарта GSM, необходимо использовать для работы сетей стандартов D-AMPS и CDMA полосы частот ниже 880 МГц. Такой путь также имеет свои сложности, так как в Украине уже выделена полоса частот в районе 888 МГц для работы систем стандарта CDMA.

Назначение частот БС стандартов D-AMPS и CDMA в строгом соответствии с требованиями таблиц 6.11 и 6.12. Недостаток этого пути заключается в том, что эти требования достаточно жесткие и их соблюдение будет в значительной степени сдерживать развитие в Украине сетей стандартов D-AMPS и CDMA.

### 6.3 Методы компенсаций искажений сигналов на трассах систем связи с подвижными объектами

#### 6.3.1 Разнесенный прием

Идея разнесенного приема (английский термин diversity reception, или просто diversity - разнесение) как меры борьбы с быстрыми замираниями заключается в совместном использовании нескольких сигналов, различающихся (разнесенных) по какому-либо параметру или координате, причем разнесение должно выбираться таким образом, чтобы вероятность одновременных замираний всех используемых сигналов была много меньше, чем какого-либо одного из них. Иными словами, эффективность разнесенного приема тем выше, чем менее коррелированы замирания в составляющих сигналах.

Кроме того, важны техническая реализуемость и простота используемого метода.

В принципе возможны как минимум пять вариантов разнесенного приема [4, 19,121]:

- с разнесением во времени (time diversity); при этом используются сигналы, сдвинутые во времени один относительно другого; этот метод сравнительно легко реализуем лишь в цифровой форме, и улучшение качества приема размещается на пропускную способность канала связи;

- с разнесением по частоте (frequency diversity); при этом используются сигналы, передаваемые на нескольких частотах, т.е. платой является расширение используемой полосы частот;

- с разнесением по углу, или по направлению (angle diversity, или direction diversity); при этом прием производится на несколько антенн с рассогласованными (не полностью перекрывающимися) диаграммами направленности; в этом случае сигналы с выходов разных антенн коррелированы тем слабее, чем меньше перекрытие диаграмм направленности, но при этом одновременно падает и эффективность приема (интенсивность принимаемого сигнала), по крайней мере для всех антенн, кроме одной;

- с разнесением по поляризации (polarization diversity), когда, например, две антенны принимают сигналы двух взаимно ортогональных поляризаций; практического значения этот вариант не имеет, поскольку в диапазоне СВЧ замирания на разных поляризациях сильно коррелированы;

- с разносом в пространстве (space diversity), т.е. с приемом сигналов на несколько пространственно разнесенных антенн; это единственный метод, находящий практическое применение, и именно он обычно имеется в виду, когда говорят о разнесенном приеме. Для метода пространственного разнесения, или, с учетом сказанного выше, для разнесенного приема, необходимы как минимум две приемные антенны, установленные с некоторым смещением одна относительно другой. Из общих соображений очевидно, что выигрыш от разнесенного приема тем больше, чем больше число используемых антенн, однако при этом возрастает и сложность технического решения. Поэтому практическое применение находит простейшая система с двумя приемными антеннами, и в основном в базовых станциях. В подвижных станциях сколько-нибудь широкого распространения разнесенный прием не получил. Существенными характеристиками системы разнесенного приема являются расстояние между антеннами и способ совместного использования сигналов с выходов двух антенн. Ограничимся краткими сведениями об этих характеристиках, не углубляясь в более подробный анализ. С ростом расстояния между антеннами корреляция между флуктуациями уровня принимаемых ими сигналов падает, и в этом смысле чем больше разнос антенн, тем выше эффективность разнесенного приема. Но при этом возрастает и сложность технической реализации, так что практически разнос берется минимально возможным, при котором разнесенный



прием уже достаточно эффективен. Реально с учетом как аналитических оценок, так и эмпирических данных разнос обычно составляет около десяти длин волн, т.е. порядка нескольких метров.

Что касается способов объединения сигналов с выходов двух антенн, то в принципе возможно как использование одного (более сильного) из двух сигналов, так и суммирование обоих сигналов - додетекторное (когерентное) или последетекторное, - с равными весами или со взвешиванием, обеспечивающим получение максимума отношения сигнал/шум. В случае двух приемных антенн различие в эффективности этих способов относительно невелико, и на практике обычно применяется наиболее простой из них - выбор максимального из двух сигналов с коммутацией выхода соответствующего приемника на вход тракта последующей обработки.

### 6.3.2 Режим псевдослучайной перестройки рабочих частот

Использование режима псевдослучайной перестройки рабочих частот (ППРЧ) или скачков по частоте (frequency hopping) является одним из методов расширения спектра, принципиально отличающимся от метода расширения спектра за счет модуляции прямой последовательностью (direct sequence), которая применяется в классическом методе CDMA [4,23].

Идея метода скачков по частоте состоит в том, что несущая частота для каждого физического канала периодически изменяется, т.е. каждый физический канал периодически переводится на новый частотный канал. Поскольку релеевские замирания являются частотно-селективными, то, если при работе на некоторой частоте имело место замирание, при изменении рабочей частоты на 100...300 кГц замирания с большой вероятностью не будет. Следовательно, при достаточно частых изменениях частоты существенно снижается вероятность длительных замираний, и соответственно в сочетании с перемежением снижается вероятность групповых ошибок, а с одиочными ошибками можно успешно бороться при помощи помехоустойчивого канального кодирования.

Системы радиосвязи с псевдослучайной перестройкой рабочих частот известны более 30 лет. В настоящее время они получили широкое распространение как в военной сфере, так и в мирной. Процесс расширения области применения таких систем необратим и в ближайшем будущем внимание к ним будет усиливаться.

Системы связи, использующие режим ППРЧ, является разновидностью широкополосных систем связи (ШСС) с расширением полосы и некогерентной обработкой сигнала. Системы с ППРЧ уступают классическим ШСС по скрытности и уязвимости к прицельным помехам, но по сравнению с узкополосными системами они обеспечивают заметный выигрыш как по

скрытности, так и по помехоустойчивости.

Системы связи с ППРЧ занимают особое место среди других различных систем связи, что обусловлено их специфическими свойствами:

- высокой структурной скрытностью, за счет многообразия кодовых комбинаций и видов модуляции;
- высокой энергетической скрытностью, обусловленной рассредоточением энергии в широкой полосе частот;
- высокой помехозащищенностью при действии мощных помех.

В связи с бурным развитием мобильных систем связи на Украине, в частности, транкинговых и сотовых систем, проблема обеспечения эффективности их функционирования стала на первом месте, так как резко ухудшилась электромагнитная обстановка. Для решения такой проблемы представляют интерес радиосистемы с ППРЧ.

### Классификация радиолиний с ППРЧ

К радиолиниям с ППРЧ относятся такие, у которых в процессе передачи одного сообщения происходит многократное скачкообразное изменение рабочей частоты, причем смена частот осуществляется по псевдослучайному закону. Скачкообразное изменение рабочих частот радиолинии затрудняет противодействующей стороне разведку и постановку прицельных помех, что и определяет эффективность использования таких радиолиний в условиях радиоэлектронного подавления. Очевидно, что для передачи информации по радиолинии с ППРЧ необходимо, чтобы программы смены рабочих частот приемника и передатчика были одинаковыми и, кроме того, была обеспечена их временная синхронизация. В то же время для стороннего наблюдателя и, в частности, для поставщика преднамеренных помех закон переключения рабочих частот в радиолинии должен иметь случайный характер. Это достигается использованием в радиолиниях с ППРЧ датчиков псевдослучайных последовательностей (ПСП), определяющих закон переключения рабочих частот. Временная синхронизация датчиков псевдослучайных последовательностей приемника и передатчика может осуществляться либо по специальным командам, передаваемым с использованием других видов сигналов, например, широкополосных, либо по сигналам, передаваемым в режиме ППРЧ. Как правило, установка синхронного состояния датчиков псевдослучайных последовательностей осуществляется в два этапа: грубо -- по сигналам точного времени, и затем более точно -- по сигналам, передаваемым по радиолинии.

Основными способами синхронизации систем радиосвязи с ППРЧ на сегодняшний день является:

- использование для синхронизации одной или нескольких специально частот;
- использование сигналов единого времени от какого-то центрального источника;
- использование системы единого времени, основанной на высокостабильных опорных генераторах типа рубиновых стандартов со стабильностью порядка  $10^{-10} \dots 10^{-11}$  (однако вопрос начальной установки системы единого времени остается открытым);
- использование методов асинхронного вхождения в связь (типа как в системе мобильной связи специального назначения «Арбалет») и последующего перехода в синхронный режим. Однако ни один из известных методов не обеспечивает 100% выполнение всех требований.

Структурная схема системы с ППРЧ в наиболее общем виде следующая. ПСП используется для переключения частоты несущей вместо прямой модуляции несущей. При синхронизме передающего и приемного генератора ПСП (ПСП) скачки по частоте в принятом сигнале ликвидируются, в результате чего остается первоначальным модулированный сигнал, который демодулируется обычным способом.

Ширина полосы частот для ППРЧ по существу не зависит от тактовой частоты ПСП и может выбираться путем комбинации числа и шага скачков по частоте.

При данном способе для передачи всего сообщения используются все  $N$  рабочих частот. Номера частот, на которых передаются части сообщения (пакеты информации), выбираются равновероятно из генерируемой псевдослучайной последовательности. На приемной стороне известен закон формирования номера рабочей частоты на передающей стороне. Перестройка рабочих частот происходит синхронно, за счет чего обеспечивается непрерывный прием сообщения (при отсутствии поражения пакетов информации).

Алгоритм работы радиосредств следующий. На одной рабочей частоте в радиоприемнике с ППРЧ может быть передано от нескольких сотен до единиц и долей единиц элементов сигнала.

По скорости переключения рабочих частот радиоприемника с ППРЧ можно разделить на радиоприемники с «медленной» и радиоприемники с «быстрой» ППРЧ. Для медленной ППРЧ обычно считают способ расширения спектра, при котором на каждой частотной составляющей передается один или более информационных символов. При быстрой ППРЧ каждый символ информации переносится поочередно несколькими частотными составляющими сигнала.

По ширине полосы, в которой осуществляется ППРЧ, радиоприемники можно условно разделить на радиоприемники с широкополосной и узкополосной ППРЧ. К радиоприемникам с узкополосной ППРЧ относятся такие, у которых перестройка частот осуществляется в пределах полосы пропускания приемников и передатчиков (у современных приемников и передатчиков КВ диапазона эта полоса составляет 20-40 кГц). В радиоприемнике с широкополосной ППРЧ перестройка частот осуществляется в значительно более широких полосах, чем полоса пропускания трактов приемника и передатчика.

Как правило, радиоприемники с быстрой ППРЧ являются радиоприемниками с узкополосной программной перестройкой, наоборот радиоприемники с медленной ППРЧ в большинстве случаев относятся к системам с широкополосной программной перестройкой.

В перспективе могут быть созданы комбинированные системы, у которых сигналы передаются в режиме быстрой ППРЧ, а средняя частота полосы сигнала через некоторые интервалы времени изменяется по псевдослучайному закону так же, как и в системах связи с медленной ППРЧ.

Интервалы времени работы на одной частоте как в системах с медленной, так и в системах с быстрой ППРЧ могут быть либо фиксированными, либо случайными. Изменение длительности интервалов времени работы радиоприемника на одной частоте по псевдослучайному закону еще в большей степени затрудняет постановку прицельных помех (адаптивная ППРЧ).

В режиме традиционной ППРЧ выделяется ансамбль рабочих частот и осуществляется программная перестройка приемного (передающего) устройства по ансамблю. В этом случае положительным является то, что практически невозможно следить за работой радиопередатчика. Однако, неизвестна помеховая обстановка на частотах и возможны недопустимые уровни помех, поэтому информация на некоторых частотах не будет принята или же будут значительные ухудшения в условиях приема. В этих условиях целесообразно применять режим статистически адаптивной ППРЧ – способ организации радиосвязи, при котором на основе анализа помеховой обстановки, частота работы на каждой частоте из частотных позиций выбирается обратно пропорциональной уровню помех на данной частотной позиции.

В радиоприемниках с медленной ППРЧ могут использоваться те же способы модуляции сигнала, что и в системах связи без ППРЧ, в том числе и широкополосные.

При медленной ППРЧ передача информации ведется с помощью следующих методов модуляции: ФМ или ЧМ с непрерывной фазой, относительной (или дифференциальной) ФМ, некогерентной двоичной ЧМ (2-ЧМ) и М-ичной ЧМ (М-ЧМ). Для быстрой ППРЧ используются методы некогерентной 2-ЧМ и М-ЧМ. Сигналы с ППРЧ представляют последовательность радиоимпульсов несущие частоты которых изменяются по псевдослучайному закону.



### Обзор мобильных систем специального назначения с ППРЧ

В настоящее время в Вооруженных Силах зарубежных стран состоит на вооружении около 30 типов УКВ радиостанций с ППРЧ.[129,130]. Отечественными образцами являются средства радиосвязи специального назначения типа Р-999 и Р-800Л2 (Лунь).

Анализ характеристик радиосредств показывает, что наиболее общими из них являются:

- диапазон рабочих частот от 30 до 90 МГц;
- шаг сетки частот 25 кГц;
- полоса частот ППРЧ в первых разработках была от 5 до 6,4 МГц, а в последующих расширилась до 50-60 МГц, т.е. на весь диапазон рабочих частот радиостанции;
- скорость смены рабочей частоты у разных радиостанций лежит в пределах от 50 до 500 раз в секунду;
- режим работы: телефон с частотной модуляцией, цифровой телефон, работа с аппаратурой передачи данных;
- мощность передатчиков радиостанций от 0,3 до 100 Вт.

Для сохранения секретности передаваемой информации и для того, чтобы не дать возможности противнику определить программы перестройки частоты, в радиосредствах используются устройства криптозащиты.

В развитии УКВ радиосредств с ППРЧ можно выделить следующие тенденции:

- увеличение скорости смены частот;
- доведение полосы частот ППРЧ до диапазона частот радиостанции и увеличение количества частот в программе;
- создание возможности совместной работы в радиолиниях радиосредств различной модификации.

Представителем систем связи с ППРЧ являются также системы «Tadiram», которые в настоящее время уже начинают внедряться в Украине. Они относятся к классу радиосредств фиксированной службы и обладают пропускной способностью 2,048 Мбит/с. Системы связи будут использоваться по схеме организации связи – “point to multipoint”, с самыми различными конфигурациями проектируемой сети.

В практике мобильной связи применение скачков по частоте предусмотрено стандартом GSM - используются медленные скачки с переключением частоты в каждом очередном кадре. Если учесть, что в кадре каждому физическому каналу соответствует один слот, то для любого из физических каналов такая частота скачков эквивалентна смене частотных каналов с частотой слотов.

Не рассматривая более подробных деталей технической реализации метода, отметим, что изменение частоты в пределах доступного диапазона

может быть как регулярным (циклическим), так и нерегулярным (псевдослучайным), причем в последнем случае может быть выбран любой из имеющихся в наборе вариантов псевдослучайности. Режим работы со скачками по частоте не является обязательным и назначается по команде с центра коммутации.

### 6.3.3 Эквалайзинг

Рассмотрим эквалайзинг - метод, используемый в узкополосных TDMA-системах сотовой связи для компенсации межсимвольных искажений. Термин эквалайзинг заимствован из английского языка (equalizing - буквально выравнивание) и имеет в данном случае смысл компенсации той разности хода между составляющими лучами при многолучевом распространении, которая приводит к межсимвольной интерференции. Эквалайзер по своей сути - это адаптивный фильтр, настраиваемый таким образом, чтобы сигнал на его выходе был в возможно большей степени очищен от межсимвольных искажений, содержащихся во входном сигнале.

Простейшая реализация эквалайзера (рис. 6.4) – трансверсальный.

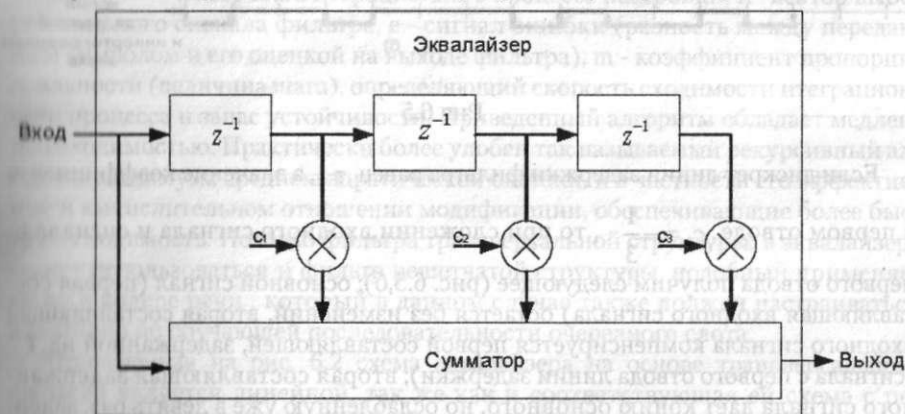


Рис. 6.4. Линейный эквалайзер на базе трансверсального фильтра с трехэлементной линией задержки.

Линейный эквалайзер на базе трансверсального фильтра с трехэлементной линией задержки - фильтр, подобный тому, который может использоваться в кодере, но с принципиально иным алгоритмом настройки. Покажем на простом примере, что такая схема может, по крайней мере в некоторых ситуациях, существенно ослабить межсимвольные искажения. Предположим, что входной сигнал эквалайзера состоит из основного сигнала - некоторой

последовательности однобитовых символов (единиц и нулей, первый график на рис. 6.5,а) и его копии, ослабленной в три раза и сдвинутой во времени на длительность  $\tau$  одного символа (второй график на рис. 6.5,а).

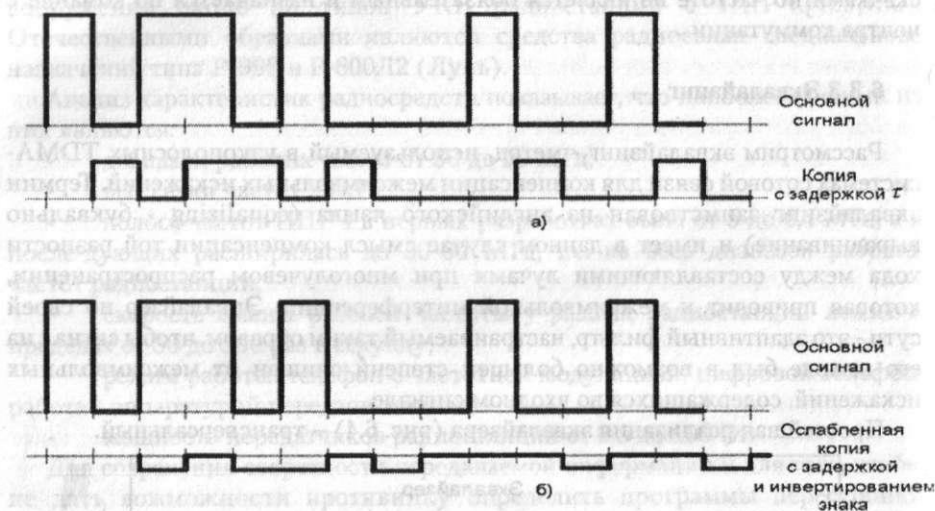


Рис 6.5

Если дискрет линии задержки фильтра равен  $\tau$ , а значение коэффициента в первом отводе  $c_1 = -\frac{1}{3}$ , то при сложении входного сигнала и сигнала с первого отвода получим следующее (рис. 6.5,б): основной сигнал (первая составляющая входного сигнала) остается без изменений, вторая составляющая входного сигнала компенсируется первой составляющей, задержанной на  $\tau$  (сигнала с первого отвода линии задержки); вторая составляющая задержанного сигнала дает копию основного, но ослабленную уже в девять раз, задержанную на  $2\tau$  и с обратным знаком. Если во втором отводе линии задержки коэффициент  $c_2 = -\frac{1}{9}$ , то при сложении трех сигналов - входного и двух задержанных - получим неизменный основной сигнал и его копию, задержанную на  $3\tau$  и ослабленную в 27 раз. Таким образом, в рассматриваемом примере добавление каждого следующего элемента линии задержки с соответствующим значением коэффициента  $c_1$  приводит к ослаблению искажающего сигнала втрое и к дополнительной задержке его во времени на  $\tau$ .

В реальной жизни, разумеется, дело обстоит сложнее, чем в описанном примере: и число лучей может быть больше двух, и задержки едва ли будут кратны дискрету линии задержки, и амплитуды составляющих сигналов, так же как и их число и задержки, не будут заранее известны. Кроме того, при перемещении абонентского аппарата вся эта картина непрерывно изменяется. Поэтому настройка фильтра производится адаптивно, в соответствии с конкретно складывающейся ситуацией, в отдельности для каждого сегмента речи, передаваемого в одном слоте эфирного интерфейса, с использованием обучающей последовательности, передаваемой в каждом слоте. Простейший алгоритм настройки фильтра, минимизирующий среднеквадратическую ошибку на его выходе - стохастический градиентный алгоритм, в соответствии с которым вектор  $C$  коэффициентов фильтра обновляется в результате последовательного применения рекуррентной процедуры:

$$C_{k+1} = C_k + \mu e_k X_k, \quad k=0,1$$

Здесь  $k$  - номер шага итерационного процесса настройки,  $X$  - вектор выборок входного сигнала фильтра,  $e$  - сигнал ошибки (разность между переданным символом и его оценкой на выходе фильтра),  $\mu$  - коэффициент пропорциональности (величина шага), определяющий скорость сходимости итерационного процесса и запас устойчивости. Приведенный алгоритм обладает медленной сходимостью. Практически более удобен так называемый рекурсивный алгоритм минимума среднеквадратической ошибки, и в частности его эффективные в вычислительном отношении модификации, обеспечивающие более быструю сходимость. Помимо фильтра трансверсальной структуры, в эквалайзере может использоваться и фильтр решетчатой структуры, подобный применяемому в коде речи, который в данном случае также должен настраиваться адаптивно по обучающей последовательности очередного слота.

Приведенная на рис. 6.2 схема эквалайзера на основе трансверсального фильтра является линейной, так же как и соответствующая ей схема с решетчатым фильтром. Линейный эквалайзер относительно прост по устройству, но имеет недостатки, проявляющиеся при больших искажениях сигналов. Более совершенными являются нелинейные эквалайзеры - схема с обратной связью по решению, схема максимально правдоподобного обнаружения символов (максимума апостериорной вероятности) и схема максимально правдоподобной оценки последовательности; в первой из этих схем могут использоваться трансверсальные или решетчатые фильтры, во второй и третьей - трансверсальные. Общая длина линии задержки фильтра должна соответствовать той разности хода лучей, для которой желательно компенсировать искажения, а дискрет линии задержки должен быть менее длительности символа.





ные методы модуляции, используемые в стандартах D-AMPS и GSM, с минимально необходимыми пояснениями.

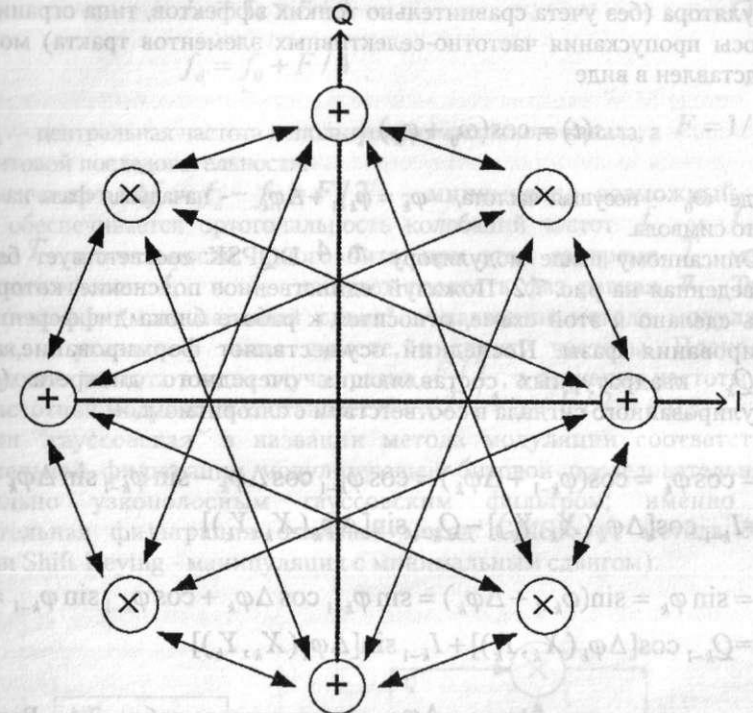
В стандарте D-AMPS используется дифференциальная квадратурная фазовая манипуляция со сдвигом  $\pi/4$  ( $\pi/4$  Differential Quadrature Phase Shift Keying -  $\pi/4$  DQPSK). По сути это - дискретная фазовая модуляция, с основным дискретом коммутации фазы  $\pi/2$  (как при обычной квадратурной фазовой манипуляции), но с дополнительным сдвигом по фазе на  $\pi/4$  при переходе от символа к символу входной модулирующей последовательности импульсов. Слово дифференциальная в названии метода означает, что очередное изменение фазы отсчитывается не по отношению к фазе некоторого опорного сигнала, а по отношению к фазе предыдущего дискрета.

При объяснении метода  $\pi/4$  DQPSK часто предварительно описывают методы бинарной фазовой манипуляции (Binary Phase Shift Keying - BPSK). т.е. фазовой манипуляции с дискретом  $\pi$  и квадратурной фазовой манипуляции (Quadrature Phase Shift Keying - QPSK) - фазовой манипуляции с дискретом  $\pi/2$ , а также метод квадратурной фазовой манипуляции со смещением (Offset Quadrature Phase Shift Keying - OQPSK). Ограничимся приведенным выше перечислением названий и перейдем непосредственно к методу  $\pi/4$  DQPSK.

В этом методе все импульсы входной информационной последовательности в модуляторе разбиваются на пары - на 2-битовые символы, и при переходе от символа к символу начальная фаза СВЧ сигнала изменяется на величину  $\Delta\varphi$ , которая определяется битами символа в соответствии с алгоритмом, приведенным в табл. 7.1

Табл. 7.1 Закон фазовой манипуляции метода  $\pi/4$  DQPSK.

Биты входной последовательности модулятора		Изменения фазы $\Delta\varphi_k = \Delta\varphi_k(X_k, Y_k)$
Нечетные (первые биты символа) $X_k$	Четные (вторые биты символа) $Y_k$	
1	1	$-3\pi/4$
0	1	$3\pi/4$
0	0	$\pi/4$
1	0	$-\pi/4$



Фазовая диаграмма (фазовое созвездие - phase constellation), соответствующая методу  $\pi/4$  DQPSK

Рис.7.1

Фазовая диаграмма, соответствующая этому методу, представлена на рис.7.1. Кружочками обозначены дискретные значения, которые может принимать фаза несущей, отсчитываемая от некоторого начального значения. Стрелками указаны возможные переходы между разрешенными значениями фазы. Оси координат соответствуют синфазной (Inphase - I) и квадратурной (Quadrature - Q) составляющим сигнала. Эта фазовая диаграмма состоит фактически из двух диаграмм обычной квадратурной фазовой манипуляции: фазовые состояния одной из них помечены значком  $\oplus$ , а другой - значком  $\otimes$ , и диаграммы сдвинуты одна относительно другой на угол  $\pi/4$ . При переходе от одного символа к другому происходит изменение фазы от одного из состояний первой диаграммы к одному из состояний второй, а при переходе к следующему символу - возврат к предыдущей диаграмме, хотя скорее всего не к прежнему фазовому состоянию. Результирующий выходной сигнал



модулятора (без учета сравнительно тонких эффектов, типа ограниченности полосы пропускания частотно-селективных элементов тракта) может быть представлен в виде

$$s(t) = \cos(\omega_0 t + \varphi_k); \quad (7.1)$$

где  $\omega_0$  - несущая частота,  $\varphi_k = \varphi_{k+1} + \Delta\varphi_k$  - начальная фаза на интервале  $k$ -го символа.

Описанному выше модулятору  $\pi/4$  DQPSK соответствует блок-схема, приведенная на рис. 7.2. Пожалуй, единственное пояснение, которое может быть сделано к этой схеме, относится к работе блока дифференциального кодирования фазы. Последний осуществляет формирование амплитуд  $I_k, Q_k$  квадратурных составляющих очередного дискрета (символа) модулированного сигнала в соответствии с алгоритмом:

$$I_k = \cos \varphi_k = \cos(\varphi_{k-1} + \Delta\varphi_k) = \cos \varphi_{k-1} \cos \Delta\varphi_k - \sin \varphi_{k-1} \sin \Delta\varphi_k = \\ = I_{k-1} \cos[\Delta\varphi_k(X_k, Y_k)] - Q_{k-1} \sin[\Delta\varphi_k(X_k, Y_k)] \quad (7.2)$$

$$Q_k = \sin \varphi_k = \sin(\varphi_{k-1} + \Delta\varphi_k) = \sin \varphi_{k-1} \cos \Delta\varphi_k + \cos \varphi_{k-1} \sin \Delta\varphi_k = \\ = Q_{k-1} \cos[\Delta\varphi_k(X_k, Y_k)] + I_{k-1} \sin[\Delta\varphi_k(X_k, Y_k)]$$

где приращение фазы  $\Delta\varphi$  определяется табл. 7.1. Выполнение вычислений упрощается тем, что каждая из величин  $\cos \varphi_k, \sin \varphi_k, I_k, Q_k$  может принимать в соответствии с рис. 6.1 лишь одно из пяти дискретных значений:  $0, \pm\sqrt{2}/2, \pm 1$ . Сумма модулированных квадратурных составляющих дает окончательный выходной сигнал:

$$I_k \cos \omega_0 t + Q_k \sin \omega_0 t = \cos \varphi_k \cos \omega_0 t + \sin \varphi_k \sin \omega_0 t = \cos(\omega_0 t - \varphi_k) = s(t) \quad (7.3)$$

Заметим, что приведенная схема - лишь иллюстрация принципа работы модулятора, а вариантов ее практической реализации, как говорят, существует по меньшей мере - столько же, сколько радиоинженеров на свете.

В стандарте GSM используется гауссовская манипуляция с минимальным сдвигом (Gaussian Minimum Shift Keying - GMSK). Этот метод представляет собой частотную манипуляцию, при которой несущая частота дискретно - через интервалы времени, кратные периоду  $T$  битовой модулирующей последовательности, - принимает значения:

$$f_i = f_0 - F/4 \quad (7.4)$$

$$f_a = f_0 + F/4,$$

где  $f_0$  - центральная частота используемого частотного канала, а  $F = 1/T$  - частота битовой последовательности.

Разнос частот  $\Delta f = f_a - f_i = F/2$  - минимально возможный, при котором обеспечивается ортогональность колебаний частот  $f_i$  и  $f_a$  на интервале  $T$  длительности одного бита; при этом за время  $T$  между колебаниями частот  $f_i$  и  $f_a$  набегает разность фаз равная  $\pi$ . Таким образом, термин "минимальный сдвиг" в названии метода модуляции относится, в указанном выше смысле, к сдвигу частоты. Поскольку модулирующая частота в этом случае равна  $F/2$ , а девиация частоты  $F/4$ , индекс частотной модуляции составляет  $m = (F/4)/(F/2) = 0,5$ .

Термин "гауссовская" в названии метода модуляции соответствует дополнительной фильтрации модулирующей битовой последовательности относительно узкополосным гауссовским фильтром; именно эта дополнительная фильтрация отличает метод GMSK от метода MSK (Minimum Shift Keying - манипуляция с минимальным сдвигом).

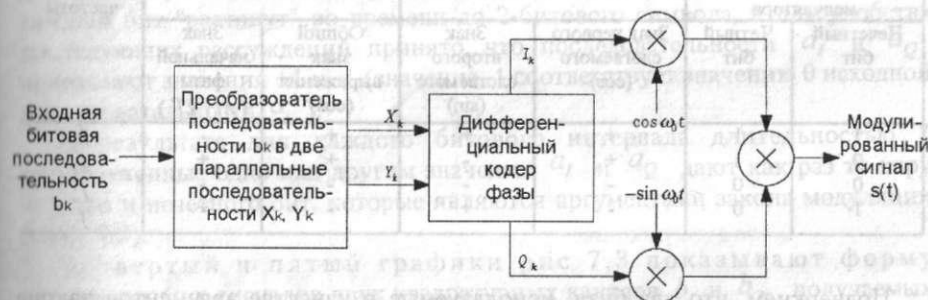


Рис.7.2

Метод MSK иногда рассматривают как метод квадратурной фазовой манипуляции со смещением (OQPSK), но с заменой прямоугольных модулирующих импульсов длительности  $2T$  полувольтными отрезками синусоид или косинусоид. Ниже мы поясним, в чем заключаются основания для такой интерпретации. Рассмотрим сначала метод MSK, а потом отметим, к каким отличиям приводит дополнительная гауссовская фильтрация.

### 7.2 Критерии выбора модуляционных форматов при передаче данных в мобильных системах связи

В методе MSK входная последовательность битовых импульсов модулятора разбивается на две последовательности, состоящие соответственно из нечетных и четных импульсов, и модулированный сигнал (выходной сигнал модулятора) на протяжении очередного  $n$ -ого бита определяется выражением зависящим от состояния текущего  $n$ -ого и предшествующего ( $n-1$ )-го бита:

$$s(t) = \pm \cos\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \cos \omega_0 t \pm \sin\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \sin \omega_0 t = \pm \cos(\omega_0 t \pm \frac{\pi t}{2T}), (n-1)T \leq t \leq nT \quad (7.5)$$

Здесь  $\omega_0 = 2\pi f_0$  - центральная частота канала, а выбор знаков "плюс" или "минус" перед соответствующими членами выражения определяется алгоритмом, приведенным в табл. 7.2.

Таблица 7.2. Закон модуляции метода MSK.

Биты входной последовательности модулятора		Знаки в первом представлении (2.1)		Знаки во втором представлении (2.1)		Значение несущей частоты
Нечетный бит	Четный бит	Знак первого слагаемого (cos)	Знак второго слагаемого (sin)	Общий знак выражения (cos)	Знак начальной фазы ( $\pi t / 2T$ )	
1	1	+	+	+	-	$f_a$
0	1	+	-	+	+	$f_a$
0	0	-	-	-	-	$f_a$
1	0	-	+	-	+	$f_a$

Подчеркнем, что два бита, используемые в качестве аргументов закона модуляции (два первых столбца в табл. 7.1), выбираются с учетом того, какой бит является текущим: если текущий бит четный, то вторым битом пары является предшествующий ему нечетный; если же текущий бит нечетный, то второй бит пары - предшествующий ему четный.

Из выражения (7.5) следует, что текущая фаза модулированного сигнала:

$$\varphi(t) = \omega_0 t \pm \frac{\pi t}{2T}$$

т.е. набег фазы на интервале  $T$  одного бита

$$\Delta\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$$

а мгновенная частота, как производная от фазы

$$\omega(t) = \frac{d[\varphi(t)]}{dt} = \omega_0 \pm \frac{\pi}{2T} = 2\pi(f_0 \pm \frac{F}{4}) \quad (7.6)$$

т.е. мгновенная частота принимает одно из двух значений -  $f_a$  или  $f_i$ , постоянное на протяжении бита, что и указано в последнем столбце табл. 6.2.

Таким образом, изменение знака начальной фазы во второй части выражения (7.5), эквивалентное изменению начальной фазы на  $\pi$ , позволяет сохранить непрерывность фазы при изменении частоты

Приведем еще одно пояснение метода MSK, которое, возможно, будет более наглядным, для чего обратимся к рис.7.3. На первом графике рис.7.3 представлен пример входной битовой последовательности  $a$  модулятора.

Второй и третий графики дают соответственно последовательности нечетных  $a_1$ , четных  $a_2$  бит входной последовательности, причем длительность каждого бита увеличена вдвое в сторону запаздывания, т.е. каждый бит "растянут" во времени до 2-битового символа, и для удобства последующих рассуждений принято, что последовательности  $a_1$  и  $a_2$  принимают значения +1 и -1 (значение -1 соответствует значению 0 исходной последовательности  $a_i$ ).

В результате для каждого битового интервала длительностью  $T$  расположенные одно над другим значения  $a_1$  и  $a_2$  дают как раз ту пару четного и нечетного бит, которые являются аргументами закона модуляции (табл. 7.2).

Четвертый и пятый графики рис 7.3 показывают форму модулирующих сигналов двух квадратурных каналов  $b_1$  и  $b_2$ , получаемых как произведения функций  $a_1$  и  $a_2$  соответственно на квадратурные

низкочастотные сигналы  $\sin(\frac{\pi t}{2T})$  и  $\cos(\frac{\pi t}{2T})$ .

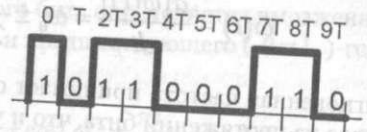
Обратим внимание на скачкообразные изменения фазы этих сигналов на  $\pi$  в моменты изменений знаков  $a_1$ ,  $a_2$ .

Окончательный модулированный сигнал согласно первой части выражения (7.5) получается как результат перемножения модулирующих сигналов квадратурных каналов с соответствующими несущими  $\sin(\omega_0 t)$  и  $\cos(\omega_0 t)$  и суммирования полученных произведений. Описанный принцип



построения модулятора MSK поясняется блок-схемой рис.7.4 (пока без учета первого блока - гауссовского фильтра G). Подчеркнем, что эта схема также служит лишь для иллюстрации принципа работы модулятора. Сочетание рис. 7.3 и 7.4 вместе с сопутствующими им комментариями являются и обещанным ранее пояснением, почему метод MSK можно интерпретировать как метод OQPSK с синусоидальными модулирующими импульсами.

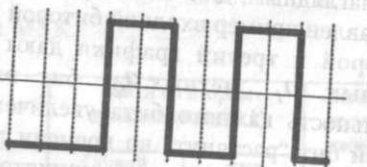
1) Входная битовая последовательность  
а



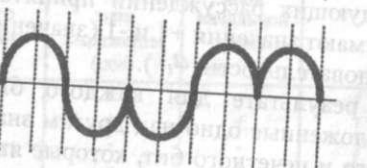
2) Нечетные биты, растянутые во времени вдвое  
а1



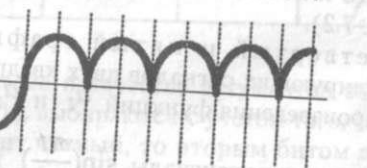
3) Четные биты, растянутые во времени вдвое  
а2



4) Модулирующий сигнал (нечетные биты)  
 $b_1 = a_1 \sin(\frac{\pi T}{2t})$



5) Модулирующий сигнал (четные биты)  
 $b_2 = a_2 \cos(\frac{\pi T}{2t})$



6) Начальная фаза модулированного сигнала  
 $\varphi_n(t)$



Рис.7.3

Из приведенных выше аналитических выражений непосредственно следует, что начальная фаза  $\varphi_1$  модулированного сигнала в методе MSK описывается линейно-ломаной кривой (график 6 на рис.7.3), т.е. зависимость  $\varphi_1(t)$  является непрерывной, но не гладкой. Добавление гауссовского фильтра, т.е. фильтра низких частот с амплитудно-частотной характеристикой в форме гауссовской кривой (блок G на рис.6.4), приводит к сглаживанию кривой  $\varphi_1(t)$  в точках излома. Ширина полосы В фильтра по уровню 3 дБ выбирается равной

$$B=0,3F;$$

$$\text{т.е. произведение } BT=0,3,$$

где T и F, как и ранее, - соответственно период и частота битовой модулирующей последовательности.

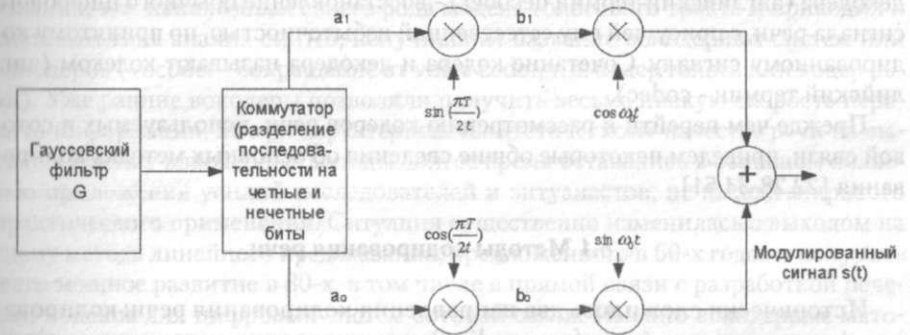


Рис.7.4

Поскольку в стандарте GSM  $F=270,833$  кГц, полоса гауссовского фильтра равна  $B=81,3$  кГц.

Введение гауссовского фильтра приводит к сужению главного лепестка и снижению боковых лепестков спектра на выходе модулятора, чем обеспечивается допустимый уровень помех по смежным частотным каналам.

В заключение раздела отметим, что методы модуляции  $\pi/4$  DQPSK и GMSK оказываются сопоставимыми по частоте битовой ошибки (BER), хотя первый из них обеспечивает несколько более высокую эффективность использования полосы частот в расчете на 1 бит передаваемой информации. Упомянем также, что метод модуляции  $\pi/4$  DQPSK используется в японском цифровом стандарте сотовой связи PDS, а метод GMSK - в стандарте DECT беспроводного телефона, но при  $BT=0,5$ .

## Глава 8. Помехоустойчивое кодирование в системах связи с подвижными объектами

Кодер речи является первым элементом собственно цифрового участка передающего тракта, следующим после АЦП. Основная задача кодера (английский термин *encoder*) - предельно возможное сжатие сигнала речи, представленного в цифровой форме, т. е. предельно возможное устранение избыточности речевого сигнала, но при сохранении приемлемого качества передачи речи. Компромисс между степенью сжатия и сохранением качества отыскивается экспериментально, а проблема получения высокой степени сжатия без чрезмерного снижения качества составляет основную трудность при разработке кодера. В приемном тракте перед ЦАП размещен декодер речи; задача декодера (английский термин *decoder*) - восстановление обычного цифрового сигнала речи, с присущей ему естественной избыточностью, по принятому кодированному сигналу. Сочетание кодера и декодера называют кодеком (английский термин - *codec*).

Прежде чем перейти к рассмотрению кодеров речи, используемых в сотовой связи, приведем некоторые общие сведения об основных методах кодирования [22,28-34,51].

### 8.1 Методы кодирования речи

Исторически сложилось два направления кодирования речи: кодирование формы сигнала (*waveform coding*) и кодирование источника сигнала (*source coding*). Первый метод основан на использовании статистических характеристик сигнала и практически не зависит от механизма формирования сигнала. Кодеры этого типа с самого начала обеспечивали высокое качество передачи речи (хорошую разборчивость и натуральность речи), но отличались меньшей по сравнению со вторым методом экономичностью. В методе кодирования формы сигнала используются три основных способа кодирования: импульсно-кодовая модуляция, ИКМ (английское наименование *Pulse Code Modulation - PCM*), дифференциальная ИКМ - ДИКМ (*Differential PCM - DPCM*) и дельта-модуляция - ДМ (*Delta Modulation - DM*). ИКМ соответствует цифровой сигнал непосредственно с выхода АЦП, в нем сохраняется вся избыточность аналогового речевого сигнала. При ДИКМ эта избыточность несколько уменьшается за счет того, что квантованию с последующим кодированием и передачей по линии связи подвергается разность между исходным речевым сигналом и его предсказанным значением, а при приеме разностный сигнал складывается с предсказанным значением, полученным по тому же алгоритму предсказания. Шкала квантования может быть равномерной, неравномерной или

адаптивно изменяемой; предсказание сигнала может быть не зависящим от формы последнего или же зависеть от формы сигнала, т. е. быть адаптивным. Если при кодировании сигнала используются элементы адаптации, то соответствующую разновидность ДИКМ называют адаптивной ДИКМ - АДИКМ (*Adaptive DPCM - ADPCM*). ДМ - это ДИКМ с односторонним квантованием, она также может быть адаптивной (АДМ). АДИКМ находит применение, например, в беспроводном телефоне с коэффициентом сжатия сигнала около 2. В сотовой связи используется исключительно второй метод кодирования, как более экономичный, - коэффициент сжатия порядка 5... 8 с увеличением его в перспективе еще вдвое.

Второй метод - кодирование источника сигнала, или кодирование параметров сигнала, - первоначально основывался на данных о механизмах речеобразования, т. е. использовал своего рода модель голосового тракта и приводил к системам типа анализ-синтез, получившим название вокодерных систем или вокодеров (*vocoder* - сокращение от *voice coder*, т. е. кодер голоса или кодер речи). Уже ранние вокодеры позволяли получить весьма низкую скорость передачи информации, но при характерном «синтетическом» качестве речи на выходе. Поэтому вокодерные методы долгое время оставались в основном областью приложения усилий исследователей и энтузиастов, не находя широкого практического применения. Ситуация существенно изменилась с выходом на сцену метода линейного предсказания, предложенного в 60-х годах и получившего мощное развитие в 80-х, в том числе в прямой связи с разработкой речевых кодеков для цифровых систем сотовой связи. Именно вокодерные методы на основе линейного предсказания и применяются в сотовой связи, причем зависимость этих методов от данных о механизмах речеобразования отступает на второй или даже третий план, а оценка передаваемых по линии связи параметров производится на основе статистических характеристик сигнала по жестко определенному алгоритму, как и при кодировании формы сигнала. Поэтому фактически граница между двумя классическими методами кодирования - кодирования формы сигнала и кодирования источника сигнала - до некоторой степени стирается.

### 8.2 Кодирование речевых сообщений

Перейдем непосредственно к кодерам речи, применяемым в сотовой связи, и рассмотрим следующие вопросы: принцип построения кодеров речи на основе метода линейного предсказания; сущность метода линейного предсказания; типы фильтров линейного предсказания, используемые в кодеках; практические схемы кодеков стандартов D-AMPS и GSM, методы оценки качества кодирования, позволяющие сопоставлять различные типы и варианты кодеков; перспективы развития методов кодирования.



Суть кодирования речи на основе метода линейного предсказания (Linear Predictive Coding - LPC) заключается в том, что по линии связи передаются не параметры речевого сигнала, как такового, а параметры некоторого фильтра, в известном смысле эквивалентного голосовому тракту, и параметры сигнала возбуждения этого фильтра. В качестве такого фильтра используется фильтр линейного предсказания. Задача кодирования на передающем конце линии связи заключается в оценке параметров фильтра и параметров сигнала возбуждения, а задача декодирования на приемном конце - в пропускании сигнала возбуждения через фильтр, на выходе которого получается восстановленный сигнал речи. Различные варианты алгоритмов кодирования отличаются от другого набором передаваемых параметров фильтра, методом формирования сигнала возбуждения и тому подобными деталями.

Метод линейного предсказания заключается в том, что очередная выборка речевого сигнала  $S_n$  с некоторой степенью точности предсказывается линейной комбинацией  $M$  предшествующих выборок:

$$S'_n = \sum_{i=1}^M a_i S_{n-i}$$

где  $a_i$  - коэффициенты линейного предсказания,  $M$  - порядок предсказания. Разность между истинным и предсказанным значениями выборки определяет ошибку предсказания (остаток предсказания):

$$e_n = S_n - S'_n = S_n - \sum_{i=1}^M a_i S_{n-i}$$

В результате Z-преобразования этого разностного уравнения получаем:

$$E(z) = S(z) - \sum_{i=1}^M a_i S(z)z^{-i} = S(z)A(z)$$

где функция  $A(z)$ :

$$A(z) = 1 - \sum_{i=1}^M a_i z^{-i}$$

интерпретируется как передаточная характеристика некоторого фильтра (инверсного фильтра или фильтра-анализатора), частотная характеристика которого обратная по отношению к частотной характеристике голосового тракта. При подаче речевого сигнала на вход инверсного фильтра на выходе фильтра получается сигнал возбуждения, подобный (с точностью до ошибок, определяемых конечностью порядка предсказания  $M$  и погрешностью оценки коэффициентов предсказания) сигналу возбуждения на входе фильтра голосового тракта.

Полученное выражение для  $A(z)$  соответствует структуре трансверсального фильтра (рис 8.1). Порядок предсказания выбирается из условия компромисса между качеством передачи речи и пропускной способностью линии связи; практически  $M$  берется порядка 10.

Значения коэффициентов предсказания, постоянные на интервале кодируемого сегмента речи (на практике длительность сегмента составляет 20 мс), находятся из условия минимизации среднеквадратического значения остатка предсказания на интервале сегмента.

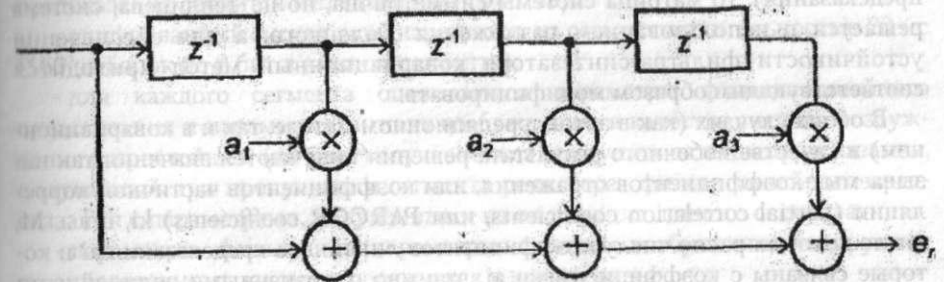


Рис 8.1. Анализирующий трансверсальный фильтр при порядке предсказания  $M = 3$

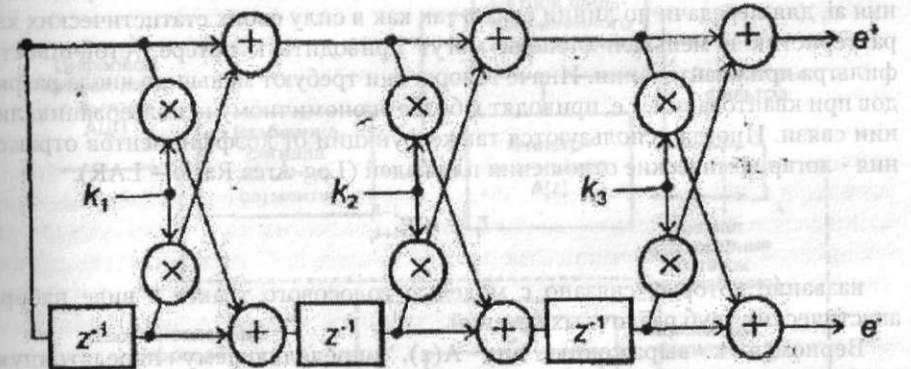


Рис 8.2. Анализирующий решетчатый фильтр при порядке предсказания  $M = 3$  ( $e^+$  и  $e^-$  - остатки предсказания вперед и назад)

Для этого частные производные  $\partial(\sum e_n^2)/\partial a_i$  приравняются к нулю, что приводит к системе  $M$  линейных уравнений с  $M$  неизвестными коэффициентами  $a_i$ . Матрица системы и метод её решения оказываются

несколько различными в зависимости от того, какими свойствами наделяется речевой сигнал на интервале преобразуемого сегмента речи.

Если речевой сигнал на этом интервале считается стационарным случайным процессом (автокорреляционный метод оценки коэффициентов предсказания), то матрица системы Теплицева, система решается с помощью итерационной процедуры алгоритма Дарбина, и фильтр-синтезатор получается заведомо устойчивым. Если речевой сигнал считается нестационарным процессом (ковариационный метод оценки коэффициентов предсказания), то матрица системы симметрична, но не Теплицева, система решается с использованием разложения Холецкого, а для обеспечения устойчивости фильтра-синтезатора ковариационный метод приходится соответствующим образом модифицировать.

В обоих случаях (как в автокорреляционном методе, так и в ковариационном) в качестве побочного результата решения получают значения так называемых коэффициентов отражения, или коэффициентов частичной корреляции (partial correlation coefficients, или PARCOR coefficients)  $k_i$ ,  $i=1 \dots M$ , число которых равно числу коэффициентов линейного предсказания  $a_i$  и которые связаны с коэффициентами  $a_i$ , взаимно однозначными нелинейными функциональными соотношениями. Коэффициенты отражения непосредственно связаны с другой формой фильтра линейного предсказания - так называемым решетчатым, или лестничным (lattice), фильтром (рис 8.2). Коэффициенты отражения  $k_i$  более удобны, чем коэффициенты линейного предсказания  $a_i$ , для передачи по линии связи, так как в силу своих статистических характеристик в меньшей степени могут приводить к потере устойчивости фильтра при квантовании. Иначе говоря, они требуют меньшего числа разрядов при квантовании, т.е. приводят к более экономичному использованию линии связи. Иногда используются также функции от коэффициентов отражения - логарифмические отношения площадей (Log-Area Ratio - LAR):

$$r_i = \log \frac{1-k_i}{1+k_i}$$

название которых связано с моделью голосового тракта в виде набора акустических труб различных сечений.

Вернемся к выражению для  $A(z)$ , определяющему передаточную характеристику фильтра-анализатора. Передаточная характеристика фильтра-анализатора  $\Pi(z)$  обратна ей с точностью до скалярного коэффициента усиления  $G$ :

$$H(z) = G/A(z).$$

Синтезирующий фильтр имеет ту же структуру, что и анализирующий (инверсный), и определяется тем же набором параметров (коэффициентов пред-

сказания  $a_i$ , или коэффициентов отражения  $k_i$ , или логарифмических отношений площадей  $r_i$ ), но входы и выходы в анализирующем и синтезирующем фильтрах меняются местами. Если на вход синтезирующего фильтра подать сигнал возбуждения, то на его выходе будет получен речевой сигнал с тем качеством, которое обеспечивается фильтром при принятом порядке предсказания, используемом числе дискретов для квантования параметров фильтра и прочих ограничениях и погрешностях того же характера.

Таким образом, процедура кодирования речи в методе линейного предсказания сводится к следующему (рис 8.3):

- оцифрованный сигнал речи нарезается на сегменты длительностью 20 мс (160 выборок по 8 бит в каждом сегменте);
- для каждого сегмента оцениваются параметры фильтра линейного предсказания и параметры сигнала возбуждения; в качестве сигнала возбуждения в простейшем (по идее) случае может выступать остаток предсказания, получаемый при пропуске сегмента речи через фильтр линейного предсказания с параметрами, полученными из оценки для данного сегмента;
- параметры фильтра и параметры сигнала возбуждения кодируются по определенному закону и передаются в канал связи.

### 8.2.1 Кодер речи



Рис. 8.3. Работа кодера речи в методе линейного предсказания



Процедура декодирования речи заключается в пропуске принятого сигнала возбуждения через синтезирующий фильтр известной структуры, параметры которого переданы одновременно с сигналом возбуждения. Подчеркнем, что как анализирующий, так и синтезирующий фильтры являются цифровыми и процедуры кодирования и декодирования речи реализуются в соответствующих вычислителях (процессорах). Сигнал на вход анализирующего фильтра поступает непосредственно с выхода АЦП, а выходной сигнал синтезирующего фильтра попадает на вход ЦАП.

Приведенное описание процессов кодирования и декодирования речи не является исчерпывающим, оно объясняет лишь принцип действия кодека. Практические схемы заметно сложнее, и это связано в основном со следующими двумя моментами.

Во-первых, описанная выше схема линейного предсказания - кратковременное предсказание (Short-Term Prediction - STP) - не обеспечивает достаточной степени устранения избыточности речи. Поэтому, в дополнение к кратковременному предсказанию, используется еще долговременное предсказание (Long-Term Prediction - LTP), в значительной мере устраняющее остаточную избыточность и приближающее остаток предсказания по своим статистическим характеристикам к белому шуму.

Во-вторых, использование остатка предсказания в качестве сигнала возбуждения оказывается недостаточно эффективным, так как требует для кодирования слишком большого числа бит. Поэтому практическое применение находят более экономичные (по загрузке канала связи, но отнюдь не по вычислительным затратам) методы формирования сигнала возбуждения. В ранних кодеках линейного предсказания для формирования сигнала возбуждения передавались сигнал тон/шум (двоичный признак, указывающий, является ли передаваемый сегмент речи вокализованным, т. е. тональным, или невокализованным, т. е. шумовым), период основного тона и амплитуда сигнала. В начале 80-х годов была предложена модель много импульсного возбуждения, не использующая классификацию сегментов речи по признаку вокализованный/не вокализованный. С этой моделью связано значительное улучшение качества кодеков линейного предсказания, и в настоящее время используются исключительно различные варианты многоимпульсного возбуждения.

Остановимся на указанных двух моментах несколько подробнее. Передаточная характеристика инверсного фильтра долговременного предсказания имеет вид:

$$P(z) = 1 - \sum_{k=-M_1}^{M_2} g_k z^{-(d+k)}$$

где  $g_k$  - коэффициенты долговременного предсказания, порядок предсказа-

ния равен  $M_1 + M_2 + 1$ , а временная задержка  $d$  соответствует периоду основного тона (для вокализованных звуков). Обычно долговременный предсказатель имеет порядок 1, т. е.  $M_1 = M_2 = 0$ , так что передаточная характеристика фильтра определяется единственным коэффициентом предсказания  $g$  и задержкой  $d$ :

$$P(z) = 1 - gz^{-d}$$

Если на вход инверсного фильтра долговременного предсказания подается остаток кратковременного предсказания  $e_n$ , то на выходе получается остаток (ошибка) долговременного предсказания  $f_n$ , равный:

$$f_n = e_n - ge_{nd}$$

Ошибка  $f_n$  весьма близка к белому гауссовскому шуму, что облегчает экономичное формирование параметров сигнала возбуждения, о чем мы расскажем чуть ниже. Параметры долговременного предсказания  $g$  и  $d$  могут быть определены, например, из условия минимизации среднеквадратического значения ошибки  $f_n$ , на некотором интервале, составляющем 20...25% от длительности передаваемого сегмента речи. Задержка  $d$  обычно заключается в пределах 20...160 интервалов дискретизации сигнала, что соответствует диапазону частот основного тона 50...400 Гц. Передаточная характеристика  $R(z)$  долговременного фильтра-синтезатора обратна  $P(z)$  с точностью до скалярного коэффициента усиления  $F$ :

$$R(z) = F/P(z)$$

Сигнал возбуждения, аппроксимирующий (в смысле выхода фильтра-синтезатора) остаток долговременного предсказания  $f_n$ , моделируется в виде определенного числа импульсов на интервале кадра возбуждения (excitation frame), составляющего обычно 20...50% от длительности передаваемого сегмента речи. Для оценки параметров последовательности импульсов сигнала возбуждения существует несколько методов [29-35]. В методе много импульсного возбуждения (Multi-Pulse Excitation - MPE) оптимизируется как положение, так и амплитуды импульсов. В методе возбуждения регулярной последовательностью импульсов (Regular-Pulse Excitation - RPE) взаимное расположение импульсов предопределено заранее - используется сетка равноотстоящих импульсов, а оптимизируется расположение этой сетки в пределах кадра возбуждения (так как обычно число импульсов возбуждения в 3...4 раза меньше числа выборок в кадре) и амплитуды импульсов. В методе стохастического кодирования, или методе линейного предсказания с кодовым

возбуждением (Code-Excited Linear Prediction -CELP), с разновидностью возбуждения векторной суммой (Vector Sum Excited Linear Prediction – VSELP), наиболее подходящий вектор возбуждения выбирается из заранее составленной кодовой книги, или кодового словаря, содержащего обычно  $2N$ ,  $N=7..10$ , квазислучайных векторов заданной длины с элементами, нормированными по амплитуде; амплитуда вектора возбуждения кодируется отдельно в соответствии с громкостью передаваемого элемента речи. Наконец, известен эффективный метод возбуждения последовательностью бинарных импульсов с преобразованием (Transformed Binary Pulse Excitation – TBPE), в котором сигналом возбуждения является последовательность равноотстоящих по времени и квазислучайных по знаку (с амплитудами  $\pm 1$ ) импульсов, умноженных на некоторую матрицу преобразования. Ограничившись приведенными общими сведениями по методам формирования сигнала возбуждения, перейдем к рассмотрению конкретных схем кодеков речи стандартов D-AMPS и GSM.

В стандарте GSM используется метод RPE-LTP (Regular Pulse Excited Long Term Predictor - линейное предсказание с возбуждением регулярной последовательностью импульсов и долговременным предсказателем). Упрощенная блок-схема кодека представлена на рис. 8.4.

Начнем с рассмотрения кодера. Блок предварительной обработки осуществляет:

- предсказание входного сигнала при помощи цифрового фильтра, подчеркивающего верхние частоты;
- нарезание сигнала на сегменты по 160 выборок (20 миллисекунд);
- взвешивание каждого из сегментов окном Хэмминга («косинус на пьедестале» - амплитуда сигнала плавно падает от центра окна к краям).

Далее для каждого 20-миллисекундного сегмента оцениваются параметры фильтра кратковременного линейного предсказания - 8 коэффициентов частичной корреляции  $k_i$ ,  $i = 1, \dots, 8$  (порядок предсказания  $M=8$ ), которые для передачи по каналу связи преобразуются в логарифмические отношения площадей  $r_i$ , причем для функции логарифма используется кусочно-линейная аппроксимация.

Сигнал с выхода блока предварительной обработки фильтруется решетчатым фильтром-анализатором кратковременного линейного предсказания, и по его выходному сигналу - остатку предсказания  $e_n$  - оцениваются параметры долговременного предсказания: коэффициент предсказания  $g$  и задержка  $d$ . При этом 160-выборочный сегмент остатка кратковременного предсказания  $e_n$  разделяется на 4 подсегмента, по 40 выборок в каждом, и параметры  $g$ ,  $d$  оцениваются для каждого из подсегментов в отдельности, причем для оценки задержки  $d$  для текущего подсегмента используется скользящий подсегмент из 40

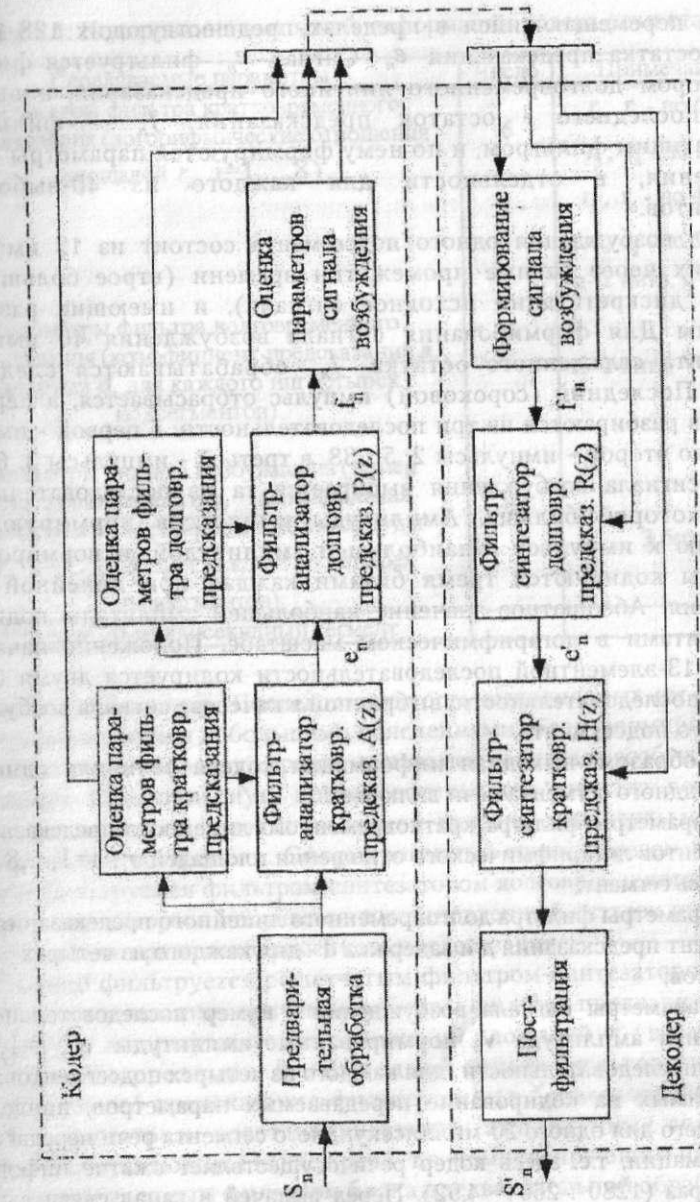


Рис.8.4. Упрощенная блок-схема кодека речи стандарта GSM



выборки, перемещающийся в пределах предшествующих 128 выборок сигнала остатка предсказания  $e_n$ . Сигнал  $e_n$  фильтруется фильтром-анализатором долговременного линейного предсказания, а выходной сигнал последнего - остаток предсказания  $f_n$  - фильтруется сглаживающим фильтром, и по нему формируются параметры сигнала возбуждения, в отдельности для каждого из 40-выборочных подсегментов.

Сигнал возбуждения одного подсегмента состоит из 13 импульсов, следующих через равные промежутки времени (второе большие, чем интервал дискретизации исходное сигнала), и имеющих различные амплитуды. Для формирования сигнала возбуждения 40 импульсов подсегмента сглаженного остатка  $f_n$  обрабатываются следующим образом. Последний (сороковой) импульс отбрасывается, а первые 39 импульсов разбираются на три последовательности: в первой - импульсы 1, 4, ..., 37, во второй - импульсы 2, 5, ..., 38, в третьей - импульсы 3, 6, ..., 39. В качестве сигнала возбуждения выбирается та из последовательностей, энергия которой больше. Амплитуды импульсов нормируются по отношению к импульсу с наибольшей амплитудой, и нормированные амплитуды кодируются тремя битами каждая при линейной шкале квантования. Абсолютное значение наибольшей амплитуды кодируется шестью битами в логарифмическом масштабе. Положение начального импульса 13-элементной последовательности кодируется двумя битами, т.е. номер последовательности, выбранной в качестве сигнала возбуждения для данного подсегмента.

Таким образом, выходная информация кодера речи для одного 20-миллисекундного сегмента речи включает:

→ параметры фильтра кратковременного линейного предсказания - 8 коэффициентов логарифмического отношения площадей  $r_i$ ,  $i=1, \dots, 8$  - один набор на весь сегмент;

→ параметры фильтра долговременного линейного предсказания - коэффициент предсказания  $d$  и задержка  $d$  - для каждого из четырех подсегментов;

→ параметры сигнала возбуждения - номер последовательности  $n$ , максимальная амплитуда  $V$ , нормированные амплитуды  $d_i$ ,  $i=1, \dots, 13$ , импульсов последовательности - для каждого из четырех подсегментов. Число бит, отводимых на кодирование передаваемых параметров, приведено в табл.8.1. Всего для одного 20-миллисекундного сегмента речи передается 260 бит информации, т.е. здесь кодер речи осуществляет сжатие информации почти в 5 раз ( $1280 : 260 = 4,92$ ). Перед выдачей в канал связи выходная информация кодера речи также подвергается дополнительно каналному кодированию.

Табл. 8.1. Кодирование выходной информации кодера речи стандарта

Передаваемые параметры	Число	Примечания
Параметры фильтра кратковременного предсказания (логарифмические отношения площадей $r_i$ , $i=1, \dots, 8$ )	6	$r_1, r_2$ - по 6 бит $r_3, r_4$ - по 5 бит $r_5, r_6$ - по 4 бита $r_7, r_8$ - по 3 бита g- 2 бита, d- 7 бит
Параметры фильтра долговременного предсказания (коэффициент предсказания $d$ , задержка $d$ , для каждого из четырех подсегментов)	6	n- 2 бита, V- 6 бит
Параметры сигнала возбуждения (номер последовательности $n$ , максимальная амплитуда $V$ , нормированные амплитуды $d_i$ , $i=1, \dots, 13$ , для каждого из четырех подсегментов)	88	3 бита
Всего за 20-миллисекундный сегмент		

**Перейдем к декодеру.** Последовательность выполняемых им функций в общем мы ограничимся небольшими пояснениями. Блок формирования сигнала возбуждения, используя принятые параметры сигнала возбуждения, восстанавливает 13-импульсную последовательность сигнала возбуждения для каждого из подсегментов сигнала речи, включая амплитуды импульсов и их расположение во времени. Сформированный таким образом сигнал возбуждения фильтруется фильтром-синтезатором долговременного предсказания, на выходе которого получается восстановленный остаток предсказания фильтра-анализатора кратковременного предсказания.

Последний фильтруется решетчатым фильтром-синтезатором кратковременного предсказания, причем параметры фильтра предварительно преобразуются из логарифмических отношений площадей  $r_i$ ; в коэффициенты частичной корреляции  $k_i$ . Выходной сигнал фильтра-синтезатора кратковременного предсказания фильтруется (в блоке пост-фильтрации) цифровым фильтром, восстанавливающим амплитудные соотношения частотных составляющих сигнала речи, т.е. компенсирующим предсказание, внесенное входным фильтром блока предварительной обработки кодера. Сигнал на выходе постфильтра является восстановленным цифровым сигналом речи.

Таким образом, мы рассмотрели все намеченные вопросы, относящиеся к собственно кодированию речи в сотовой связи. Однако, прежде чем закончить этот раздел, остановимся еще на двух вопросах: методах оценки качества кодирования и непрерывно продолжающемся прогрессе в технике кодирования.

### 8.2.2 Методы оценки качества кодирования

Из предшествующего изложения ясно, что создание экономичного и совершенного кодека речи является сложным творческим процессом, связанным с непрерывными поисками и находками, причем многие технические решения настолько разнородны, что их сопоставление само по себе оказывается непростой задачей. Поэтому совершенно необходимы методы и критерии, позволяющие более или менее объективно сопоставлять и оценивать различные методы кодирования и на основании этих оценок принимать обоснованные решения. Такие методы существуют, и основные критерии в них связаны с восприятием речи человеком, т.е. с экспертными оценками.

При оценке качества кодирования и сопоставлении различных кодеков оцениваются разборчивость речи и качество синтеза (качество звучания) речи. Для оценки разборчивости речи используется метод DRT (Diagnostic Rhyme Test - диагностический рифмованный тест). В этом методе подбираются пары близких по звучанию слов, отличающихся отдельными согласными (типа “дот – тот”, “кол – гол”), которые многократно произносятся рядом дикторов, и по результатам испытаний оценивается доля искажений. Метод позволяет получить как оценку разборчивости отдельных согласных, так и общую оценку разборчивости речи.

Для оценки качества звучания используется критерий DAM (Diagnostic Acceptability Measure - диагностическая мера приемлемости). Испытания заключаются в чтении несколькими дикторами, мужчинами и женщинами, ряда специально подобранных фраз, которые прослушиваются на выходе тракта связи рядом экспертов-слушателей, выставляющих свои оценки по 5-балльной шкале. Результатом является средняя субъективная оценка, или средняя оценка мнений (Mean Opinion Score - MOS). Хотя этот метод является субъективным по своей сути, его результаты по сопоставлению различных типов кодеков при проведении испытаний одними и теми же группами дикторов и экспертов-слушателей являются, по-видимому, достаточно объективными, и на них основываются практически все выводы и решения. Результаты экспериментальной оценки разборчивости речи мобильных телефонов при работе на национальных сотовых сетях связи данным методом мы приведем в главе 10.

В качестве примера в табл. 8.2 приведены результаты оценки четырех типов кодеков. Близкие к шкале MOS результаты дает объективный метод оценки качества с использованием понятия кепстрального расстояния (Cepstrum Distance-CD)

Из сказанного ясно также, что существует множество вариантов кодеков речи, в том числе в классе кодеков линейного предсказания, из числа которых приходится выбирать кодек для системы сотовой связи. В частности, при разработке стандарта GSM были тщательно исследованы шесть типов кодеков-кандидатов, после чего выбор был остановлен на кодеке RPE-LTP. Работа по выбору типа кодека для стандарта GSM была завершена в 1988 г., а в 1989 г. был предложен метод VSELP, принятый затем в стандарте D-AMPS. Интенсивные работы по совершенствованию кодеков речи продолжаются и в настоящее время. Обои стандартами - и D-AMPS, и GSM - предусмотрено введение полускоростного кодирования, которое сможет увеличить пропускную способность канала связи еще вдвое.

Табл. 8.2. Оценка кодеков речи по шкале MOS

Тип кодека	Темп передачи информации, Кбит/с	Оценка MOS
PCM	64	4.12
ADPCM	32	3.78
ARPE-LTP (стандарт GSM)	13	3.58
VSELP (стандарт D-AMPS)	8	3.44

В числе исследуемых вариантов для стандарта D-AMPS рассматривается возможность введения векторного квантователя параметров линейных спектральных пар с расщеплением и межкадровым предсказанием, а для стандарта GSM - использование метода кодирования CELP.

В стандарте D-AMPS уже начинает применяться усовершенствованный полноскоростной кодек - алгебраический кодек линейного предсказания с кодовым возбуждением (algebraic code-book excited linear prediction/enhanced full rate - ACELP-EFR), а в стандарте GSM - свой вариант усовершенствованного полноскоростного кодека [51].

### 8.3 Канальное кодирование

Кодер канала - второй (и последний) элемент собственно цифрового участка передающего тракта. Он следует после кодера речи и предшествует модулятору, осуществляющему перенос информационного сигнала на несущую частоту. Основная задача кодера канала - помехоустойчивое кодирование сигнала речи, т.е. такое его кодирование, которое позволяет обнаруживать и в



значительной мере исправлять ошибки, возникающие при распространении сигнала по радиоканалу от передатчика к приемнику. Помехоустойчивое кодирование осуществляется за счет введения в состав передаваемого сигнала довольно большого объема избыточной (контрольной) информации. В английской терминологии такое кодирование носит наименование Forward Error Correcting coding (FEC coding), т.е. кодирование с упреждающей коррекцией ошибок, или кодирование с коррекцией ошибок на проходе<sup>1</sup>). В сотовой связи помехоустойчивое кодирование реализуется в виде трех процедур - блочного кодирования (block coding), сверточного кодирования (convolutional coding) и перемежения (interleaving). Кроме того, если оставаться в рамках блок-схемы, кодер канала выполняет еще ряд функций:

- добавляет управляющую информацию, которая, в свою очередь, также подвергается помехоустойчивому кодированию;
- упаковывает подготовленную к передаче информацию и сжимает ее во времени;
- осуществляет шифрование передаваемой информации, если таковое предусмотрено режимом работы аппаратуры.

Последовательность выполнения этих задач показана на блок-схеме рис. 8.5.

Начало технике помехоустойчивого кодирования было положено оригинальной работой Шеннона (1948 г.), который, в частности, показал, что если пропускная способность канала связи больше требуемой скорости передачи информации, т.е. больше производительности источника информации то при использовании соответствующего алгоритма помехоустойчивого кодирования для данного канала можно построить систему связи со сколь угодно малой вероятностью ошибки на выходе [22].

Правда, доказав существование необходимых помехоустойчивых кодов, Шеннон не указал методов их построения, и для решения этой задачи потребовались значительные усилия и значительное время. Первый блочный код был предложен Хэммингом в 1950 г.; первый сверточный код - Элиасом в 1955 г. В последующие годы помехоустойчивое кодирование получило развитие, прежде всего в направлениях построения хороших кодов и удобных схем кодирования и декодирования.

Начало практического применения методов помехоустойчивого кодирования в цифровых системах связи и цифровых системах памяти относится к концу 70-х - началу 80-х годов.

Дальнейшее знакомство с работой кодера канала построим следующим

<sup>1</sup> В качестве альтернативы возможно значительно более простое помехоустойчивое кодирование, позволяющее лишь обнаруживать ошибки, но не исправлять их. Если при этом нужна коррекция ошибок, то сообщения, содержащие ошибки, передаются повторно - это коррекция ошибок с перезапросом (Automatic Repeat Request, ARQ -запрос автоматического повторения, или перезапрос). Коррекция ошибок с перезапросом используется, например, в беспроводном телефоне

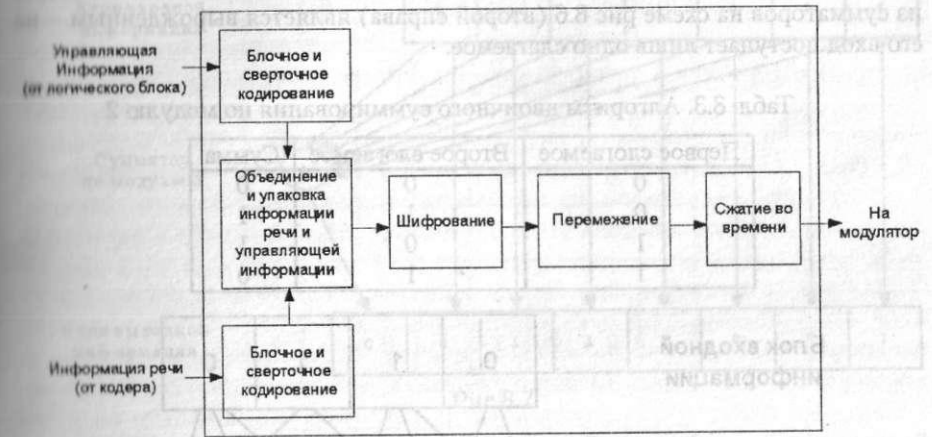


Рис. 8.5 Последовательность задач, решаемых кодером канала

образом. Сначала мы в общих чертах познакомимся с блочным и сверточным кодированием и перемежением, затем рассмотрим конкретные схемы канальных кодеров стандартов D-AMPS и GSM, и в заключение приведем сводку потоков информации в кодерах обоих стандартов. При блочном кодировании (рис. 8.6) входная информация разделяется на блоки, содержащие по  $k$  символов каждый, которые по определенному закону преобразуются кодером в  $n$ -символьные блоки, причем  $n > k$ .

Отношение  $R = \frac{k}{n}$  носит наименование скорости кодирования (coding rate)

и является мерой избыточности, вносимой кодером. При рационально построенном кодере меньшая скорость кодирования, т.е. большая избыточность, соответствует более высокой помехоустойчивости.

Повышению помехоустойчивости способствует также увеличение длины блока. Блочный кодер с параметрами  $n, k$  обозначается  $(n, k)$ . Если символы входной и выходной последовательностей являются двоичными, т.е. состоят из одного бита каждый, то кодер называется двоичным (binary); именно двоичные кодеры используются в сотовой связи. Схема, представленная на рис. 8.6, соответствует двоичному блочному кодеру  $(5, 4)$ . Каждый бит блока выходной информации получается как сумма по модулю 2 нескольких бит (от одного до  $k$ ) входного блока, для чего используется  $n$  сумматоров по модулю 2.

Правила двоичного суммирования по модулю 2 определяются табл. 8.3. Один из сумматоров на схеме рис 8.6 (второй справа) является вырожденным – на его вход поступает лишь одно слагаемое.

Табл. 8.3. Алгоритм двоичного суммирования по модулю 2

Первое слагаемое	Второе слагаемое	Сумма
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

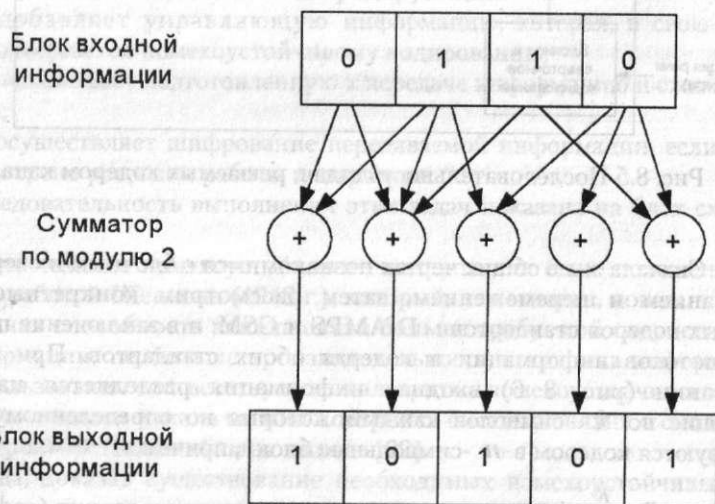


Рис.8.6

На рис. 8.7 показана схема другого блочного кодера - это так называемый систематический кодер. Отличительная особенность систематического кодера состоит в том, что в состав блока выходной информации включается полностью блок входной информации; тривиальные сумматоры, соответствующие формированию этой части выходного блока, на схеме не показаны. Систематический кодер рис 8.7 - простейший: выходной блок, помимо копии входного, содержит лишь один избыточный бит, который является суммой по модулю 2 всех бит входного блока.

Этот избыточный бит называется кодом контроля четности, поскольку, как нетрудно убедиться, число единиц в выходном блоке, с учетом контрольного бита, оказывается четным. Для 8-битового блока двоичной информации

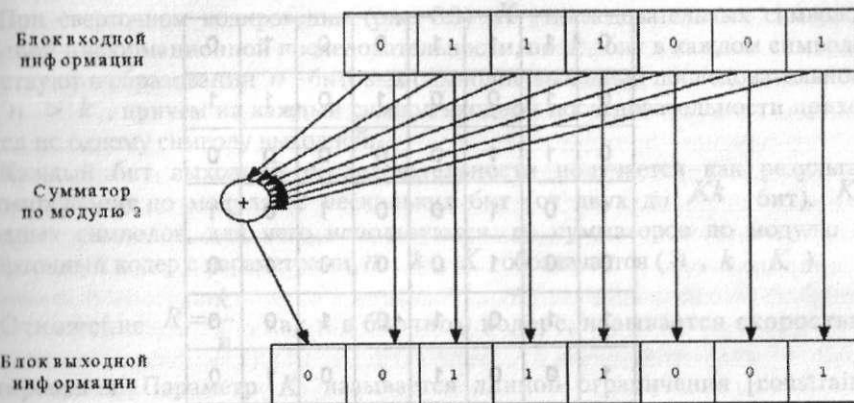


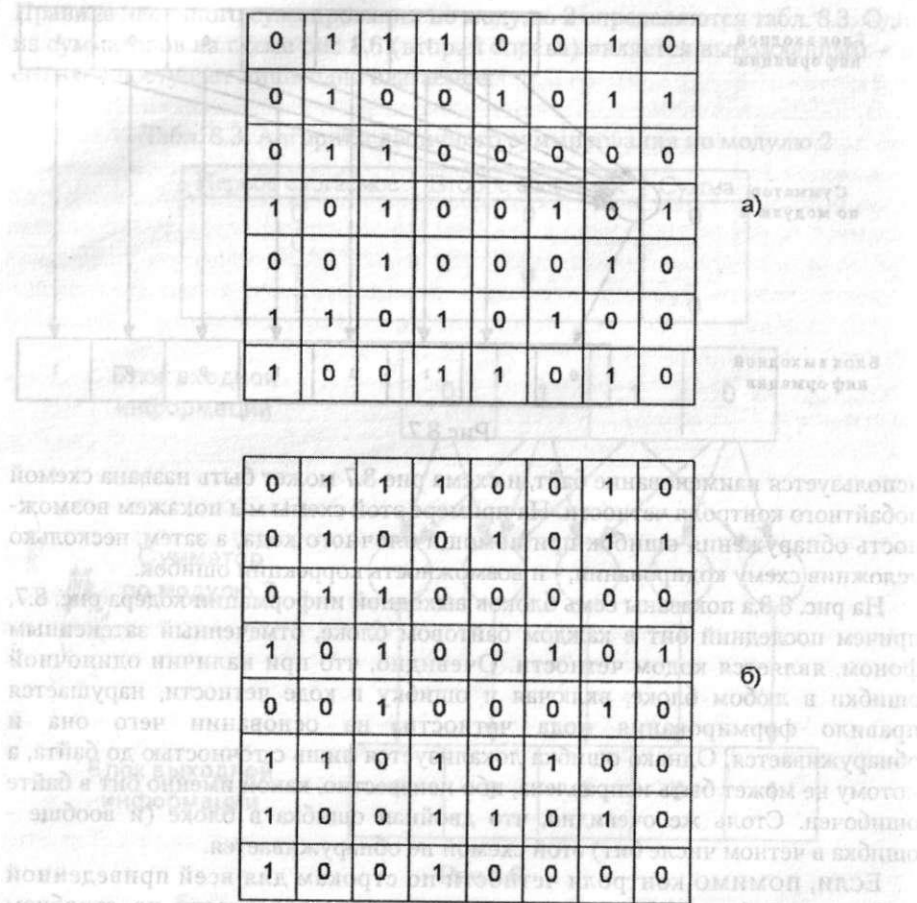
Рис.8.7

используется наименование байт, и схема рис 8.7 может быть названа схемой побайтного контроля четности. На примере этой схемы мы покажем возможность обнаружения ошибок при помощи блочного кода, а затем, несколько усложнив схему кодирования, - и возможность коррекции ошибок.

На рис. 8.8,а показаны семь блоков выходной информации кодера рис. 8.7, причем последний бит в каждом байтовом блоке, отмеченный затененным фоном, является кодом четности. Очевидно, что при наличии одиночной ошибки в любом блоке, включая и ошибку в коде четности, нарушается правило формирования кода четности, на основании чего она и обнаруживается. Однако ошибка локализуется лишь с точностью до байта, а потому не может быть исправлена, ибо неизвестно, какой именно бит в байте ошибочен. Столь же очевидно, что двойная ошибка в блоке (и вообще - ошибка в четном числе бит) этой схемой не обнаруживается.

Если, помимо контроля четности по строкам для всей приведенной информации (рис. 8.8,а), ввести еще и контроль четности по столбцам (нижняя строка на рис 8.8,б), то при наличии одиночной ошибки в этом 64-битовом блоке мы сможем указать не только строку, содержащую ошибку, но и столбец с ошибкой, а следовательно - и ошибочный бит, лежащий на пересечении этих строки и столбца. А если известно, что бит ошибочен, то он элементарно исправляется, поскольку для этого достаточно заменить ноль на единицу или единицу на ноль - в зависимости от того, каково значение ошибочного бита. Кратные ошибки этой схемой уже не исправляются. Для коррекции кратных ошибок нужно использовать более совершенные (и более сложные) схемы кодеров. Заметим, что рис. 8.8,б соответствует систематическому двоичному блочному кодеру (64, 49), и при желании его схема без труда может быть построена по аналогии с рис. 8.7.





К возможности обнаружения и коррекции ошибок при блочном кодировании

- а - побайтовый контроль четности позволяет обнаружить одиночные ошибки в байтах
- б - добавление еще 8 бит контроля позволяет исправлять одиночную ошибку в восьми байтах

Рис.8.8

При сверточном кодировании (рис. 8.9)  $K$  последовательных символов входной информационной последовательности, по  $k$  бит в каждом символе, участвуют в образовании  $n$  -битовых символов выходной последовательности,  $n > k$ , причем на каждый символ входной последовательности приходится по одному символу выходной.

Каждый бит выходной последовательности получается как результат суммирования по модулю 2 нескольких бит (от двух до  $Kk$  бит).  $K$  входных символов, для чего используются  $n$  сумматоров по модулю 2. Сверточный кодер с параметрами  $n, k, K$  обозначается  $(n, k, K)$ .

Отношение  $R = \frac{k}{n}$ , как и в блочном кодере, называется скоростью кодирования. Параметр  $K$  называется длиной ограничения [constraint length]; он определяет длину сдвигового регистра (в символах), содержимое которого участвует в формировании одного выходного символа.

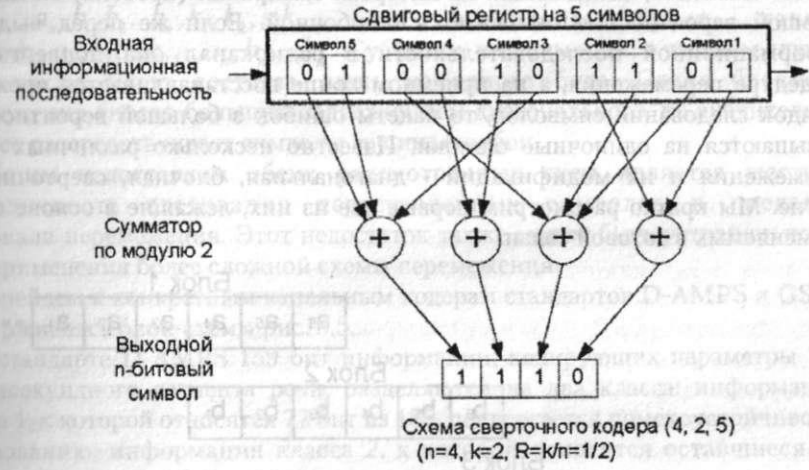
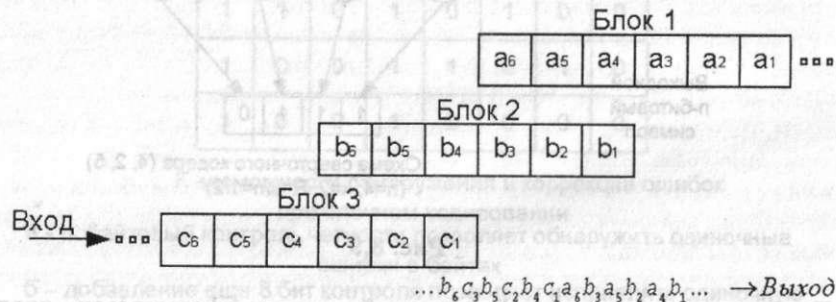


Рис. 8.9

После того как очередной выходной символ сформирован, входная последовательность сдвигается на один символ вправо (рис. 8.9), в результате чего символ 1 выходит за пределы регистра, символы 2...5 перемещаются вправо, каждый на место соседнего, а на освободившееся место записывается очередной символ входной последовательности, и по новому содержимому регистра формируется следующий выходной символ. Название сверточного кода обязано тому, что он может рассматриваться как свертка импульсной

характеристики кодера и входной информационной последовательности. Если  $k=1$ , т.е. символы входной последовательности однобитовые, сверточный кодер называется двоичным. Сверточный кодер, схема которого приведена на рис. 8.9, не является двоичным, поскольку для него  $k=2$ .

Переमेжение представляет собой такое изменение порядка следования символов информационной последовательности, т.е. такую перестановку, или перетасовку, символов, при которой стоявшие рядом символы оказываются разделенными несколькими другими символами. Такая процедура предпринимается с целью преобразования групповых ошибок (пакетов ошибок) в одиночные ошибки, с которыми легче бороться с помощью блочного и сверточного кодирования. Использование перемежения - одна из характерных особенностей сотовой связи, и это является следствием неизбежных глубоких замираний сигнала в условиях многолучевого распространения, которое практически всегда имеет место, особенно в условиях плотной городской застройки. При этом группа следующих один за другим символов, попадающих на интервал замирания (провала) сигнала, с большой вероятностью оказывается ошибочной. Если же перед выдачей информационной последовательности в радиоканал она подвергается процедуре перемежения, а на приемном конце восстанавливается прежний порядок следования символов, то пакеты ошибок с большой вероятностью рассыпаются на одиночные ошибки. Известно несколько различных схем перемежения и их модификаций - диагональная, блочная, сверточная и другие. Мы кратко рассмотрим первые две из них, лежащие в основе схем, применяемых в сотовой связи.



Пример схемы диагонального перемежения

Рис.8.10

При диагональном перемежении входная информация делится на блоки, а блоки - на субблоки, и в выходной последовательности субблоки,

например, второй половины предыдущего блока чередуются с субблоками первой половины следующего блока. Такая схема иллюстрируется рис. 8.10, где каждый блок состоит из шести субблоков, и субблоки первого блока обозначены  $a_i$ , второго -  $b_i$ , третьего -  $c_i$ . Субблок может состоять из нескольких символов, или из одного символа, или даже из одного бита. Приведенная схема диагонального перемежения вносит малую задержку, но расставляет соседние символы лишь через один, т.е. рассредоточение ошибочных символов группы получается сравнительно небольшим.

При блочном перемежении входная информация также делится на блоки, по  $n$  субблоков (или символов) в каждом, и в выходной последовательности чередуются субблоки  $k$  последовательных блоков. Работу этой схемы можно представить себе в виде записи блоков входной последовательности в качестве строк матрицы размерности  $k \times n$  (рис. 8.11), считывание информации из которой производится по столбцам. Следовательно, если входная последовательность в этом примере имела вид:  $a_1, a_2, \dots, a_n, b_1, b_2, \dots, b_n, k_1, k_2, \dots, k_n$  то выходная будет такой:  $a_1, b_1, \dots, k_1, a_2, b_2, \dots, k_2, \dots, a_n, b_n, \dots, k_n$ . Субблоки, или символы, в частном случае здесь также могут состоять лишь из одного бита. Схема блочного перемежения вносит большую задержку, чем диагонального, но значительно сильнее рассредотачивает символы группы ошибок.

Общим недостатком обеих рассмотренных схем является жесткая периодичность следования переставленных символов в пределах интервала перемежения. Этот недостаток также может быть устранен, но за счет применения более сложной схемы перемежения.

Перейдем к конкретным канальным кодерам стандартов D-AMPS и GSM, придерживаясь блок-схемы рис. 8.5.

В стандарте D-AMPS 159 бит информации, кодирующих параметры 20-миллисекундного сегмента речи, разделяются на два класса: информация класса 1, к которой относятся 77 бит из 159, подвергается помехоустойчивому кодированию; информация класса 2, к которой относятся оставшиеся 82 бита, передается без блочного или сверточного кодирования.

К классу 1 относятся:

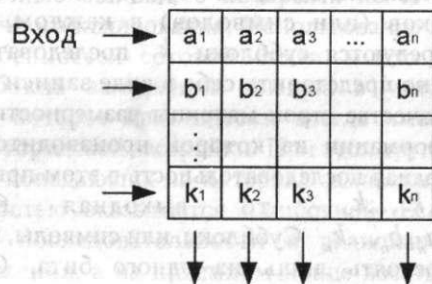
- 4 бита из 5 амплитудного множителя  $P$ ;
- 4 бита из 6 первого коэффициента частной корреляции  $k_1$ ;
- по 3 бита из 5 для коэффициентов  $k_2$  и  $k_3$ ;
- 2 бита из 4 для коэффициента  $k_4$ ;
- 1 бит из 4 для коэффициента  $k_5$ ;
- вес 7 бит для каждой из четырех задержек  $d$  фильтра долговременного предсказания;



- все 8 бит для каждой из четырех комбинаций, кодирующих коэффициенты усиления  $g$ ,  $Y_1$ ,  $Y_2$ .

Кроме того, из 77 бит класса 1 выделяются 12 бит, субъективно наиболее значимых для передачи речи:

- 3 бита из амплитудного множителя  $P$ ;
- 3 бита из коэффициента  $k_1$ ;
- по 2 бита из коэффициентов  $k_2$  и  $k_3$ ;
- по 1 биту из коэффициентов  $k_4$  и  $k_5$ .



Выход

Схема блочного перемежения

Рис. 8.11

Для этих 12 бит вычисляется 7-битовый код циклического контроля избыточности (CRC - Cyclic Redundancy Check), или просто код четности (parity code), который дополняется пятью нулями, и полученные 12 бит присоединяются к 77 битам класса 1.

Полученные 89 бит информации подвергаются двоичному сверточному кодированию со скоростью  $R = 1/2$  и длиной ограничения  $K = 5$ , давая на выходе кодера свертки 178 бит. Вместе с 82 битами класса 2 это составляет 260 бит, что по объему соответствует одному слоту канала трафика. Таким образом поток информации речи на выходе кодера канала составляет 260 бит/20 мс, или 13 кбит/с.

При декодировании информации речи прежде всего производится сверточное декодирование 89 бит информации класса 1, и кода четности с коррекцией ошибок в пределах возможностей кода свертки. Затем производится контроль правильности 12 наиболее значимых бит, для чего по этим 12 битам из состава принятой информации вновь вычисляется 7-битовый код четности, который сравнивается с принятым кодом четности.

При совпадении обоих кодов информация речи подвергается последующей обработке. При несовпадении логика обработки зависит от числа несовпадений подряд.

При первом или втором (подряд) несовпадении параметры  $P$  и  $k_i$  принятого сообщения заменяются соответствующими параметрами из последнего сообщения, в котором не было ошибки кода четности, и дальнейшая обработка производится обычным порядком.

При третьем, четвертом и пятом подряд несовпадениях в дополнение к этому множитель  $P$  уменьшается соответственно на 4, 8 или 12 дБ. При шести и более несовпадениях подряд множитель  $P$  устанавливается равным нулю, т.е. принятый сигнал речи заглушается, и для возврата к нормальной обработке требуется двукратное выполнение контроля четности.

Информация канала FACCH, передаваемая вместо информации речи в поле Data подвергается блочному и сверточному кодированию в полном объеме. Сообщение канала FACCH передается словами по 49 бит, из которых 1 бит - флажок продолжения, и 48 бит - собственно данные сообщения. Число слов в сообщении не ограничивается. Сначала для 49-битового слова вместе с предшествующим ему 8-битовым кодом DVCC вычисляется 16-битовый код циклического контроля избыточности (код четности), который добавляется к 49 битам слова канала FACCH, образуя 65 бит. Далее это 65-битовое слово подвергается двоичному сверточному кодированию со скоростью  $R = 1/4$  и длиной ограничения  $K = 6$ ; результирующие 260 бит заполняют два 130-битовых поля Data одного слота. При этом в слоте нет никакого флажка, помечающего замену информации речи информацией управления канала FACCH. Поэтому при декодировании сначала предпринимается попытка декодировать содержимое поля Data как информацию речи, а при неудаче - попытка декодировать его как информацию канала FACCH. Если в последнем случае обнаруживается ошибка в коде четности, это означает наличие ошибки в декодированной информации управления, и она не принимается к исполнению.

Информация канала SACCH, передаваемая в соответствующем поле слота канала трафика, также подвергается блочному и сверточному кодированию - в значительной мере аналогично информации канала FACCH. Сообщения канала SACCH передаются словами по 50 бит, из которых 1 бит - флажок продолжения, 1 бит - резервный (нуль) и 48 бит - данные сообщения. Эти 50 бит дополняются 16-битовым кодом четности, вычисляемым так же, как и для информации канала FACCH и результирующее 66-битовое слово подвергается двоичному сверточному кодированию со скоростью  $R = 1/2$  и длиной ограничения  $K = 5$ . Результирующие 132 бита распределяются (с учетом перемежения) по 12-битовым полям SACCH 22 последовательных слотов канала трафика. Передаваемая информация речи, а также

управляющая информация каналов FACH и SACCH подвергается перемежению.

Для информации речи и информации канала FACH используется общая схема перемежения, которая может быть названа блочно-диагональной. В схеме перемежения участвует информация двух смежных 20-миллисекундных сегментов. Входная информация схемы перемежения записывается по битно по строкам в матрицу типа показанной на рис. 8.11, с числом строк  $k = 10$  и числом столбцов  $n = 26$ , причем четные столбцы берутся из текущего сегмента, а нечетные - из предыдущего; выдача информации производится по столбцам. При приеме схема деперемежения восстанавливает исходный порядок следования информации. Для информации канала SACCH используется схема диагонального перемежения типа показанной на рис. 8.10, но с битовым чередованием информации в пределах не двух, а двенадцати последовательных блоков, и со сдвигом последовательных 12-битовых блоков не на половину блока, а на один бит. После объединения информации речи (или заменяющей ее информации канала FACH) и управляющей информации, включая защитные бланки и т.п., объем информации, передаваемой за 20-миллисекундный сегмент, возрастает до 324 бит, т.е. результирующий поток информации составляет 16,2 кбит/с. Далее эта информация сжимается во времени втрое, с тем чтобы на протяжении 40-миллисекундного кадра могла быть передана информация шести слотов. В результате частота информационной битовой последовательности на выходе кодера канала составляет 48,6 кбит/с.

В стандарте GSM 260 бит информации, кодирующих параметры 20-миллисекундного сегмента речи, также разделяются на два класса: класс 1-182 бита, защищаемые помехоустойчивым кодированием, и класс 2 - оставшиеся 78 бит, которые передаются без помехоустойчивого кодирования. В свою очередь, из 182 бит класса 1 выделяются 50 наиболее существенных бит, составляющих подкласс 1а, которые подвергаются более мощному кодированию, а остальные 132 бита класса 1 составляют подкласс 1б и кодируются слабее. К подклассу 1а относятся параметры фильтра кратковременного предсказания и часть информации о параметрах фильтра долговременного предсказания, к подклассу 1б - часть информации о параметрах сигнала возбуждения и оставшаяся информация о параметрах фильтра долговременного предсказания, к классу 2 - оставшаяся информация о параметрах сигнала возбуждения.

Информация подкласса 1а кодируется блочным кодом, обнаруживающим ошибки, - укороченным систематическим циклическим кодом (53, 50), дающим 3-битовый код четкости. Затем вся информация класса 1 переупаковывается, располагаясь в такой последовательности: биты с четными индексами, код четности подкласса 1а, биты с нечетными индексами в обратной по-

следовательности, четыре добавочных нулевых бита - всего 189 бит. Эти 189 бит подаются на сверточный кодер (2, 1, 5) со скоростью кодирования  $R = 1/2$  и длиной ограничения  $K = 5$ . В результате 378 бит с выхода сверточного кодера вместе с 78 битами класса 2 составляют 456 бит, т.е. поток информации речи на выходе кодера речи равен 456 бит/20 мс, или 22,8 кбит/с. При декодировании информации речи также сначала выполняется сверточное декодирование информации класса 1, и при этом исправляются ошибки в пределах возможностей кода свертки. Затем по коду четности проверяется наличие остаточных ошибок в информации подкласса 1а, и, если такие ошибки обнаруживаются, информация данного сегмента не идет в последующую обработку, а заменяется интерполированной информацией смежных сегментов.

1 В качестве альтернативы возможно значительно более простое помехоустойчивое кодирование, позволяющее лишь обнаруживать ошибки, но не исправлять их. Если при этом нужна коррекция ошибок, то сообщения, содержащие ошибки, передаются повторно - это коррекция ошибок с перезапросом (Automatic Repeat Request, ARQ -запрос автоматического повторения, или перезапрос). Коррекция ошибок с перезапросом используется, например, в беспроводном телефоне.



## Глава 9. Антенны систем связи с подвижными объектами

В настоящее время в связи с бурным развитием систем мобильной связи для эффективного их функционирования важно правильно подобрать соответствующие типы антенн [59,62,84,89,105-108]. Эта проблема возникает в первую очередь для абонентов сотовой связи в зонах неуверенного приема, а также для автомобилистов, для которых вопрос выбора типа антенны и места ее установки вовсе не так прост.

### 9.1 Автомобильные антенны

Сейчас наиболее широкое применение находят следующие типы автомобильных антенн (рис. 9.1 – 9.4):

- *Антенны для крепления на стекло* крепятся к любому стационарному окну специальной «липучкой». Устанавливать ее рекомендуется в месте, свободном от спирали подогрева стекла или других покрытий. Допустимый угол наклона антенны от 0 до 10 без ухудшения характеристик.
- *Антенны с зажимом на боковое стекло.* Лучших результатов можно достичь при размещении антенны в пределах 1 метра от места использования сотового телефона. Рекомендуется левое водительское или левое пассажирское окна.
- *Антенны на углу багажника* легко устанавливаются и не требуют сверления корпуса автомобиля. Ее можно закрепить на углу капота или багажника автомобиля при помощи винтов, не повреждая лакового покрытия, зажимая панель автомобиля между прокладками из мягкого металла и резины.
- *Антенны с вакуумным креплением* для установки внутри или снаружи салона автомобиля минимально влияют на его аэродинамические свойства.
- *Антенны с магнитным креплением* являются наиболее портативными, они надежно крепятся к любой поверхности из стали. Мягкая прокладка не повреждает краску на кузове автомобиля.

Для автомобилей наибольшее применение нашли *простые штыревые, удлинненные штыревые и коллинеарные антенны.*

Оптимальным местом размещения вертикально поляризованной автомобильной антенны является середина крыши транспортного средства. При смещении ее от центра к краю входное сопротивление антенны будет изменяться мало, но диаграмма направленности изменится существенно. Размещение антенны на стекле кузова приводит к проигрышу по электрическим характеристикам. В этом случае провалы в излучаемой мощности на отдельных направлениях достигают 10-15 дБ (снижение мощности в 12-30 раз). Из-за затенения кузовом излучателя в этих случаях

ставят две антенны — возле переднего и заднего стекол

Обычная ненаправленная *простая штыревая антенна*, работает в полосе 806-896 МГц с коэффициентом стоячей волны не хуже 1,5 и выполняется из нержавеющей стали. Длину штыревой антенны можно значительно уменьшить, если расположить в ее основании так называемую удлиняющую индуктивность, которая компенсирует отрицательную емкостную реактивность короткого штыря и тем самым как бы «удлиняет» его до резонансного четвертьволнового.

В конструкции *удлинненной штыревой антенны* дроссель в основании штыря служит для согласования. Такая антенна имеет большее усиление по сравнению с типовым штырем тех же размеров. Для установки таких антенн требуется металлическая поверхность или система противовесов. Однако такие излучатели относительно узкополосные.

Следующий наиболее популярный тип — автомобильная *коллинеарная антенна*. Конструктивно состоящая из нижнего четвертьволнового излучателя, полуволнового верхнего излучателя и бескаркасной катушки. Антенна устанавливается на крыше автомобиля с помощью магнитного основания. С учетом зеркального изображения, сформированного проводящей плоскостью, она действует как линейная коллинеарная антенная решетка из трех элементов, где каждый элемент — полуволновой вибратор. Практически длины элементов могут варьироваться в пределах от  $1/8$  до  $1/4$  длины волны для нижнего излучателя и от  $1/2$  до  $5/8$  длины волны для верхнего излучателя. Фазосдвигающая секция, которая конструктивно представляет собой бескаркасную катушку индуктивности, обеспечивает ток одного направления на излучающих элементах. При этом общая длина полотна антенны получается порядка  $4/5$  длины волны, что позволяет реализовать практически коэффициент усиления антенны на 4 дБ выше, чем у четвертьволнового штыревого излучателя. Коэффициент усиления такой коллинеарной антенной решетки обычно на 3дБ выше, чем простого полуволнового симметричного вибратора. При выборе коллинеарных антенн отдают предпочтение гибким антеннам или моделям с поворотным амортизатором в точке крепления. Это устраняет опасность поломки при езде среди препятствий.

Известны *три способа крепления автомобильных антенн* — врезной, магнитный и емкостной. Первый способ наиболее надежный, однако он самый трудоемкий и требует нарушения целостности кузова автомобиля. Более предпочтительным и самым распространенным является второй способ, когда антенну крепят к автомобилю с помощью магнитного основания. При этом не нужно сверлить крышку или багажник, а при необходимости антенну можно легко переставить на другое место или вообще снять и спрятать, подобно зеркалу или щеткам стеклоочистителя.

При емкостном креплении антенну крепят на стекло и через него осуществляют емкостную связь с приемопередатчиками, расположенным внутри автомобиля. Однако, как уже отмечалось выше, расположение антенны на стекле не самое удачное с точки зрения обеспечения высоких радиотехнических характеристик антенны.

### 9.2 Антенны для мобильных телефонов

Тенденция уменьшения размеров и веса портативных телефонов в последнее время привела к тому, что на быстро развивающемся рынке сотовых телефонов нашли применение относительно малогабаритные антенны: спиральные, вибраторные и низкопрофильные (Рис. 9.5 и 9.6).

*Цилиндрические спиральные антенны* широко используются для сотовых телефонов и радиотелефонов. При соответствующем выборе параметров спиральная антенна весьма эффективна по равномерности излучения и коэффициенту излучения. Для сотовых телефонов используется режим ненаправленного излучения, который реализуется при диаметрах спирали  $D$  значительно меньших длины волны ( $\lambda \geq 6D$ ). При этом в плоскости витков антенна равномерно излучает во всех направлениях, а в плоскости, совпадающей с осью спирали, диаграмма направленности имеет форму восьмерки.

Эти устройства представляют собой закрытую полимерной оболочкой спираль на диэлектрическом стержне. Существуют модели со спиралью, заключенной в резиновый корпус — «в гибком исполнении». Такие антенны имеют физическую длину  $\lambda/12$  при четвертьволновой электрической длине. При дальнейшем уменьшении физической длины резко возрастают потери.

Неудовлетворительная работа спиральной антенны в мобильных телефонах в диапазоне частот 800-900 МГц привела к тому, что разработчики усложнили ее, добившись выигрыша в сравнении с одиночной спиралью. Усложненная спиральная антенна состоит из двух спиралей: первичной, жестко установленной на корпусе, длиной приблизительно 2 см и вторичной спирали длиной приблизительно 10 см, которая может размещаться внутри корпуса радиотелефона. В выдвинутом состоянии вторичная спираль становится основным излучателем.

Дальнейшее уменьшение размеров сотовых телефонов заставило отказаться от использования вибраторных и спиральных излучателей и перейти к *низкопрофильным конструкциям*. Микрополосковые антенны и F-образные антенны известны как типичные низкопрофильные антенны, которые широко применяются в сотовых телефонах. Габариты переносимого телефонного аппарата позволяет разместить антенну на лицевой или боковой стороне корпуса. Наиболее перспективные конструкции антенн обеспечивают работу в двух диапазонах частот.

### 9.3 Антенны базовых станций

Условно основные типы антенн базовых станций можно разделить на ненаправленные, направленные и секторные (рис. 9.7). Дадим им краткую характеристику.



Рис. 9.7

Направленные антенны для базовых станций имеют диаграмму направленности, прижатую к горизонтальной поверхности. К ним относятся *линейные фазированные решетки*, составленные из отдельных ненаправленных излучателей. Число излучающих элементов достигает 8-10, а коэффициент усиления составляет 6-10 дБ. Вертикальные симметричные вибраторы крепятся на металлической стойке, которая влияет на диаграмму направленности (ДН) в горизонтальной плоскости. Улучшают равномерность ДН введением удлиненных (длина несколько меньше половины волны) металлических элементов, размещенных симметрично по обеим сторонам стойки опоры.

*Ромбическая антенна* с ДН при ширине в вертикальной и горизонтальной плоскостях около 15 обеспечивает коэффициент усиления 10-12 дБ. Однако ее недостатком является большие габаритные размеры. Более простая конструкция направленной антенны — *V-образная*.

Наибольшее применение на базовых станциях нашли эффективные и простые направленные антенны типа «*волновой канал*». Коэффициент усиления таких антенн зависит от общей длины  $l$  и при  $l = \lambda$  достигает 9



При емкостном креплении антенну крепят на стекло и через него осуществляют емкостную связь с приемопередатчиками, расположенным внутри автомобиля. Однако, как уже отмечалось выше, расположение антенны на стекле не самое удачное с точки зрения обеспечения высоких радиотехнических характеристик антенны.

## 9.2 Антенны для мобильных телефонов

Тенденция уменьшения размеров и веса портативных телефонов в последнее время привела к тому, что на быстро развивающемся рынке сотовых телефонов нашли применение относительно малогабаритные антенны: спиральные, вибраторные и низкопрофильные (Рис. 9.5 и 9.6).

*Цилиндрические спиральные антенны* широко используются для сотовых телефонов и радиотелефонов. При соответствующем выборе параметров спиральная антенна весьма эффективна по равномерности излучения и коэффициенту излучения. Для сотовых телефонов используется режим ненаправленного излучения, который реализуется при диаметрах спирали  $D$  значительно меньших длины волны ( $\lambda \geq 6D$ ). При этом в плоскости витков антенна равномерно излучает во всех направлениях, а в плоскости, совпадающей с осью спирали, диаграмма направленности имеет форму восьмерки.

Эти устройства представляют собой закрытую полимерной оболочкой спираль на диэлектрическом стержне. Существуют модели со спиралью, заключенной в резиновый корпус — «в гибком исполнении». Такие антенны имеют физическую длину  $\lambda/12$  при четвертьволновой электрической длине. При дальнейшем уменьшении физической длины резко возрастают потери.

Неудовлетворительная работа спиральной антенны в мобильных телефонах в диапазоне частот 800-900 МГц привела к тому, что разработчики усложнили ее, добившись выигрыша в сравнении с одиночной спиралью. Усложненная спиральная антенна состоит из двух спиралей: первичной, жестко установленной на корпусе, длиной приблизительно 2 см и вторичной спирали длиной приблизительно 10 см, которая может размещаться внутри корпуса радиотелефона. В выдвинутом состоянии вторичная спираль становится основным излучателем.

Дальнейшее уменьшение размеров сотовых телефонов заставило отказаться от использования вибраторных и спиральных излучателей и перейти к *низкопрофильным конструкциям*. Микрополосковые антенны и F-образные антенны известны как типичные низкопрофильные антенны, которые широко применяются в сотовых телефонах. Габариты переносимого телефонного аппарата позволяет разместить антенну на лицевой или боковой стороне корпуса. Наиболее перспективные конструкции антенн обеспечивают работу в двух диапазонах частот.

## 9.3 Антенны базовых станций

Условно основные типы антенн базовых станций можно разделить на ненаправленные, направленные и секторные (рис. 9.7). Дадим им краткую характеристику.



Рис. 9.7

Направленные антенны для базовых станций имеют диаграмму направленности, прижатую к горизонтальной поверхности. К ним относятся *линейные фазированные решетки*, составленные из отдельных ненаправленных излучателей. Число излучающих элементов достигает 8-10, а коэффициент усиления составляет 6-10 дБ. Вертикальные симметричные вибраторы крепятся на металлической стойке, которая влияет на диаграмму направленности (ДН) в горизонтальной плоскости. Улучшают равномерность ДН введением удлиненных (длина несколько меньше половины волны) металлических элементов, размещенных симметрично по обеим сторонам стойки опоры.

*Ромбическая антенна* с ДН при ширине в вертикальной и горизонтальной плоскостях около 15 обеспечивает коэффициент усиления 10-12 дБ. Однако ее недостатком является большие габаритные размеры. Более простая конструкция направленной антенны — *V-образная*.

Наибольшее применение на базовых станциях нашли эффективные и простые направленные антенны типа «*волновой канал*». Коэффициент усиления таких антенн зависит от общей длины  $l$  и при  $l = \lambda$  достигает 9

дБ, при  $l = 2\lambda - 14$  дБ.

*Широкополосные антенны* используются при необходимости обеспечения одновременной работы двухдиапазонных терминалов (например, GSM900/1800). К ним относятся биконические и дискоконусные антенны с равномерной диаграммой направленности в горизонтальной плоскости и направленные антенны — логопериодические.

Конструкция *дискоконусной антенны* образована конусом и диском. Питание подводится с помощью коаксиального кабеля. Соотношения размеров близкие к оптимальным, таковы:

$$2\psi_0 = 60^\circ; t = 0,3d; a_1 = l \sin \psi_0 + \frac{d}{2}; a_2 = 0,7a_1.$$

Диаграмма направленности в горизонтальной плоскости — круговая, в вертикальной плоскости изменяется по диапазону частот. Коэффициент перекрытия частоты  $f_{\max}/f_{\min}$  достигает 3-4. С ростом частоты коэффициент усиления увеличивается до 3-4 дБ и ось максимального излучения прижимается к земле.

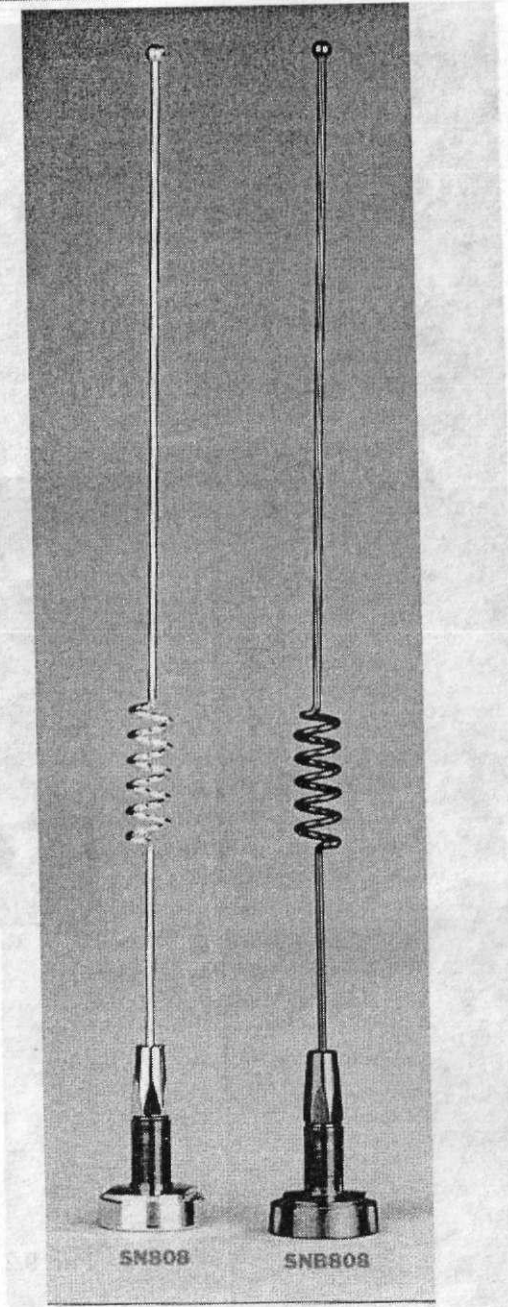
*Логопериодическая направленная антенна* имеет коэффициент перекрытия по диапазону 3-4, коэффициент усиления 5-7 дБ и по внешнему виду близка к антеннам типа «волнового канала».

*Широкополосные комбинированные антенны* имеют в своем составе внутренние разделительно-согласующие элементы и подстроечные элементы, которые обеспечивают практически неограниченно сочетание частотных диапазонов. Однако, они являются наиболее дорогими и трудоемкими в монтаже и настройке.

Дальнейшее уменьшение размеров составных элементов антенны достигается за счет применения миниатюрных элементов, таких как микрополосковые антенны, которые широко применяются в современных мобильных системах связи.

В настоящее время активно используются антенны, работающие в диапазоне частот от 1 до 10 ГГц. Это связано с тем, что в этом диапазоне частот сосредоточены основные частоты современных мобильных систем связи, таких как GSM, UHF, и др. Для обеспечения надежной связи в этом диапазоне частот необходимо использовать антенны, способные работать в широком диапазоне частот.

Рис. 9.1





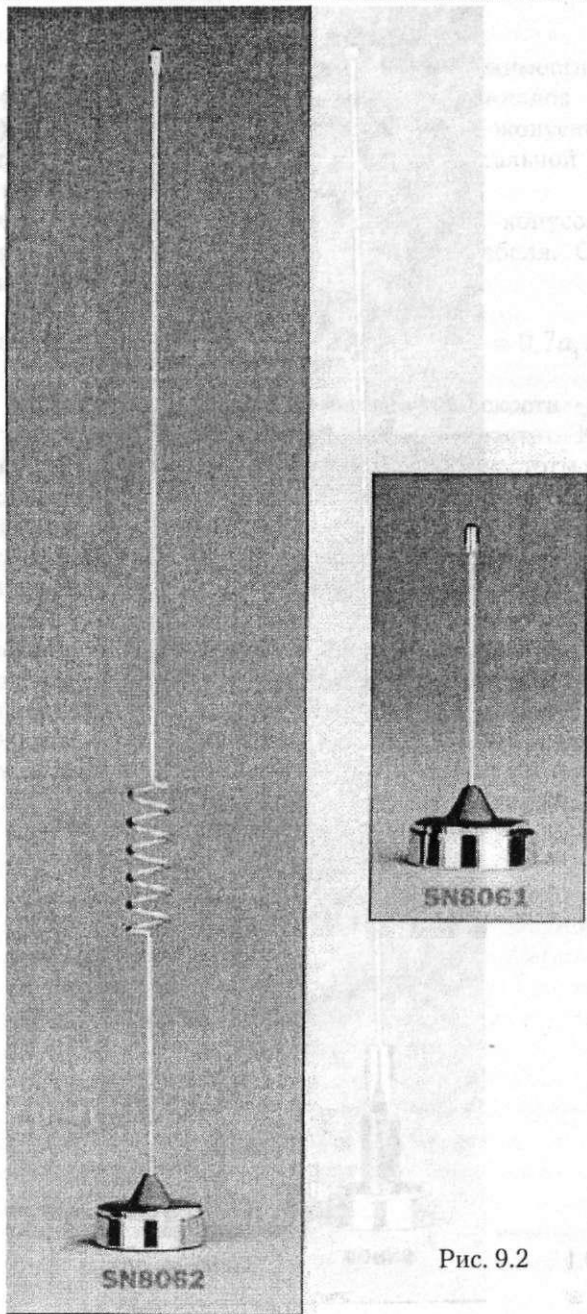


Рис. 9.2

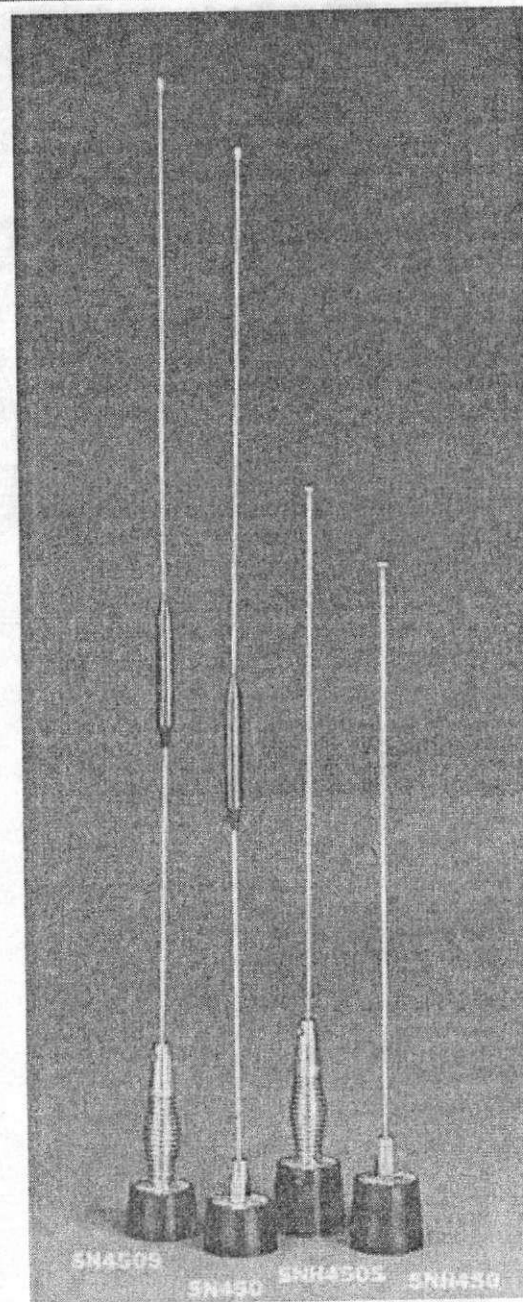


Рис. 9.3

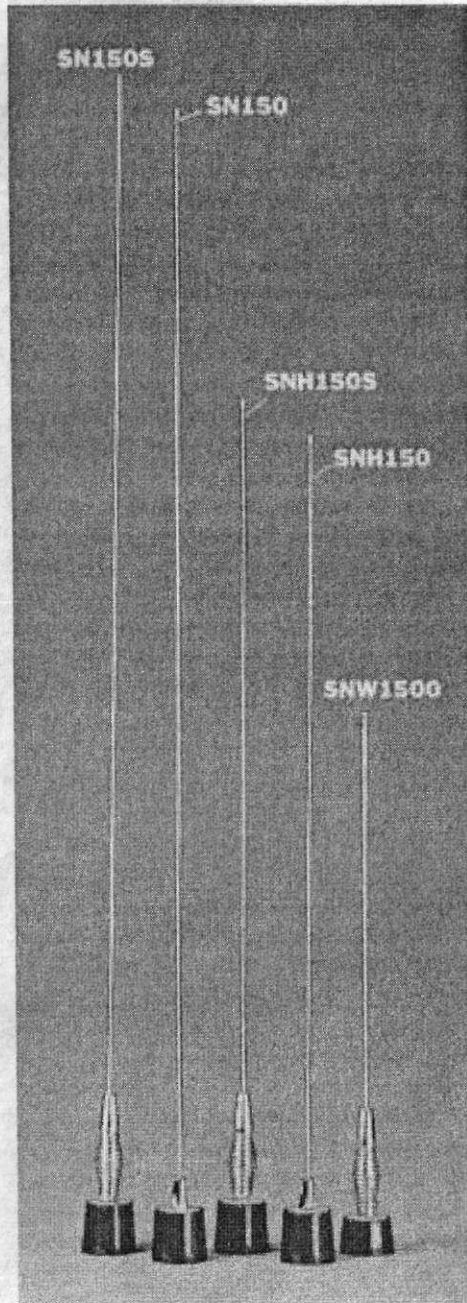


Рис. 9.4

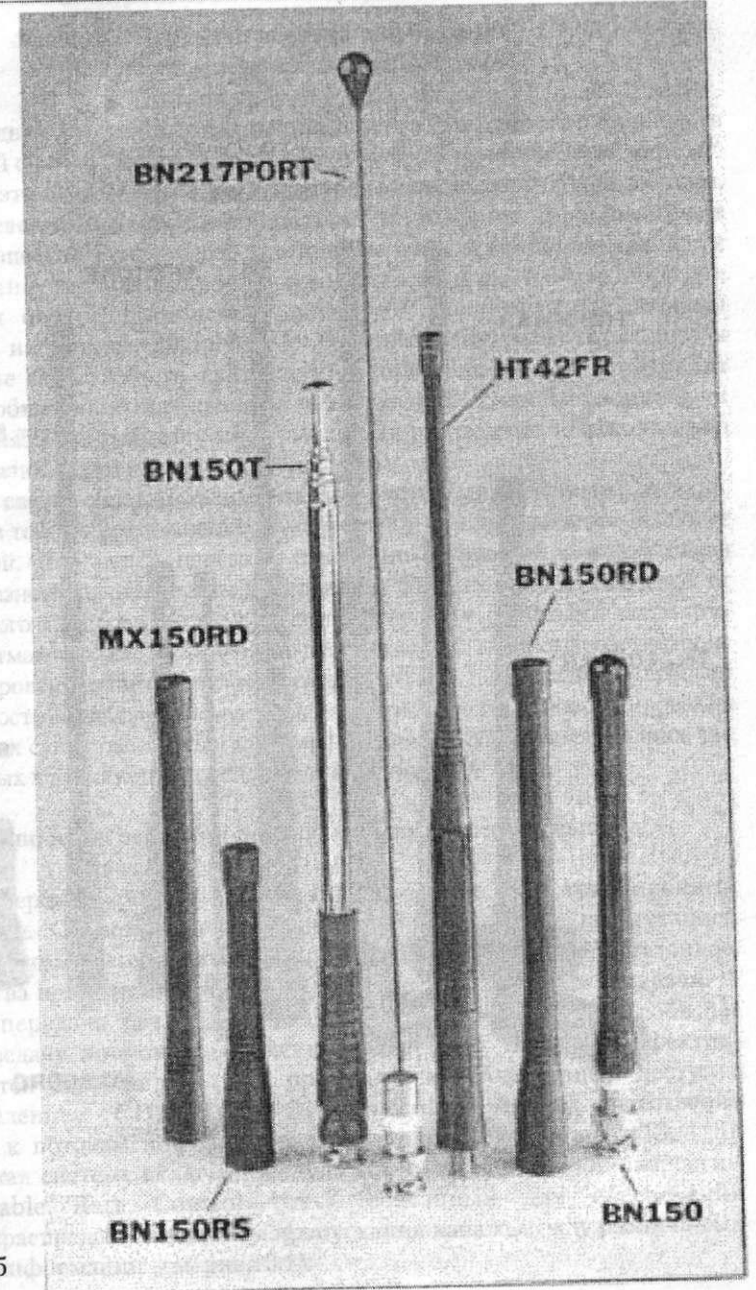


Рис. 9.5



## Глава 10. Передача речевой информации в сетях связи с подвижными объектами

На рубеже двух столетий мы становимся свидетелями воплощения в жизнь известной фразы: **“кто владеет информацией тот владеет миром”**. Информация – это знания, это деньги, это возможность управления людьми, это власть. Невозможно переоценить роль и значение информации в современном обществе. Реализовать заложенные в информации возможности можно обеспечив ее правильное использование или, говоря образно, движение. Для обеспечения этого “движения” человечеством созданы многообразные институты, технические комплексы, регламентирующие и обеспечивающие возможность связи внутри общества. Виды этой связи чрезвычайно обширны, но, касаясь технической стороны вопроса и рассматривая связь как передачу информации на расстояние, необходимо из всего многообразия выделить телефонную связь.

Телефонная связь, обладая такими характеристиками, как оперативность, узнаваемость по голосу, возможность двустороннего обмена, является наиболее привлекательной. Для целей передачи голоса по цифровым каналам связи применяются разнообразные методы кодирования речевых сигналов, начиная от непосредственного преобразования в код и заканчивая сложными математическими алгоритмами на основе линейного предсказания и кодового возбуждения. Современный уровень развития систем и сетей передачи информации открывает новые возможности по дальнейшему совершенствованию способов кодирования речи, призванных существенно повысить эффективность как существующих, так и вновь вводимых в эксплуатацию каналов и трактов.

### 10.1 Способы передачи речи по мобильным сетям связи

Первый – передача речи с постоянной скоростью. Это традиционный способ передачи. Он может использоваться в сетях как с коммутацией каналов, так и с коммутацией пакетов. При этом обеспечивается достаточное, для большинства приложений, качество и приемлемые задержки передачи.

Второй – передача речи с переменной скоростью по сетям обеспечивающих передачу потоков с переменной скоростью. Высокая эффективность этих сетей достигается, когда применяется коллективный доступ с кодовым разделением - CDMA (Code Division Multiple Access), существенно приспособлен к потокам информации с переменной скоростью [113, 114]. Наиболее гибкая система включает модуль контроля переменной скорости - VRCU (Variable Rate Control Unit), созданный для обеспечения оптимального распределения полосы пропускания канала между различными источниками информации (см. рис.10.1).



Рис. 9.6

Каждый источник информации (речь, видео, данные и управляющие сигналы) формирует информационные потоки  $r_i(n)$ , которые являются функцией кадра  $n$  и поступают в блок кодирования канала. Затем полученные битовые потоки, каждый со своей избыточностью, с переменными скоростями  $R_i(n)$  мультиплексируются в выходной поток битов со скоростью  $R_{tot}(n)$  с динамически распределяемыми полосами пропускания.

VRCU обеспечивает оптимальное распределение ресурсов канала связи, для чего анализирует:

- потребности источников информации;
- потребности системы;
- требования пользователей;
- возможности канала связи.

Таким образом, можно отметить, что, с одной стороны, современные системы и сети связи обладают возможностями по управлению потоками с переменной скоростью, а, с другой стороны, существует необходимость эффективного использования пропускной способности каналов связи. Это делает актуальными, во-первых, задачу разработки алгоритмов кодирования речи с переменной скоростью, и, во-вторых, задачу модификации существующих алгоритмов для перехода к переменной скорости передачи.

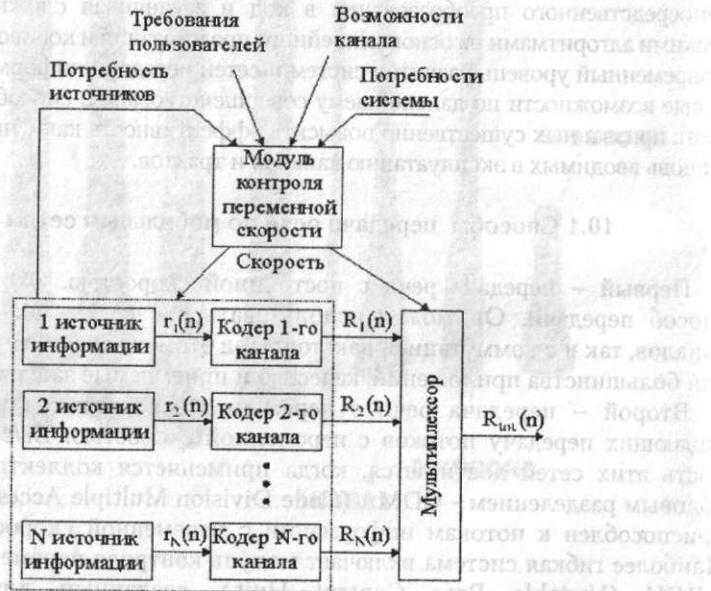


Рис. 10.1. Иллюстрация процесса управления потоками с переменными скоростями

Высокое качество речи, достигаемое в алгоритмах многоимпульсного и кодового возбуждения, при относительно невысоких скоростях передачи, обеспечило их широкое распространение в различных системах и сетях связи. При попытках передачи речи с использованием этих методов на скоростях 4 кбит/с и ниже, качество речи снижается. Одна из возможностей дальнейшего снижения скорости передачи с сохранением высокого качества – это переход к переменной скорости передачи, учитывающей информационные избыточности отдельных сегментов речевых сигналов. Хорошо известно [115, 116], что информация необходимая для точного представления речевого сигнала, изменяется во времени. Это является основой для разработки и применения переменной скорости передачи в технике кодирования речи.

В настоящее время существует несколько подходов к построению кодеров речи переменной скорости передачи. Они основываются на классификации сегментов речевого сигнала по определенному признаку и применении различных систем кодирования на разных сегментах.

Один из подходов базируется на фонетической классификации сегментов речи. Этот метод используется в разработках лаборатории Fujitsu, Rockwell International Corporation, фирмах Hughes Aircraft, Qualcomm и др. [117]. В общем случае структуру такого кодера представлена на рисунке 10.2. Цель классификации состоит в том, чтобы выделить несколько фонетических категорий, которые соответствуют различным уровням энтропий речевого сигнала и удовлетворяют кодированию с переменной скоростью.



Рис. 10.2. Блок-схема кодера переменной скорости передачи

Фонетическая классификация осуществляется на речевых сегментах сигнала и управляет выбором соответствующей системы кодирования данного сегмента. Фонетическая классификация предложенная в [117], осуществляется по признаку вокализованный/невокализованный. Для этого основной интервал анализа длиной 20 мсек делится на 4 подсегмента по 5 мсек и определяется их тип – вокализованный либо невокализованный.





В кодеке анализируются сегменты длины 10 мсек (80 отсчетов), каждый сегмент делится на четыре подсегмента по 2.5 мсек (20 отсчетов). В анализаторе выделяются параметры относящиеся как ко всему сегменту, так и к его подсегментам. Выбором алгоритма работы кодера и, соответственно, изменением скорости передачи, управляют два блока классификации (см. рис.10.4):

- один блок проводит классификацию непосредственно по речевому сигналу,
- второй применяет замкнутый алгоритм – метод анализа через синтез.

Прямой классификатор проводит анализ сегмента речи по признаку пауза – речь и для речи по признаку вокализованный – невокализованный.

Всего в FVR кодеке предусмотрено 8 режимов работы, получаемых в результате классификации замкнутым методом выделенных типов сегментов (см. рис. 10.5).

Структурная схема FVR кодера представляет собой много-уровневый CELP алгоритм, который включает: кратковременный (ST) анализатор, долговременный (LT) анализатор, постоянные кодовые книги сигналов возбуждения А и В.

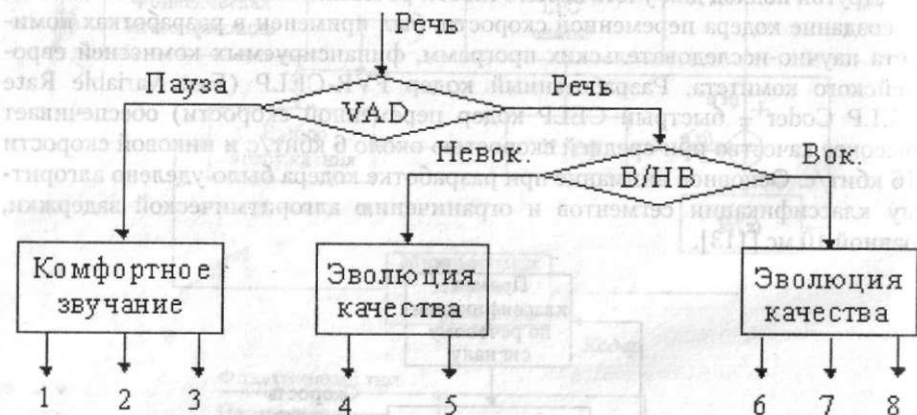


Рис. 10.5. Блок-схема алгоритма выбора скорости работы

Блок комфортного звучания пауз обеспечивает, в результате применения разных алгоритмов анализа, шумовое заполнение пауз 3-х типов: нулевое (1), случайным шумовым сигналом (2) либо сигналом близким по форме к исходному (3) (см. таб. 10.2).

Табл. 10.2: Категории кодирования и скорости передачи.

Параметры	Категория кодирования							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Коэффициент усиления сигнала		+	+					
Параметры кратковременного (ST) анализатора			+	+	+	+	+	+
Параметры долговременного (LT) анализатора						+	+	+
Кодовая книга А				+	+		+	+
Кодовая книга В					+			+
Скорость передачи (кбит/с)	0	0,4	3,2	8,5	12,5	7,2	12	16

Блок “эволюция качества” относится к замкнутому классификатору и обеспечивает подключение средств дополнительного анализа сигнала возбуждения (см. табл. 10.2) в случае, если взвешенная погрешность предсказания превышает некоторый порог. В результате объем передаваемых для сегмента параметров увеличивается, что приводит к возрастанию скорости передачи.

Выбор скорости передачи выполняется так, что для каждого сегмента обеспечивается постоянное качество восстановленной речи. В результате, алгоритм проявил значительную помехоустойчивость к различным условиям окружающей среды, а также к различным дикторам. Формализованные субъективные испытания качества методом парных сравнений подтвердили возможность для этого кодера обеспечить качество близкое к стандарту G.728 [113].

Фирмой QUALCOMM Incorporated был разработан алгоритм кодера переменной скорости, реализованный в виде однокристальной микросхемы - Q4401 [118]. Кодер Q4401 удовлетворяет требованиям сжатия речи систем цифровой телефонной связи, систем хранения и синтеза речи. Программно реализованный алгоритм QUALCOMM Codebook Excited Linear Predictive (QCELP) обеспечивает высокое качество речи при низких скоростях передачи данных.

Q4401 кодирует речь в режиме фиксированных или переменных скоростей передачи данных. В режиме фиксированной скорости Q4401 может кодировать речь на скоростях 4 кбит/сек, 4.8 кбит/сек, 8 кбит/сек или 9.6 кбит/сек. В переменном режиме Q4401 автоматически регулирует каждые 20 мсек скорость передачи данных в диапазоне от 800 бит/сек до 8 кбит/сек (нормальный режим переменной скорости) или от 800 бит/сек до 9.6 кбит/сек (расширенный режим переменной скорости). В режиме переменной скорости, Q4401 обеспечивает среднюю скорость 7 кбит/сек в приложениях с непрерывной речью и 3.5 кбит/сек при обычной двусторонней телефонной связи, без значительного ухудшения качества речи.

Кодер Q4401 работает на временном интервале 20 мсек (160 отсчетов). Алгоритм работы кодера основан на CELP методе. Процесс кодирования речи включает: измерение энергии речевого сигнала, определение алгоритма



кодирования и соответственно скорости передачи данных, динамическое регулирование частотных границ, и кодирование речи в блоки сжатых данных. Кодер посылает 25-байтовый блок данных на процессор каждые 20 мсек. Каждый кодируемый пакет содержит один байт, определяющий скорость передачи данных и 24 байта данных, которые содержат кодированную речь. Количество информационных бит блока зависит от выбранной скорости передачи данных, оставшиеся биты 24-х байтового кадра заполняются нулями.

Алгоритм кодирования (в режиме переменной скорости) для каждого сегмента речи длиной 20 мсек выбирается в зависимости от энергии сигнала на этом сегменте. Если энергия сигнала высока, будет использоваться максимальная скорость. Если энергия сигнала на среднем уровне, то будет использоваться промежуточное значение скорости. Если энергия сигнала низкая, будет использоваться скорость передачи данных 800 бит/сек. Средняя скорость для обычного телефонного разговора составляет примерно 6 кбит/с, качество приближается к стандарту G.728.

Таким образом, в настоящее время существует несколько систем кодирования речи, основанных на переменной скорости передачи. Эти системы, используя для классификации сегментов различные характеристики речи, основываются на CELP-алгоритмах. Исходя из современного состояния и перспектив развития систем и сетей связи можно утверждать, что подход к кодированию речи с переменной скоростью будет развиваться и получит широкое распространение. В [119] отмечено, что «переменная скорость передачи речи – неизбежное направление развития будущих поколений цифровых сетей».

Использование сложных алгоритмов кодирования речи с переменной скоростью экономит полосу пропускания каналов, повышает эффективность систем и сетей связи. Такие алгоритмы лежат в основе создания и разработки стохастических систем передачи, учитывающих статистические особенности передаваемой информации.

## 10.2 Особенности оценки качества речи в мобильных системах связи

Сегодня мобильный терминал можно найти, что называется, на любой вкус и цвет. Однако подобное разнообразие создает проблему – что выбрать? Эйфория от количества предлагаемых моделей и их возможностей сменяется серьезными раздумьями: деловой человек всегда хочет получить максимум пользы при минимуме затрат. Дешевизна сегодня уже не является определяющим фактором при покупке мобильного телефона. Хорошее оснащение и высокое качество уже на протяжении длительного времени работы не менее важны.

Для оказания помощи при выборе мобильного друга потенциальным абонентам были проведены испытания мобильных телефонов по оценке разборчивости речи на действующих линиях сотовой связи. Но выбор метода такой оценки, оказался не простой.

С тех пор как в 80-х годах появились первые мобильные телефоны исследователи бьются над созданием эффективных методик для количественной оценки этого качества. Медленный прогресс в этой области обусловлен прежде всего трудностью и многогранностью такой задачи. Если механизм речеобразования более или менее изучен, то в отношении восприятия человеком звуков ясности совсем немного. Кроме того, известен также эффект привыкания слушателя, когда звучание какого-либо кодека, показавшееся при первом с ним столкновении неприемлемым со временем становится настолько привычным и комфортным, что замена его на более качественный может вызвать протест и недовольство.

С другой стороны, если передавать оцифрованную речь, не подвергая ее никакой обработке, то для сохранения «телефонного» качества звучания потребуется пропускная способность канала на уровне 64 кбит/с, т.е. требуется слишком большая пропускная способность сети. Поэтому производится сжатие речи и ее обработка. Традиционно устройства, реализующие такое сжатие, называются вокодерами, или кодеками речи. В сотовых системах стандарта GSM в качестве речепреобразующего устройства используется речевой кодек RPE-LTP с регулярным импульсным возбуждением и скоростью преобразования речи 13 кбит/с.

Для уменьшения вычислительных затрат и повышения эффективности использования канала связи в кодеках связи применяется прерывистая передача речи DTX (Discontinuous Transmission), которая обеспечивает включение передатчика только тогда, когда пользователь начинает разговор и отключает его в паузах и в конце разговора. Кроме того, система DTX управляет детектором активности речи VAD (Voice Activity Detection), который обеспечивает обнаружение и выделение интервалов речи с шумом и шума без речи даже в тех случаях, когда уровень шума сопоставим с уровнем речи.

Однако, чтобы произвести сжатие, вокодеру требуется на какое-то время поместить данные в буфер для анализа речи и при этом возникает так называемая алгоритмическая задержка. Кроме того, вокодер вносит дополнительную задержку при выполнении реальных расчетов по сжатию речи – так называемую задержку на сжатие.

На за этого реальное качество воспроизводимой речи в мобильной связи зависит от множества факторов и может варьироваться в значительных пределах в зависимости от клиентского программного и аппаратного

обеспечения (типа мобильного терминала), шлюзового (коммутационного) оборудования, пропускной способности и загруженности сети. Все это сказывается на таких технических характеристиках передачи, как задержка, доля потерянной информации (букв, слов).

Помимо пауз в разговоре задержка вызывает такие явления как «эхо-передаваемой речи» и наложение голосов. Одной из причин этого может быть несогласованность сопротивлений при переходе с двух пар на четыре в телефонной сети.

Учитывая сложности оценки качества речевой связи в середине 90-х годов Сектор по стандартизации телекоммуникаций Международного союза электросвязи (МСЭ-Т) завершил разработку рекомендации Р.800, «Методы субъективной оценки качества речевой связи», которая на сегодня является наиболее признанной методологией оценки систем передачи речи. В ней описываются условия проведения тестовых испытаний, содержание аудиообразцов, система оценок и методики анализа полученных данных. Чаще всего метод Р.800 используют для расчета средней субъективной оценки качества речи по пятибалльной шкале.

Но главная проблема использования подхода Р.800 заключается в том, что он далек от практической жизни: фирмы-производители стремятся тестировать свои системы в «комфортных» контролируемых условиях, но реальные телекоммуникационные каналы далеки от этого, а особенно отечественные линии передач.

### 10.3 Экспериментальная оценка разборчивости слов мобильных телефонов при передаче речевой информации по национальным сотовым сетям

#### 10.3.1 Общие вопросы испытаний мобильных телефонов

Качество передачи речевой информации, как известно, оценивается тремя критериями: громкостью, разборчивостью и натуральностью. Разборчивость, безусловно, основной критерий, поскольку практика показывает, что тихая разборчивая речь понятнее громкой неразборчивой.

Разборчивость есть количественная мера, характеризующая способность тракта радиотелефонной связи передавать содержащуюся в речи смысловую информацию в данных конкретных акустических условиях окружающей среды. Мерой разборчивости служит выраженное в процентах или долях единицы отношение числа правильно принятых элементов речи (звуков, слогов, слов, фраз) к достаточно большому общему числу переданных. В зависимости от того, какие элементы речи передаются, различают следующие виды разборчивости: звуков — D, слогов — S, слов — W и фраз — I.

#### Измерение разборчивости методом артикуляции

Измерение разборчивости производится группой операторов путем передачи и приема по испытуемой линии связи серии артикуляционных таблиц, составленных из элементов речи (слогов, слов, фраз). В зависимости от используемых артикуляционных таблиц измеряют соответственно разборчивость звуков или слогов; слов и фраз. Все указанные виды измерения разборчивости эквивалентны по получаемым результатам, так как между ними существует взаимосвязь. Тем не менее в вопросах методики проведения измерений и подсчета величин разборчивости все они имеют свои специфические особенности. Рассмотрим их.

**Измерение разборчивости слогов и звуков.** Измерение производится путем передачи и приема слоговых артикуляционных таблиц слоговых или звукосочетаний. При передаче диктор должен произносить их ровным голосом, внятно, без преувеличенной подчеркнутости отдельных звуков и без растягивания гласных в ритме 1 слог/3с (одна таблица за 1,5 — 2 мин). Принятые слоги записываются на бланках. Ошибки приема слогов определяется путем визуальной сверки принятой таблицы с переданной. Слог считается принятым неправильно, если хотя бы один звук в слове записан неправильно, пропущен или добавлен. Если измеряется звуковая разборчивость, то при сверке таблиц отмечается каждый неправильно принятый звук.

**Обработка результатов измерений.** Величина разборчивости вычисляется для каждой принятой таблицы путем вычисления процента правильно принятых слогов (слоговая разборчивость) или звуков (звуковая разборчивость). Далее определяется среднее значение разборчивости звуков ( $D_{cp}$ ) и среднеквадратическое отклонение ( $B$ ). Затем, используя метод доверительных интервалов, с доверительной вероятностью 0,95 определяют нижнюю границу звуковой разборчивости ( $D_n$ ).

**Измерение разборчивости слов.** Измерение заключается в передаче, приеме, записи и последующей сверке специальных словесных артикуляционных таблиц. Мерой качества испытуемой линии связи в этом случае является процент правильно принятых слов относительно общего числа переданных. Методика проведения измерений разборчивости слов мало отличается от методики измерения разборчивости слогов. Разница заключается лишь в скорости передачи, которая должна быть равна 1 слово/1,5 с (одна таблица за 1 — 1,2 мин). Принятые слова записываются на испытательных бланках. Обработка результатов производится аналогично как и при оценке разборчивости звуков.



Для оценки качества передачи речи, было проведено комплексное тестирование, где были использованы четыре однотипные пары моделей мобильных телефонов: Motorola cd930, Ericsson A1018s, Sagem MC820, Alcatel One Touch CLUB DUALBAND. При выборе способа тестирования учитывалось то, что даже наиболее продвинутое автоматизированное испытательное устройство не способно оценивать качество речи так, как это делает человек. Поэтому за основу были взяты методы тестирования, изложенные в ГОСТе 16600-72 «Передача речи по трактам радиотелефонной связи», где оценка качества определяется на основании субъективных оценок группы людей, работающих в заданных условиях тестовой среды [68,72,83].

Исходя из того, что смысловая разборчивость позволяет получить только приближенно оценку качества связи, а звуковая и слоговая разборчивости связаны между собой (по величине слоговой разборчивости можно судить о величине звуковой разборчивости), поэтому оценка качества связи производилась по слоговой разборчивости речи. Тестирование проводилось в зонах уверенного (1 этап — тест №1 и 2) и неуверенного приема (2 этап — тест №3) в течении 2 месяцев.

### 10.3.2 Методика испытаний мобильных телефонов

Для оценки словесной разборчивости четырех однотипных пар мобильных телефонов (Motorola cd930, Ericsson A1018s, Sagem MC820, Alcatel One Touch CLUB DUALBAND) в программу тестирования были включены районы (зоны) уверенного и неуверенного приема и поэтому испытания проходили в таких условиях:

- внутри города (г.Киев);
- между городами (г.Киев — г.Бровары);
- между дачным поселком возле Фастова и городами Киев и Бровары.

**Тестирование направлений связи между абонентами, находящиеся в зона уверенного приема.** В указанной зоне были проведены следующие два теста.

#### ТЕСТ №1. Схема испытания:

Мобильный телефон (г. Киев, Борщаговка — место диктора) — мобильная сеть «КиевСтар GSM» — Мобильный телефон (г.Бровары — место слушателя). Передача контрольных таблиц с каждого мобильного телефона (использовались 4 пары мобильных телефонов).

**Методика проведения артикуляционных измерений по таблицам слов в тесте №1.**

Устанавливается связь между мобильными телефонами (один выступает в роли диктора, а другой — слушатель).

Диктор с мобильного телефона передает артикуляционные таблицы.

Слушатель записывает, принятые тексты на бланках.

Словесные тексты таблицы с записями пропущенных согласных звуков сверяют с дикторским тестом и определяется процент правильно принятых слов по каждой таблице. Обработка результатов измерений производится согласно п. 2.8 ГОСТа. Класс качества разборчивости речи определяется из табл.1 ГОСТа.

**ТЕСТ №2.** Суть теста состояла в том, что диктор вначале наговаривал испытательные тексты, которые записывались на компьютер (процесс записи). Затем текст воспроизводился с ПК на динамик и слушатели-эксперты записывали услышанные тексты на специальных бланках (процесс тестирования).

Схема испытания выглядела так:

- Мобильный телефон (г. Киев, район Ленинградской площади) — мобильная сеть «КиевСтар GSM» — ТЛФ сеть ОП — стационарный телефон Siemens euroset 805 (г. Киев, район Ленинградской площади) — ПК — (процесс записи).
- ПК — динамик — эксперты №1-5 — (процесс тестирования).

**Методика проведения артикуляционных измерений по таблицам слов в тесте №2**

Устанавливается связь между мобильным телефоном (он же выступает в роли диктора) и стационарным телефоном, подключенным к ПК для записи испытательных текстов.

Диктор передает по 12 артикуляционных таблиц с каждого мобильного телефона, которые записываются на ПК. Всего испытываются 4 мобильных телефона.

Воспроизведение записи через динамик ПК артикуляционных таблиц, записи экспертами-операторами (5 чел.) принятых слов на бланках для предварительной тренировки.

Передача диктором (ПК) через динамик 12х4=48 артикуляционных таблиц, записи экспертами-операторами (5 чел.) принятых слов на бланках.

Словесные тексты таблицы с записями пропущенных согласных звуков сверяют с дикторским тестом и определяется процент правильно принятых слов по каждой таблице. Обработка результатов измерений производится согласно п. 2.8 ГОСТа. Класс качества разборчивости речи определяется из табл.1 ГОСТа.

**Тестирование направлений связи между абонентами, один из которых находится в зоне уверенного приема, а второй — неуверенного приема.**

#### ТЕСТ №3. Схема испытания:

Мобильный телефон (дачный участок возле Фастова — место слушателя) — мобильная сеть «КиевСтар GSM» — Мобильный телефон (г.Бровары — место диктора). Передача по 15 контрольных таблиц с каждого мобильного телефона (использовались 4 пары телефонов). Методика испытаний аналогичная тесту №1.

Надо заметить, что не считается за ошибку, если в конце слова приписан глухой или звонкий парный звук, например, передано «сад», «чуб», а записано «сат», «чуп».

При испытаниях слова должны передаваться со скоростью одна таблица за 2 мин. ровным голосом, без подчеркивания начальных и конечных согласных. В одном измерении запрещается повторное чтение одного и того же дикторского текста.

### 10.3.3 Результаты экспериментальной оценки разборчивости слов сотовых телефонов

#### МОБИЛЬНЫЙ – МОБИЛЬНЫЙ: ТЕСТ №1

Испытание производилось между городами Киев и Бровары. После установления связи между мобильными телефонами, диктор (абонент в Киеве) наговаривал испытательный текст, а слушатель в Броварах записывал его на бланке. При чем, звонок до абонента для каждого сеанса был отдельный, т.е. после каждой словесной таблицы. Далее после обработки результатов измерений определялась нижняя граница разборчивости речи.

Полученные данные показали, что нижняя граница разборчивости слов при доверительной вероятности 0,95 для аппарата Sagem MC820 соответствует  $W_n=96\%$ , что соответствует 1 классу качества, т.е. понимание передаваемой речи без малейшего напряжения внимания и без затруднений соответственно. На втором месте находится терминал Motorola cd930 ( $W_n=95\%$ ) и занимает позицию 2 класса качества (понимание передаваемой речи без затруднений). К более низкому классу (3 классу качества – понимание передаваемой речи с напряжением внимания без переспросов и повторений) можно отнести аппараты Ericsson A1018s и Alcatel One Touch CLUB DUALBAND ( $W_n=93$  и  $92\%$  соответственно).

#### МОБИЛЬНЫЙ – СТАЦИОНАРНЫЙ: ТЕСТ №2

В этом тесте передача с мобильного терминала испытательных текстов на стационарный телефон проходила одновременно с записью их на ПК. Далее, воспроизводя через динамик текст, группа экспертов проводила записи принятых слов. Однако, при передаче диктором (ПК) текстов очень сильное влияние оказывал фоновый шум. Этим условиям соответствуют случаи телефонного разговора среди уличного шума, на вокзалах, на концертах, на шумных общественных мероприятиях, где приходится сильно напрягать свое внимание, а иногда переспрашивать и просить повторить отдельные фрагменты текста. Несмотря на это, как видно из данных (см.рис.2.16 тест №2), общая картина соотношения занятых позиций качества речи для тестируемых телефонов не изменилась (Sagem MC820 ( $W_n=86\%$ ), Motorola

cd930 ( $W_n=84\%$ ), Ericsson A1018s и Alcatel One Touch CLUB DUALBAND ( $W_n=82$  и  $81\%$  соответственно). Что подтверждает корректность измерений, т.е. достаточность статистики. Полученные результаты (ниже чем в тесте №1) объясняются тем, что так как разборчивость речи зависит от соотношения сигнал/шум, то при его малых значениях (что имело место в тесте №2) человеческое ухо воспринимает небольшое число форматных составляющих и разборчивость практически невысокая<sup>1</sup>.

#### «ПРЕДЕЛЬНЫЙ» РЕЖИМ: ТЕСТ №3

На втором этапе испытаний, были исследованы различия в работе аппаратов «в предельных» режимах (зона неуверенного приема) — когда напряженность поля, создаваемая базой станцией, становится недостаточной (это происходит при большом удалении от базовой станции, либо когда прохождение радиоволн в данное место затруднено). При чем запись испытательных текстов вел абонент в зоне неуверенного приема. Результаты тестирования показали, что при слабом сигнале устойчивее всех работают Sagem MC820 и Motorola cd930 ( $W_n=95$  и  $94\%$  соответственно). Слышимость речи была нормальная, «объемная» с мягким тембром. Хотя значение разборчивости Ericsson A1018s и Alcatel One Touch CLUB DUALBAND ( $W_n=93$  и  $92\%$  соответственно) изменилось не значительно, но в ходе тестирования наблюдались иногда перерывы сеанса связи (1-2 раза за 2 минуты сеанса) и очень часто проявлялось явление «эхо-передаваемой речи». Причем в Alcatel One Touch CLUB DUALBAND оно проявлялось даже несколько сильнее, чем в Ericsson A1018s.

В целом, оценивая тестируемые аппараты, можно отметить, наилучшие результаты тестирования на предмет слоговой их разборчивости показали в исследуемых условиях терминалы Sagem MC820 и Motorola cd930. Данные показали, что нижняя граница разборчивости слов при доверительной вероятности 0,95 для аппарата Sagem MC820 соответствует  $W_n=95-96\%$  (он уверенно занимает позицию на границе 1 и 2 класса качества) и соответственно 1 место. На втором месте находится терминал Motorola cd930 ( $W_n=95-94\%$ ) — 2 класс качества. На третьем почетном месте Ericsson A1018s ( $W_n=92-93\%$ ) (3 класс качества).

<sup>1</sup> Хотя в литературе при оценке по пятибалльной шкале при слоговой разборчивости 80-100% ставилась оценка «отлично».



## Глава 11. Передача данных по каналам мобильной связи

Стандарт GSM предусматривает возможность передачи данных между оконечным оборудованием со скоростью до 9600 бит в сек. Под данными подразумеваются: двоичные данные в произвольном формате, факсимильные сообщения и короткие сообщения в текстовом формате или в формате двоичных данных. Возможности режима передачи коротких сообщений соответствуют возможностям двухстороннего пейджера, обеспечивая при этом большую гибкость. Малые габариты абонентского оборудования GSM и высокая степень интегрированности его с современными цифровыми управляющими системами позволяют рекомендовать этот вид связи для использования в технических средствах специального назначения [14,15].

Использование сотовых систем связи оправдано в случаях, когда необходимо снизить габариты аппаратуры, уровень собственных электромагнитных излучений (и, соответственно, потребляемую аппаратурой мощность от автономного источника электропитания или бортсети), а также когда нужно обеспечить большую площадь действия системы. Параметры канала передачи данных позволяют обеспечить передачу речевой или малокадровой видеоинформации, что позволяет реализовать дополнительные функции обеспечения безопасности (передачу закодированной речи, скрытное прослушивание или скрытное наблюдение).

Возможность передачи данных теоретически заложена в любом абонентском аппарате GSM, однако, доступ к этим возможностям с помощью стандартных аппаратов голосовой связи может оказаться затруднительным, а в некоторых случаях невозможным без внесения изменений в конструкцию аппарата. Кроме того, многие функциональные принадлежности обычного аппарата оказываются излишними (например, клавиатура, дисплей, микрофон-телефон) и способны снизить некоторые эксплуатационные характеристики изделия (например, дисплей на ЖКИ ограничивает величину минимальной рабочей температуры единицами градусов ниже нуля, в то время как остальные электронные компоненты могут эксплуатироваться при температуре ниже  $-20^{\circ}\text{C}$ ). В связи с этим, ряд фирм выпускает специальные абонентские аппараты для передачи данных. Чаще всего такие аппараты выпускаются в виде стандартных PCMCIA карт, которые могут быть подключены к портативному компьютеру. Кроме того, выпускаются законченные устройства типа персонального цифрового секретаря (PDA) — карманного компьютера с вмонтированным телефонным аппаратом. С помощью подобного устройства можно вести речевые переговоры и проводить обмен данными. Наиболее известный пример — аппараты фирмы “Нокиа” серии 9000.

Ряд фирм выпускает аппаратуру, предназначенную не для конечного

пользователя, а для разработки на ее основе оригинального оборудования (например, модули M1, M20, A1 фирмы “Сименс”, модуль GM12 фирмы “Эрикссон”, GSM Modem фирмы “Фалькон” и др.). Именно подобные аппараты представляют наибольший интерес с точки зрения специального применения.

Рассмотрим основные возможности передачи данных на примере GSM-модема фирмы “Сименс” GSM Module M1, одного из первых аппаратов подобного типа.

Основные технические характеристики этого модуля:

- размеры 116 x 67 x 30 мм в пластмассовом корпусе, на котором расположены разъем RS232 и гибридный разъем для подключения питания и антенны;
- вес 157 г;
- диапазон питающего напряжения  $+8 - +24\text{ В}$ ;
- максимальный потребляемый ток 500 мА (в режиме ожидания 70–150 мА, в режиме передачи 220–500 мА, в режиме поиска станции – 130 мА);
- рабочий температурный диапазон  $-20^{\circ}\text{C} - +55^{\circ}\text{C}$ ;
- температура хранения  $-40^{\circ}\text{C} - +70^{\circ}\text{C}$ .

Имеется возможность дистанционного управления включением питания модуля: при подаче напряжения  $+5 - +24\text{ В}$  на контакт IGNITION модуль включается, при подаче напряжения менее  $+1\text{ В}$  в течение 550 микросекунд модуль выключается. Более современные модули фирмы “Сименс”, например GSM Module M20, кроме функций передачи данных содержат в себе средства для подключения речевого терминала.

Взаимодействие оконечного оборудования с модулем осуществляется по интерфейсу RS232 со скоростью обмена до 19200 бит/сек (модуль определяет скорость автоматически). Программный интерфейс основан на стандартном наборе AT-команд. К стандартному набору AT-команд добавлен ряд команд, определяющих специфику среды передачи данных, в соответствии со стандартом GSM 07.07. С помощью этих дополнительных команд можно осуществить блокировку/разблокировку работы модуля заданием PIN-кода, осуществить выбор сети связи, получить информацию о параметрах радиополя сети, а также выполнить ряд вспомогательных действий, характерных для любого терминала системы GSM. Команды для работы с короткими сообщениями соответствуют стандарту GSM 07.05. Данные передаются в трех основных режимах: в режиме передачи произвольных данных по трафиковому каналу (режим Transparent Data Transmission, в этом режиме поддерживаются протоколы V.22bis, V.32, V.110 ISDN со скоростью передачи данных от 2400 до 9600), в режиме передачи факсимильных данных (режим Fax Transmission, протокол Fax Group 3 со скоростью передачи данных 2400, 4800, 7200 и 9600) и в режиме передачи коротких сообщений (режим Short Message Service).

### 11.1 Передача данных по трафиковому каналу

В режиме передачи данных по трафиковому каналу передача осуществляется следующим образом:

- производится установление соединения с модемом абонента (“дозвонка”);
- после установления соединения для абонентов образуется виртуальный “выделенный” полнодуплексный канал связи (как в случае подключения телефонной линии);
- при установлении соединения все данные, поступающие на вход модема, передаются в канал связи;
- контроль за корректностью передаваемых данных программно осуществляется в оконечном оборудовании каждого абонента; система GSM лишь контролирует качество канала связи и может разорвать соединение в случае превышения в канале связи уровня ошибок и помех;
- при необходимости завершить передачу данных выдается специальная последовательность символов (Escape-последовательность, в стандартном варианте +++), после чего модем переходит в командный режим и может выполнить команду завершения сеанса связи.

При проведении экспериментов с модулями M1 по передаче данных по трафиковому каналу получены следующие результаты:

1. Модемы обеспечивают устойчивую передачу данных на скорости 9600, в том числе при условии движения одного из абонентов.
2. Аппаратура на центрах коммутации сети GSM-900 в г. Москве (оператор связи — компания “Мобильные телесистемы”) не полностью укомплектована модемами для передачи данных, в результате чего в ряде случаев затруднено установление соединения между двумя модемами (при наборе номера абонента выдается ответ станции “No Carrier — нет сигнала”).
3. Время установления соединения в среднем около 20–30 сек (без учета времени выхода на абонентский комплект базовой станции, имеющий модем).
4. В модуле M1, вероятно, содержится некоторая ошибка, в результате чего модуль периодически переходит в режим потери регистрации абонента в сети (ответ модема NO DIALTONE). Ошибка обычно пропадает после повторной выдачи AT-команды.

Стандартный режим передачи данных наиболее применим для передачи больших объемов информации, когда время передачи информации не меньше времени установления соединения.

Начиная с марта 1998 г. компания “Мобильные телесистемы” начала задействование сервисного центра коротких сообщений. В связи с этим появилась возможность тестирования этого режима передачи данных. Согласно стандартам GSM, короткое сообщение представляет собой массив

текстовых данных, представленных в 7 или 8 разрядном алфавитах. Блок данных в 7-разрядном алфавите может содержать до 160 символов, в 8-разрядном алфавите — до 140 символов. Данные в 7-разрядном алфавите могут содержать только стандартные символы ASCII. При использовании 8-разрядного алфавита имеется возможность передачи произвольных двоичных данных.

Режим передачи коротких сообщений значительно отличается от стандартного режима передачи данных с точки зрения конечного оборудования.

### 11.2 Передача коротких сообщений

В режиме передачи коротких сообщений оконечная аппаратура пользователя должна сформировать специальный блок данных в формате SMS — Submit PDU (Protocol Data Unit), определяемом стандартом GSM 03.40. В этом блоке данных записана информация об адресе абонента, длительности хранения сообщения в Сервисном центре коротких сообщений до прочтения его адресатом, определен формат передаваемых данных (7 или 8 бит), а также записано само сообщение в выбранном алфавите. Для 7-разрядного алфавита отводимая для сообщения область памяти рассматривается как битовое поле, разделенное на участки по 7 бит (т.е. биты, определяющие код символа, могут располагаться как в одном, так и в двух байтах, причем начальные биты текущего байта содержат информацию из следующего байта данных).

Сформированный блок данных в формате PDU может быть непосредственно передан в сервисный центр коротких сообщений, а может быть записан в память модема, расположенную в SIM-карте, и в дальнейшем передан в центр коммутации по отдельной команде. Этот режим может оказаться полезным при формировании заранее определенного набора сообщений, которые могут выдаваться по отдельной команде оператора.

Блок данных, который поступил от модема в сервисный центр коротких сообщений, в дальнейшем преобразуется в формат SMS-Deliver PDU и передается по мере возможности в аппаратуру адресата. В преобразованном блоке SMS-Deliver, который поступает в аппаратуру адресата, дополнительно содержатся сведения об отправителе сообщения (его телефонный номер) и время приема сообщения сервисным центром. При получении сообщения из сервисного центра в абонентском терминале получателя сервисный центр автоматически посылает на терминал отправителя сообщения информацию о времени получения данных.



Поскольку для передачи коротких сообщений применяются специальные средства системы GSM (контрольный канал или каналы сигнализации), гарантируется безошибочная передача сообщения от одного абонента к другому.

Производительность сервисного центра коротких сообщений, которым оснащен московский оператор GSM, в настоящее время составляет 1 сообщение в секунду. Практически эта производительность может быть повышена до 300 сообщений в секунду.

Проведенные эксперименты с использованием каналов передачи коротких сообщений позволяют сделать следующие выводы:

1. Модуль M1 устойчиво работает в режиме передачи–приема коротких сообщений.

2. Время доставки короткого сообщения от абонента до сервисного центра составляет до 5 сек.

3. Время доставки короткого сообщения от одного абонента к другому в целом составляет 10–20 сек.

4. Аппаратное и программное обеспечение модуля M1 не позволяет в сигнальном режиме обнаруживать факт приема короткого сообщения, поэтому программное обеспечение оконечного оборудования должно работать в режиме циклического опроса модуля M1 на предмет наличия не просмотренных коротких сообщений.

5. Память модуля M1 рассчитана на хранение до 10 коротких сообщений. Для освобождения памяти прочитанные короткие сообщения необходимо удалять по специальной команде.

Режим передачи коротких сообщений целесообразно применять при выдаче одиночных блоков данных небольшого объема (до 1120 бит), которые должны быть быстро доставлены адресату (например, отслеживание местоположения мобильного объекта в масштабе времени, близком к реальному, передача сигнала тревоги или управляющей команды).

Рассмотрим возможные варианты применения аппаратуры передачи данных по каналам связи GSM для систем обеспечения безопасности.

1. Система слежения за перемещением особо важных грузов, предметов, людей в совокупности с обеспечением их сохранности, безопасности.

Контролируемые автомашины оборудуются бортовым навигационным оборудованием, а также рядом датчиков (датчики контроля открытия/закрытия дверей, шок–сенсоры, датчики опрокидывания, термодатчики, скрытые микрофоны и видеокамеры). Бортовой контроллер обрабатывает информацию от датчиков и в соответствии с заданным алгоритмом (например, при возникновении отклонения от стандартного состояния датчиков, через заданные промежутки времени, при прохождении

заданных контрольных точек, при нажатии на тревожную кнопку) формирует информационные сообщения для центра контроля и слежения (ЦКС). Для охраны автомашин организуются бригады быстрого реагирования, находящиеся в движении на территории города или на стационарных базах. Автотранспорт бригад оборудуется бортовыми компьютерами, на экранах которых в реальном масштабе времени на фоне электронной карты отображаются местоположение объектов контроля, ближайших бригад, возможные маршруты движения к месту происшествия.

Подобные системы могут быть развернуты на территориях больших городов и вдоль основных магистралей для обеспечения безопасности дальних грузовых перевозок. Возможности национального и межнационального роуминга позволяют получить покрытие территории, аналогичное системам дальней спутниковой связи.

Информация о местоположении автомашин и о состоянии бортовых датчиков передается в виде коротких сообщений. Примерная схема подобной системы приведена на рис. 11.1.

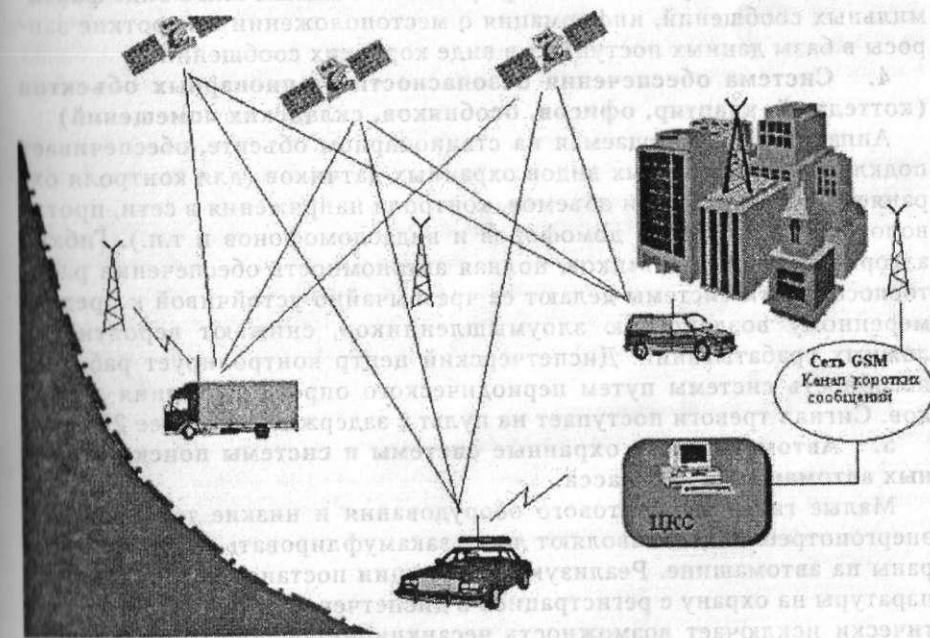


Рис. 11.1. Примерная схема системы слежения

## 2. Система диспетчеризации общественного или специального автотранспорта.

Предназначается для контроля маршрутов и/или графиков движения автотранспорта, выдачи управляющих команд водителям через речевые или информационные терминалы. Возможные пользователи: автобусные парки, компании маршрутных такси, скорая помощь, компании, осуществляющие грузовые перевозки по городу.

## 3. Система автоматизации оперативных подвижных групп подразделений охраны общественного порядка.

Бортовые компьютеры, устанавливаемые на автомашинах оперативных групп, реализуют функции автоматического определения их текущего местоположения и передачи этой информации в Дежурную часть (ДЧ). Компьютеры имеют средства автоматизации составления протоколов, обеспечения доступа в информационную базу ДЧ с целью проверки лиц, автотранспорта, адресов. Для передачи данных используются все возможные каналы GSM: большие объемы информации из базы данных передаются по трафиковым каналам или в виде факсимильных сообщений, информация о местоположении и короткие запросы в базы данных поступают в виде коротких сообщений.

## 4. Система обеспечения безопасности стационарных объектов (коттеджей, квартир, офисов, особняков, складских помещений)

Аппаратура, размещаемая на стационарном объекте, обеспечивает подключение различных видов охранных датчиков (для контроля охраняемых периметров и объемов, контроля напряжения в сети, противопожарных датчиков, домофонов и видеодомофонов и т.п.). Гибкие алгоритмы опроса датчиков, полная автономность обеспечения работоспособности системы делают ее чрезвычайно устойчивой к преднамеренному воздействию злоумышленников, снижают вероятность ложных срабатываний. Диспетчерский центр контролирует работоспособность системы путем периодического опроса состояния датчиков. Сигнал тревоги поступает на пульт с задержкой не более 20 сек.

## 5. Автомобильные охранные системы и системы поиска угнанных автомашин VIP-класса.

Малые габариты бортового оборудования и низкие требования к энергопотреблению позволяют легко закамouflировать аппаратуру охраны на автомашине. Реализуются функции постановки и снятия аппаратуры на охрану с регистрацией в диспетчерском центре, что практически исключает возможность несанкционированного отключения системы. Могут быть реализованы различные алгоритмы реагирования на попытку угона: немедленное включение иммобилайзера или блокировка двигателя, блокировка дверей салона по команде из дис-

петчерского центра, прослушивание салона, включение иммобилайзера в заданном месте (например, вблизи поста ДПС или отделения милиции) или при выходе из зоны действия сети связи и т.п. С помощью навигационной аппаратуры в диспетчерском центре производится непрерывное отслеживание местоположения автомашины.



## Глава 12. Цифровые системы мобильной связи стандарта GSM

### 12.1 Общая характеристика стандарта GSM

В 1982 г. под эгидой Европейской Конференции Административных Почт и Электросвязи (CEPT - *Conference of European Posts and Telegraphs*), объединяющей администрации связи 26 стран, была создана специальная группа *Group Special Mobile* с целью разработки единого европейского стандарта цифровой сотовой связи для выделенного диапазона 900 МГц. Аббревиатура GSM и дала название новому стандарту. Позднее, в связи с широким распространением этого стандарта во всем мире, GSM стали расшифровывать как *Global System for Mobile Communications* - Глобальная система мобильной связи.

В 1990 г. были опубликованы требования к системе сотовой связи стандарта GSM. Практическое применение общеевропейского стандарта GSM 900 началось в 1991 г.

В соответствии с Рекомендациями CEPT стандарт GSM 900 предусматривает работу в двух диапазонах частот: 890... 915 МГц - прямой канал (с БС на МС), 935...960 МГц - обратный канал (с МС на БС) [1]. Разнос по частоте прямого и обратного канала (дуплексный разнос) составляет 45 МГц.

Разнос частот между соседними каналами составляет 200 кГц. Таким образом, в отведенной для приема (передачи) полосе частот шириной 25 МГц размещаются 124 канала связи.

В стандарте GSM 1800 предусматривается работа в диапазонах 1710... 1785 МГц (БС), и 1805... 1880 МГц (МС), что при том же разноразности частот между соседними каналами позволяет разместить 374 канала.

В стандарте GSM используется многостанционный доступ с временным разделением. Это позволяет на одном частотном канале разместить 8 физических каналов.

Обработка речи осуществляется на основе системы прерывистой передачи речи DTX, которая обеспечивает включение передатчика только во время разговора. Для преобразования речевых сигналов используется речевой кодек RPE/LTP-LPC (см. гл. 8) с регулярным импульсным возбуждением и скоростью преобразования речи 13 кбит/с.

Для защиты от ошибок, возникающих в радиоканалах, применяется блочное и сверточное кодирование с перемежением. Повышение эффективности кодирования и перемежения достигается медленным переключением рабочих частот в процессе сеанса связи (217 скачков в секунду).

Для борьбы с замираниями сигналов, вызванных многолучевым распространением радиоволн, используются эквалайзеры, обеспечивающие выравнивание импульсных сигналов со среднеквадратическим отклонением времени задержки до 16 мкс.

Система синхронизации рассчитана на компенсацию абсолютного времени задержки сигналов до 233 мкс, что соответствует дальности связи (максимальному радиусу соты) 35 км.

Для модуляции радиосигнала используется спектрально-эффективная гауссовская частотная манипуляция с минимальным частотным сдвигом (GMSK).

Основные характеристики стандарта GSM сведены в таблицу (в скобках приведены данные стандарта GSM 1800).

Табл. 12.1. Основные характеристики стандарта GSM

Частотный диапазон прямого канала, МГц	935... 960 (1805...1880)
Частотный диапазон обратного канала, МГц	890...915 (1710...1785)
Дуплексный разнос частот приема и передачи, МГц	45
Скорость передачи сообщений в радиоканале, кбит/с	270,833
Скорость преобразования речевого кодека, кбит/с	13
Ширина полосы канала связи, кГц	200
Максимальное число каналов связи	124(374)
Максимальное число каналов, организуемых в БС	16-20
Вид модуляции	GMSK
Нормированная полоса	0,3
Ширина полосы гауссовского фильтра, кГц	81,2
Количество скачков по частоте в секунду	217
Временное разнесение в интервалах TDMA кадра (передача/прием) для подвижной станции	3
Вид речевого кодека	RPE/LTP-LPC
Максимальный радиус соты, км	35
Вид множественного доступа	TDMA/FDMA

## 12.2 Структура системы и общий алгоритм функционирования

Схема, иллюстрирующая функциональное построение ССМС стандарта GSM, была представлена в гл. 2. Там же было разъяснено назначение основных элементов системы и характер их взаимодействия.

По этой причине здесь целесообразно рассмотреть только особенности, присущие стандарту GSM.

Для контроля легальности использования каждая мобильная станция имеет уникальный международный идентификатор мобильного оборудования (IMEI - *international mobile station equipment identity*). Кроме того, каждый абонент получает стандартный сменный модуль подлинности абонента (SIM-карту - *subscriber identity module*), который содержит международный идентификационный номер (IMSI - *international mobile station subscriber identity*), персональный идентификационный номер (PIN - *personal identification number*), персональный код разблокировки (PUK - *personal unblocking key*), индивидуальный ключ ( $K_i$ ) и алгоритм (A3) аутентификации и другую информацию (в частности, SIM-карта может хранить данные, как электронная записная книжка). С помощью этой информации осуществляется полный цикл аутентификации и разрешается доступ абонента к сети.

Идентификаторы IMEI и IMSI не связаны друг с другом. Это позволяет использовать различные SIM-карты (например, зарегистрированные в различных сетях) с одним мобильным терминалом или одну SIM-карту на различных мобильных терминалах.

По выходной мощности МС делятся на 5 классов: 20 (класс 1), 8, 5, 2 и 0,8 (класс 5) Вт. Для мобильных телефонов типичным значением максимальной мощности является 2 Вт (класс 4).

В стандарте GSM предусмотрено управление мощностью излучения МС [104]. Минимальный уровень излучения МС 20 мВт. МС оценивает качество принимаемого сигнала (по частоте битовых ошибок) и передает соответствующую информацию КБС, который принимает решение о регулировке уровня выходной мощности. Шаг регулировки мощности составляет 2 дБ.

## 12.3 Архитектура радиointерфейса

Как уже сказано, исходный стандарт GSM предусматривает работу в двух диапазонах частот - 890...915 МГц для передатчиков МС и 935...960 МГц для передатчиков БС. В стандарте используется узкополосный (ширина полосы канала связи 200 кГц) многостанционный доступ, сочетающий частотное FDMA и временное TDMA разделение каналов. В рамках частотного

разделения стандарт с учетом защитных полос содержит 124 дуплексных канала с разносом частот приема и передачи в 45 МГц. Центральная частота канала (в МГц) связана с его номером соотношениями:

обратный канал (uplink)  $-f_0 = 890,200 + 0,200 * J, 1 < J < 124$ ;

прямой канал (downlink)  $-f_0 = 935,200 + 0,200 * J, 1 < J < 124$ .

В рамках временного разделения передача информации по каналу связи осуществляется в течение одного из 8 временных интервалов (слотов) длительностью 577 мкс на каждой из 124 несущих.

Организационно 8 слотов объединяются в кадры длительностью 4,615 мс, которые в свою очередь последовательно группируются в мультикадры, суперкадры и гиперкадры [1,4,36]. Длительность последнего определяет период последовательности кадров во временной структуре стандарта GSM. Номер кадра в пределах гиперкадра используется как входной параметр при криптографической защите передаваемых данных. Общая структура кадров и количественные соотношения между ее элементами представлены на рис. 12.1.

Каждые 4,615 мс (т.е. для каждого кадра) несущая частота „меняется по псевдослучайному закону (с сохранением дуплексного разноса 45 МГц). Всем активным абонентам, находящимся в одной соте, в процессе установления канала назначается единая частотно-временная матрица. Ортогональность последовательностей переключения частот для активных абонентов соты, работающих в одном временном слоте, обеспечивается различным начальным частотным сдвигом. В смежных сотах используются различные формирующие последовательности.

Цифровой информационный поток представляет собой последовательность пакетов, размещаемых в соответствующих временных интервалах (слотах).

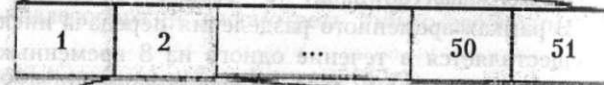
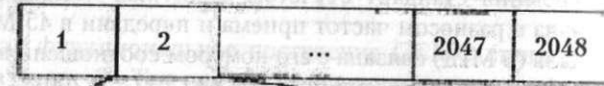
Пакеты формируются немного короче, чем слоты, их длительность составляет 0,546 мс, что необходимо для надежного приема сообщения при наличии дисперсии в канале. Информационное сообщение передается по радиоканалу со скоростью 270,833 кбит/с (слот содержит 156,25 бит, длительность одного бита 3,69 мкс).

По каналу связи передается либо информация сигнализации, либо кодированная речь или данные, поэтому в физическом канале могут быть реализованы либо логические каналы трафика, либо каналы управления, причем каждый из них может существовать в нескольких вариантах.

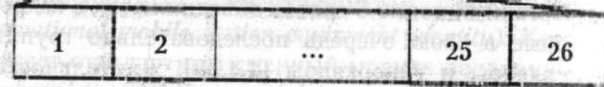
На рис. 12.2 показана классификация логических каналов стандарта GSM. Стрелки обозначают направление передачи: вниз - передача от БС к МС или передача сверху вниз (прямой канал), вверх - передача от МС к БС, снизу вверх (обратный канал), двунаправленная стрелка - передача в обоих направлениях. В стандарте GSM определены следующие типы логических каналов [4]:



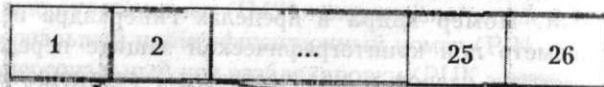
Гиперкадр =  
=2048 суперкадров=  
=2 715 648 кадров=  
=(3 ч 28 мин 53,760с 0  
Суперкадр =  
=51 мультикадр канала  
трафика = 1326 кадров



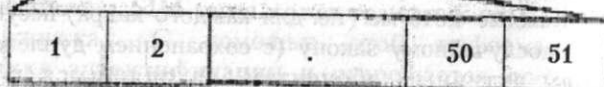
Мультикадр канала  
трафика = 26 кадров  
(120 мс)



Суперакдр = 26  
мультикадров канала  
управления = 1326  
кадров



Мультикадр канала  
управления = 51 кадр  
(235 мс)



Кадр = 8 слотов  
(4, 156 мс)

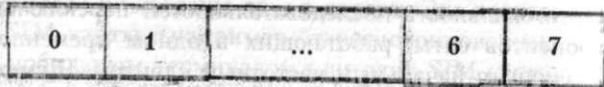


Рис 12.1 Временная структура радиоинтерфейса стандарта GSM

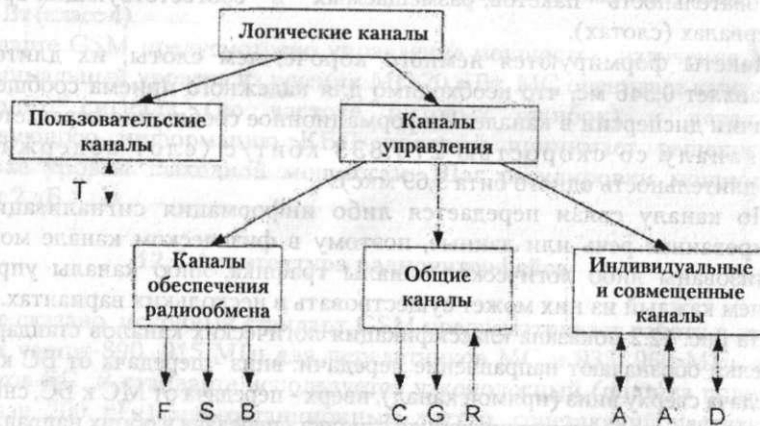


Рис 12.2

Пользовательские каналы (Т), или каналы трафика (traffic channels, ТСН) являются двусторонними. При передаче речи обеспечивают скорость 22,8 кбит/с или 11,4 кбит/с. Эти каналы используются и для передачи данных со скоростями от 2,4 кбит/с до 9,6 кбит/с. Определены следующие типы каналов трафика:

ТСН/FS (traffic channels I full speech) – полноскоростные каналы трафика речи, образуемые последовательностью слотов с одинаковыми номерами в пределах кадра;

ТСН/HS (traffic channels I half speech) – полускоростные каналы трафика речи, формируемые последовательностью слотов с одинаковыми номерами четных или нечетных кадров;

ТСН/F9.6, ТСН/F4.8 - полноскоростные каналы трафика данных со скоростью 9,6 кбит/с и 4,8 кбит/с соответственно и др.

Каналы управления (control channels) обеспечивают передачу сигналов управления и синхронизации. Различают несколько типов каналов управления:

1. BCCH (broadcast control channels) - вещательные каналы управления (каналы обеспечения радиообмена). Предназначены для передачи сигналов управления в направлении от базовой станции к подвижной в вещательном режиме, т.е. без конкретной адресации, и обеспечивают настройку МС для работы с сетью. В состав логических каналов этого типа входят:

FCCH (frequency correction channel - канал F подстройки частоты), обеспечивающий подстройку частоты несущей в МС;

SCCH (synchronization channel - канал S синхронизации), предназначенный для цикловой синхронизации МС в процедуре доступа и для передачи идентификатора БС, обслуживающей данную зону;

BCCH (канал управления передачей) - контрольный канал В, используемый для передачи информации о зоне обслуживания (идентификатора зоны обслуживания LAI - location area identity, периода регистрации).

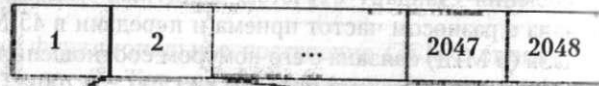
2. CCCH (common control channels) - общие каналы управления:

PCN (paging channel - канал вызова подвижной станции, или канал поиска С) - однонаправленный канал от БС к МС, используемый для организации входящего вызова к МС;

AGCH (access grant channel - канал разрешения доступа G) направлен только от БС к МС и информирует МС о выделенном канале сигнализации;

• RACH (random access channel - канал случайного доступа R) предназначен для передачи от МС к БС запроса о номере временного интервала сигнализации при доступе ее к сети.

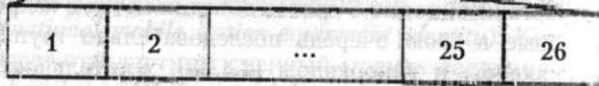
Гиперкадр =  
=2048 суперкадров=  
=2 715 648 кадров=  
=(3 ч 28 мин 53,760с 0  
Суперкадр =  
=51 мультикадр канала  
трафика = 1326 кадров



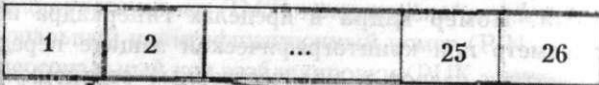
Мультикадр канала  
трафика = 26 кадров  
(120 мс)



Супекадр = 26  
мультикадров канала  
управления = 1326  
кадров



Мультикадр канала  
управления = 51 кадр  
(235 мс)



Кадр = 8 слотов  
(4, 156 мс)

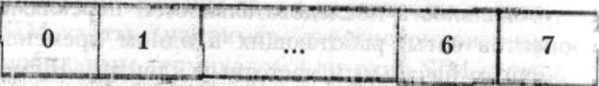
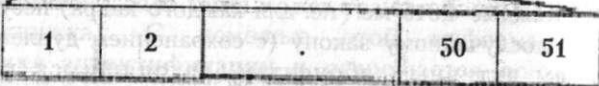


Рис 12.1 Временная структура радиоинтерфейса стандарта GSM

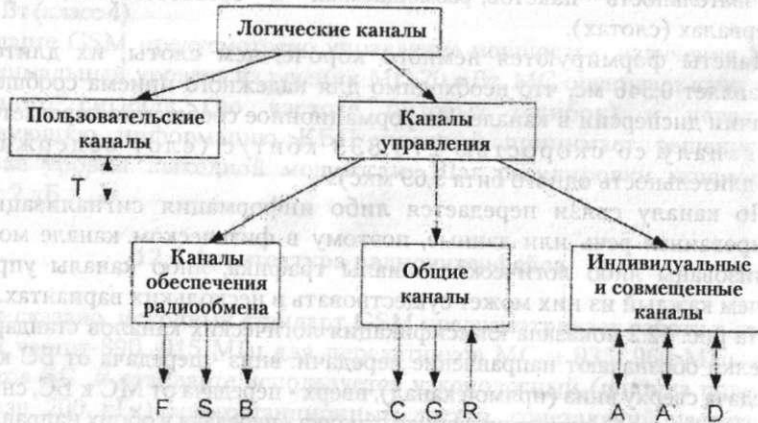


Рис 12.2

Пользовательские каналы (Т), или каналы трафика (traffic channels, TCH) являются двусторонними. При передаче речи обеспечивают скорость 22,8 кбит/с или 11,4 кбит/с. Эти каналы используются и для передачи данных со скоростями от 2,4 кбит/с до 9,6 кбит/с. Определены следующие типы каналов трафика:

TCH/FS (traffic channels I full speech) – полноскоростные каналы трафика речи, образуемые последовательностью слотов с одинаковыми номерами в пределах кадра;

TCH/HS (traffic channels I half speech) – полускоростные каналы трафика речи, формируемые последовательностью слотов с одинаковыми номерами четных или нечетных кадров;

TCH/F9.6, TCH/F4.8 - полноскоростные каналы трафика данных со скоростью 9,6 кбит/с и 4,8 кбит/с соответственно и др.

Каналы управления (control channels) обеспечивают передачу сигналов управления и синхронизации. Различают несколько типов каналов управления:

1. BCCH (broadcast control channels) - вещательные каналы управления (каналы обеспечения радиообмена). Предназначены для передачи сигналов управления в направлении от базовой станции к подвижной в вещательном режиме, т.е. без конкретной адресации, и обеспечивают настройку МС для работы с сетью. В состав логических каналов этого типа входят:

FCCH (frequency correction channel - канал F подстройки частоты), обеспечивающий подстройку частоты несущей в МС;

SCCH (synchronization channel - канал S синхронизации), предназначенный для цикловой синхронизации МС в процедуре доступа и для передачи идентификатора БС, обслуживающей данную зону;

BCCH (канал управления передачей) - контрольный канал В, используемый для передачи информации о зоне обслуживания (идентификатора зоны обслуживания LAI - location area identity, периода регистрации).

2. CCCH (common control channels) - общие каналы управления:

PCN (paging channel - канал вызова подвижной станции, или канал поиска С) - однонаправленный канал от БС к МС, используемый для организации входящего вызова к МС;

AGCH (access grant channel - канал разрешения доступа G) направлен только от БС к МС и информирует МС о выделенном канале сигнализации;

• RACH (random access channel - канал случайного доступа R) предназначен для передачи от МС к БС запроса о номере временного интервала сигнализации при доступе ее к сети.



SDCCCH (*stand-alone dedicated control channels*) - индивидуальные каналы управления, используемые в двух направлениях для связи между базовой и мобильной станциями.

Различают два вида таких каналов: SDCCH/4 и SDCCH/8 - индивидуальные каналы управления D, состоящие из 4 и 8 подканалов соответственно. Эти каналы предназначены для сигнализации в процессе установления соединения, например, для передачи результатов аутентификации и регистрации. По ним обеспечивается запрос подвижной станции о требуемом виде обслуживания, контроль правильного ответа БС и выделение свободного канала связи, если это возможно.

4. ACCH (*associated control channels*) - совмещенные каналы управления, которые также используются в двух направлениях. По направлению "вниз" передаются команды управления с БС, по направлению "вверх" - информация о статусе МС. Различают два вида таких каналов:

SACCH (*slow ACCH* - медленный совмещенный канал управления - канал A). По этому каналу БС передает команды для установки уровня мощности передатчика МС, которая посылает данные об уровне установленной выходной мощности, измеренном приемником уровня радиосигнала и его качестве;

FACCH (*fast ACCH* - быстрый совмещенный канал управления - канал A') служит для организации "эстафетной передачи".

Совмещенные каналы управления всегда объединяются с каналами связи (трафика) или индивидуальными каналами управления. Различают 6 видов объединенных каналов управления:

- FACCH/F = FACCH + TCH/F;
- FACCH/H = FACCH + TCH/H;
- SACCH/TF = SACCH + TCH/F;
- SACCH/TH = SACCH + TCH/H;
- SACCH/C4 = SACCH + SDCCH/4;
- SACCH/C8 = SACCH + SDCCH/8.

Двухнаправленный канал трафика T реализуется при частотном разделении физических каналов, связывающих БС с МС и МС с БС. В стандарте GSM прямые каналы используют диапазон 935...960 МГц, обратные - диапазон 890...915 МГц. Разнос по частоте прямого и обратного канала составляет 45 МГц. В каждом радиоканале имеется 8 временных интервалов, предназначенных для передачи информации от независимых источников. Таким образом, физический канал трафика задается указанием частотного поддиапазона радиоканала и номера временного интервала, используемого для передачи как вниз, так и вверх.

Однако МС следует дать время для обработки принятых сообщений и выполнения полученных команд управления. Поэтому временные циклы

прямого и обратного каналов сдвинуты на 3 интервала, как это показано на рис. 12.3. Стрелками отмечены моменты передачи информации двухстороннего канала T, размещенного во 2-м временном интервале. Комбинация, посланная БС во 2-м интервале, будет принята МС в 7-м, а пакет, переданный МС во 2-м дискрете, принят БС в 5-м.

Рассмотрим более подробно структуру кадров (слотов) передачи данных. По структуре и информационному содержанию можно выделить 5 типов слотов:



Рис. 12.3. Циклограмма обмена между МС и БС

- *normal burst* (NB) - нормальный временной интервал;
- *frequency correction burst* (FB) - интервал подстройки частоты;
- *synchronization burst* (SB) - интервал временной синхронизации;
- *dummy burst* (DB) - установочный интервал;
- *access burst* (AB) - интервал доступа, схематичное изображение которых представлено на рис. 12.4. Сокращения, использованные при обозначении полей слотов, имеют следующее содержание:
  - TB (*tail bits*) - запретный бланк (хвостовые биты);
  - ED (*encrypted data*) - закодированная информация;
  - SF (*stealing flag*) - скрытый флажок;
  - TS (*training sequence*) - обучающая последовательность;
  - GP (*guard period*) - защитный интервал;
  - ETS (*extended training sequence*) - расширенная обучающая последовательность;
  - ET (*extended tail*) - расширенный защитный бланк.

Слоты типа NB используются для передачи информации по каналам трафика и управления (за исключением канала доступа RACH). На данном временном интервале содержится 114 бит зашифрованного сообщения, разбитого на два подблока по 57 бит, обучающая последовательность в 26 бит,

разделяющая указанные информационные подблоки, два защитных бланка по 3 бита, защитный интервал в 8,25 бит и 2 скрытых флага по 1 бит, которые служат признаком передаваемой информации - трафика или сигнализации. Обучающая последовательность используется для решения следующих задач:

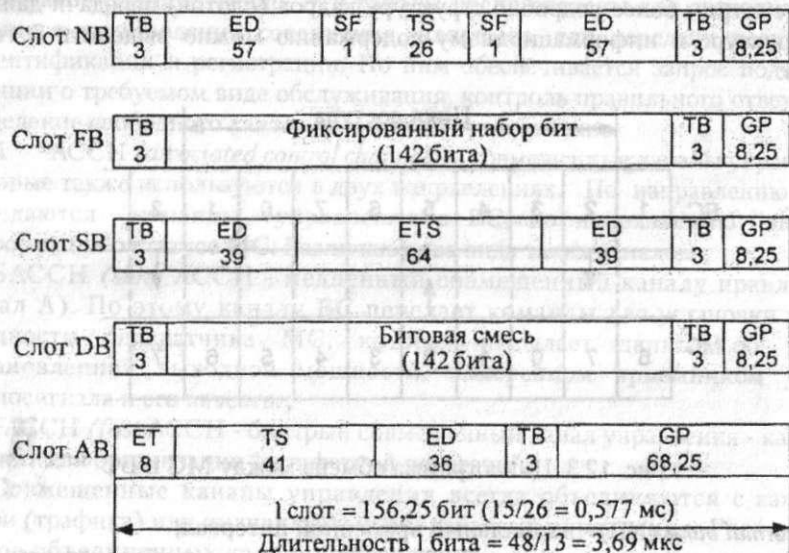


Рис.12.4

- оценка качества связи на основе сравнения принятой и эталонной последовательностей (определение частоты появления ошибок в двоичных разрядах - "битовых ошибок");

- оценка импульсной характеристики радиоканала и настройка адаптивного эквалайзера для последующей коррекции тракта приема сигнала;

- определение задержки распространения сигнала между БС и МС для оценки дальности радиосвязи.

Слоты FB предназначены для синхронизации по частоте подвижной станции. В этом временном интервале 142 бита являются нулевыми, что соответствует передаче немодулированной несущей со сдвигом на 1625/24 кГц выше ее номинального значения. Повторяющиеся временные интервалы FB образуют канал установки частоты FCCN.

Слоты типа SB используются для кадровой синхронизации, т.е. для синхронизации во времени базовой и подвижной станций. Каждый из них

содержит 64 бита расширенной синхропоследовательности, а также информацию о номере кадра и идентификационный номер БС. Слоты SB всегда передаются в паре с FB и образуют канал синхронизации (SCH).

Слоты DB обеспечивают установление и тестирование канала связи. По своей структуре DB совпадает с NB и содержит установочную последовательность длиной 26 бит. Контрольные биты отсутствуют, и не передается никакой информации, а только устанавливается факт работы передатчика.

Слоты AB предназначаются для организации доступа подвижной станции к новой БС. Структура этих слотов значительно отличается от ранее рассмотренной. Специфичность ее объясняется тем, что слоты AB определяют интервал, на котором подвижная станция впервые пытается установить связь с базовой. Поскольку время прохождения сигнала неизвестно, первая позиция слота отводится полю, являющемуся концевым у остальных типов. Расширенный защитный интервал в 68,25 бит, равный двойному значению наибольшей возможной задержки сигнала в соте, обеспечивает достаточное разнесение от сигналов других подвижных станций. Обучающая последовательность (41 бит) позволяет БС правильно принять последующие 36 бит информации от МС.

В каналах трафика TCH и совмещенных каналах управления FACCH и SACCH используется 26-кадровый мультикадр (рис. 12.5). В полноскоростном канале (TCH/FS) в каждом 13-м кадре передается пакет информации канала SACCH, каждый 26-й кадр свободен. В полускоростном (TCH/HS) канале связи информация канала SACCH передается в каждом 13-м и 26-м кадрах мультикадра. Скорость передачи информационных сообщений составляет 22,8 кбит/с (24 кадра по 114 бит за 120 мс) для полноскоростного канала или по 11,4 кбит/с на каждый из двух полускоростных каналов. Полная скорость передачи в объединенном канале TCH/SACCH составляет 24,7 кбит/с.

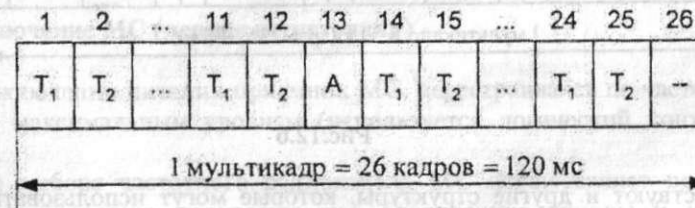


Рис.12.5



Быстрый совмещенный канал управления FACSCH передается половиной информационных бит временного интервала TDMA кадра в канале TCH, с которым он совмещается в восьми последовательных кадрах.

Для передачи каналов управления (кроме FACSCH и SACCH) используется 51-кадровый мультикадр. На рис. 12.6 показана структура мультикадра при передаче объединенного канала BCCH/CCCH в направлении "вниз". В этом канале передаются:

- общая информация о сети (соте), в которой находится подвижная станция, и о смежных сотах (канал BCCH);
- информация о временной (цикловой) синхронизации и опознавании приемопередатчика базовой станции (канал SCH);
- информация для синхронизации несущей (канал FCH);
- разрешение доступа подвижной станции (канал AGCH);
- вызов подвижной станции (канал PCH), если инициатором вызова является сеть.

По сигналам канала BCCH МС измеряет уровень сигнала БС рабочей ("своей") соты и до 16 смежных сот, а также код качества принимаемого сигнала в рабочей соте.

Канал BCCH/CCCH "вверх" используется только для передачи сигналов параллельного доступа RACH, который является единственным каналом управления от подвижной станции к сети. При этом подвижная станция может использовать для осуществления доступа к сети нулевой интервал в любом из кадров.

Полная скорость передачи для канала BCCH, а также для канала AGCH/PCH составляет 1,94 кбит/с (4 раза по 114 бит за 235 мс).

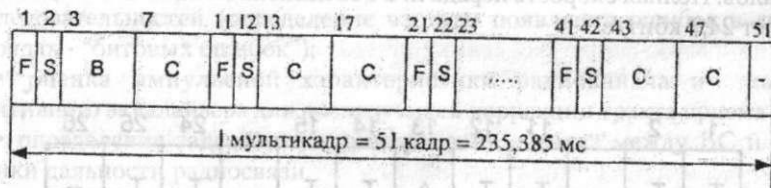


Рис.12.6

Существуют и другие структуры, которые могут использоваться в 51-кадровом мультикадре. Эти структуры называют "переменными", так как они зависят от нагрузки в сети.

В стандарте GSM строго определены временные и спектральные характеристики излучаемых сигналов. Различные формы огибающих излучаемых сигналов соответствуют разным длительностям интервала АВ (88 бит) по отношению к другим интервалам TDMA-кадра (148 бит). Временные маски огибающих и нормы на спектральную характеристику приведены, например, в [4].

Как упоминалось, в стандарте GSM применяется спектрально-эффективная гауссовская частотная манипуляция GMSK (см. § 7.2). При этом методе несущая частота дискретно, через интервалы времени, кратные периоду  $T_b$  битовой модулирующей последовательности, принимают одно из двух значений:

$$f_H = f_0 - F/4$$

или

$$f_B = f_0 + F/4$$

где  $f_0$  - центральная частота используемого частотного канала;  $F = 1/T_b$  - частота битовой последовательности.

Свое название "гауссовская" манипуляция получила из-за того, что последовательность информационных бит перед модулятором проходит через фильтр нижних частот (ФНЧ) с гауссовской АЧХ. За счет этого закон изменения фазы в течение посылки повторяет ход гауссовской интегральной функции распределения, чем обеспечивается плавность изменения частоты и высокая степень компактности спектра. В стандарте GSM применяется GMSK-модуляция с величиной нормированной полосы  $BT = 0,3$ , где  $B$  - ширина полосы фильтра по уровню - 3 дБ.

### 12.4 Взаимодействие радиointерфейса с сетью GSM

Обслуживание абонента и функционирование всей системы реализуется через ряд процедур. Поясним в упрощенном виде некоторые из них.

#### Подключение МС (первая регистрация)

При включении питания приемник МС, перестраиваясь по частоте, ищет сигнал с максимальным уровнем (используется логический контрольный канал В).

После выбора частотного радиоканала МС осуществляет подстройку частоты и кадровую синхронизацию (логические каналы F и S). По известному формату общего сигнала МС может определить характер служебной информации в следующих циклах доступа.

Однако сеть не знает о появлении новой активной МС. Для первой регистрации МС используется логический канал доступа R, общий для всех МС данной зоны. Поэтому возможны конфликтные ситуации в случаях, когда несколько МС будут одновременно пытаться связаться с БС по этому каналу. Для разрешения конфликта используется алгоритм асинхронного случайного множественного доступа типаALOHA [15].

Сигнал доступа содержит идентификатор данной МС (IMSI), по которому сеть узнает о появлении новой МС.

Для исключения несанкционированного использования ресурсов сети необходимо проверить подлинность абонента (точнее, SIM-карты). С этой целью проводятся процедуры аутентификации и идентификации.

В случае положительного итога аутентификации и идентификации данная МС отмечается как активная, запоминается код зоны ее местонахождения. В ВРМ ей присваивается временный идентификатор TMSI, который передается на МС как подтверждение состоявшейся регистрации (логический канал разрешения доступа G).

При негативном результате процедур аутентификации и идентификации дальнейшие действия определяются администрацией сети, которая, например, может санкционировать повторную попытку регистрации.

Таким образом, в результате проведения процедуры подключения сети известно, что МС с номером IMSI активна и находится в зоне LAI, обслуживаемой соответствующей БС. В памяти МС хранится тот же LAI. Для выполнения подключения потребовались логические каналы контроля, подстройки частоты, синхронизации, доступа и разрешения доступа.

### Отключение МС

При переходе в пассивное состояние МС посылает сообщение об отключении, чтобы сеть не искала ее при входящем вызове. Возможно, что из-за помех в радиоканале это сообщение не дойдет до КБС, и сеть ошибочно будет считать эту МС активной. Подтверждение о получении сигнала об отключении БС не может послать МС, так как последняя может быть уже обесточена.

Для разрешения этой ситуации используется процедура периодической регистрации. В активном состоянии МС через установленное время (например, 10... 15 мин.) обязана проводить регистрацию, подобную первой при подключении. Если МС не подтверждает свою работоспособность в течение определенного промежутка времени, она считается отключенной, что и отмечается опусканием флагов в ВРМ и ДРМ против идентификаторов соответственно TMSI и IMSI.

### Входящий вызов

Входящий вызов (см. рис. 12.7) поступает на коммутатор через межсетевой коммутационный центр подвижной связи МКЦМС (GMSC - gateway mobile services switching center), в котором определяется идентификационный номер (IMSI) вызываемого мобильного абонента и проверяется соответствие записи в ДРМ (2) и ВРМ (3). Данные возвращаются в МКЦМС (4), после чего ответственность за соединение передается тому ЦКМС, в чьей зоне обслуживания предполагается текущее нахождение вызываемой МС (5). Статус этой МС запрашивается в ВРМ (6).

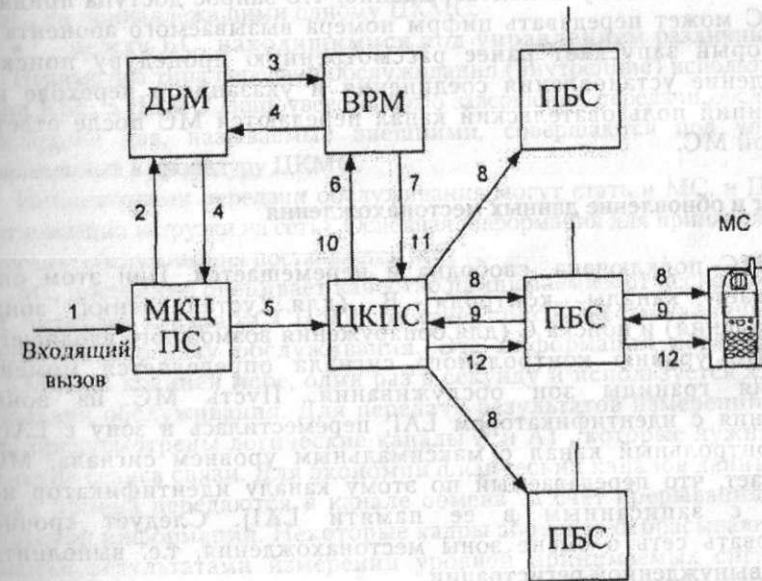


Рис.12.7

Если ВРМ подтверждает (7) досягаемость вызываемой МС, то вызов направляется (8) соответствующим подсистемам БС (ПБС). Вещательный адрес передается всеми БС, для чего используется логический канал поиска С. Мобильная станция в свободном состоянии непрерывно контролирует этот канал. Если МС отвечает на вызов какой-либо БС (9), то проводится процедура идентификации и аутентификации (10). В случае их успешного завершения ВРМ передает ЦКМС (11), что соединение может быть установлено (12).



### Исходящий вызов

Пусть МС активна и свободна. Абонент, желающий связаться с другим пользователем, должен набрать весь номер вызываемого абонента и только после этого начать процесс установления соединения. Это позволяет устранить ошибки в наборе номера (20% отказов в предоставлении нужного соединения) и сократить время на передачу цифр в КБС.

По команде "Вызов" МС, используя логический канал доступа, передает сообщение КБС на установление соединения. КБС проверяет категорию абонента (класс обслуживания), отмечает его как занятый и посылает МС по каналу D подтверждение, что запрос доступа принят. Теперь МС может передавать цифры номера вызываемого абонента в КБС, который запускает ранее рассмотренную процедуру поиска. Подтверждение установления соединения и указание о переходе на двухсторонний пользовательский канал передаются МС после ответа вызываемой МС.

### Роуминг и обновление данных местонахождения

Пусть МС подключена, свободна и перемещается. При этом она прослушивает каналы контроля В (для установления зоны местонахождения) и поиска С (для обнаружения возможного входящего вызова). По уровню контрольного сигнала определяется момент пересечения границы зон обслуживания. Пусть МС из зоны обслуживания с идентификатором LAi, переместилась в зону с LAj. Выбрав контрольный канал с максимальным уровнем сигнала, МС обнаруживает, что передаваемый по этому каналу идентификатор не совпадает с записанным в ее памяти LAi. Следует срочно информировать сеть о смене зоны местонахождения, т.е. выполнить процедуру вынужденной регистрации.

Для этого используется канал доступа, по которому МС передает запрос на обновление данных. Далее процесс обмена сигналами во многом напоминает процесс при первой регистрации. По окончании этой процедуры в ДРМ идентификатору IMSI данной МС сопоставлен LAj, известен номер КБС, который обслуживает новую зону, в ВРМ ЦКМС записан временный идентификатор TMSI рассматриваемой МС. В памяти МС хранится новый LAj.

Ясно, что при движении МС вдоль границы зон с разными идентификаторами может возникнуть эффект пинг-понга, когда придется часто выполнять процедуру вынужденной регистрации. В ЦКМС резко возрастают объемы данных, передаваемых между ДРМ, ВРМ, КБС.

### Эстафетная передача

Передача обслуживания (*handover* или *handoff*) является неотъемлемой функцией сотовой сети, предназначенной для обеспечения мобильных абонентов непрерывной связью.

В системе GSM применяется 4 типа передачи обслуживания:

- между каналами в одной и той же ячейке (cote), обслуживаемой одной БС;
- между смежными БС, находящимися под управлением одного и того же КБС;
- между БС, находящимися под управлением различных КБС, но принадлежащими одному ЦКМС;
- между БС, находящимися под управлением различных ЦКМС.

Первые два типа передачи обслуживания (внутренние) используют только один КБС, а ЦКМС лишь уведомляют о завершении передачи обслуживания; последние два, называемые внешними, совершаются под управлением вовлеченных в процедуру ЦКМС.

Инициаторами передачи обслуживания могут стать и МС, и ЦКМС (для оптимизации нагрузки на сеть). Основная информация для принятия решения о передаче обслуживания поставляется МС.

МС постоянно оценивает качество принимаемых от нескольких (до 16) БС сигналов канала ВССН и формирует список шести наилучших кандидатов на передачу обслуживания. Эта информация передается БС и ЦКМС, по крайней мере, один раз в секунду и используется алгоритмом передачи обслуживания. Для передачи результатов измерений от МС на БС предусмотрены логические каналы А и А1, которые нужны только в течение сеанса связи. Для экономии физических каналов данные об условиях приема передаются в канале обмена за счет прерывания пользовательской информации. Некоторые кадры абонента отбрасываются и заменяются результатами измерений уровнем принимаемых сигналов. \*На приемной стороне в пропущенные места вставляются, например, предыдущие кадры данных абонента. Поэтому скорость передачи по логическим каналам А не может быть сделана очень большой, чтобы сохранить требуемое качество пользовательского канала. Однако в условиях упоминавшегося эффекта пинг-понга требуется часто принимать решение о смене пользовательского канала.

Пусть МС занята, т.е. обменивается информацией с другим абонентом, и перемещается из зоны обслуживания с LAi, в зону с LAj. На границе зон возникает необходимость смены частотного радиоканала и выбора временного интервала без разрушения соединения, ранее установленного для обмена информацией между двумя абонентами.

Принятие решения о переключении вызова осуществляется сетью на основании как собственных измерений принимаемых сигналов, так и данных об условиях приема, передаваемых МС. Если уровни сигналов у БС и у МС одновременно не превышают некоторого порогового значения, выносится решение о переключении вызова, т.е. о смене пользовательского канала.

После принятия решения о переключении вызова КБС определяет новый двухсторонний пользовательский канал, а соответствующая МС получает указание о переходе на новый канал. Старый тракт при этом разрушается. По окончании сеанса связи МС должна получить доступ к сети и сделать запрос на обновление данных местонахождения, поскольку за время сеанса она могла переместиться в зону обслуживания с другим LAI.

## Глава 13. Цифровые системы мобильной связи стандарта cdmaOne (IS-95)

### 13.1. Общая характеристика системы

Технологию кодового разделения каналов в сотовых сетях телефонной связи стали применять недавно, однако сама по себе эта технология мультидоступа с кодовым разделением каналов, в основе которой лежит ортогональное разделение сигналов, известна давно. В СССР первая работа, посвященная этой теме, называлась «Основы теории линейной селекции» и была опубликована в сборнике ЛЭИС еще в 1935 году, а ее автором был Дмитрий Васильевич Агеев. А уже после войны, в течение долгого времени, технология CDMA использовалась в военных системах связи как в СССР, так и в США, поскольку имела много ценных для таких систем преимуществ, о которых будет сказано ниже.

Сам принцип CDMA заключается в расширении спектра исходного информационного сигнала, которое может производиться двумя различными методами: «скачки по частоте» и «прямая последовательность» [15,24,25,37,44-48,129,130,146,163].

Так называемые «скачки по частоте» (или FH - Frequency Hopping) реализуются следующим образом: несущая частота в передатчике постоянно меняет свое значение в некоторых заданных пределах по псевдослучайному закону (коду), индивидуальному для каждого разговорного канала, через сравнительно небольшие интервалы времени. Приемник системы ведет себя аналогично, изменяя частоту гетеродина по точно такому же алгоритму, обеспечивая выделение и дальнейшую обработку только нужного канала.

Второй метод «прямой последовательности» (или DS - Direct Sequence) основан на использовании шумоподобных сигналов и применяется в большинстве работающих и перспективных системах CDMA. Он предусматривает модуляцию информационного сигнала каждого абонента единственным и уникальным в своем роде псевдослучайным шумоподобным сигналом.

К недостаткам систем CDMA следует отнести необходимость использования достаточно широкой и неразрывной полосы частот, что не всегда возможно из-за дефицита частотного ресурса.

#### Стандарт IS-95: «cdma-one»

Стандарт IS-95 является технологией широкополосной шумоподобной связи с частотным диапазоном, который делится на несущие шириной примерно 1,25 МГц. Сегодня все системы, выполненные на базе стандарта IS-95, принято называть системами «cdma-one» (то есть, «они были первыми»).



В развитии этого стандарта несомненная заслуга «основоположника» этой технологии – американской компании Qualcomm, которая так и не смогла «войти» со своей технологией в телекоммуникационное пространство Украины в конце 90-х годов. Тем не менее, в соседней России оборудование компании Qualcomm и Nortel демонстрирует впечатляющие показатели. Так, в сотовой сети CDMA, установленной в Новочеркасске и Челябинске, устойчивая связь отмечается на расстояниях до 35 км от базовой станции при выходной мощности абонентского терминала – 0,2 Вт. Нельзя не отметить, что на сегодняшний день около 20-ти ведущих телекоммуникационных компаний приобрели лицензии на использование технологий Qualcomm.

Назовем основные характеристики, которые отличает эту технологию от других.

#### *Лучшее покрытие сот и повышение емкости сети.*

Размер соты системы CDMA больше размера типичной ячейки аналоговой системы или системы TDMA, поэтому для покрытия одной и той же площади в системе CDMA требуется меньше сот. В зависимости от загрузки системы и уровня помех их количество может быть снижено в два раза по сравнению с системами GSM.

#### *Улучшенное качество передачи речи*

Отличительными характеристиками системы CDMA являются усовершенствованные функции обнаружения и коррекции ошибок, поддержка более совершенных вокодеров, пространственное разнесение приемных антенн, «мягкая» передача абонентского терминала (handover) и точное управление мощностью передаваемого сигнала. Все это обеспечивает более высокое качество передачи речи, чем в системах TDMA или FDMA.

#### *Поддержка высококачественных вокодеров.*

Одним из уникальных достоинств стандарта CDMA стала одновременная поддержка многочисленных высококачественных вокодеров внутри системы. Новыми вокодерами для систем CDMA являются следующие: вокодер с генерацией кода и линейным предсказанием (Code Excited Linear Predictive – CELP), работающий на скорости 13 Кбит/с, и усовершенствованный вокодер с переменной скоростью (Enhanced Variable Rate Vocoder – EVRC), работающий на скорости 8 Кбит/с.

#### *Помехоустойчивость и борьба с замираниями.*

При использовании радиосигналов сталкиваются с наличием замираний принимаемого сигнала, вызванных его многолучевым распространением. Системы, базирующиеся на технологии TDMA, и аналоговые системы

особенно подвержены этому, поскольку они являются узкополосными системами передачи. Благодаря частотной избыточности системы CDMA могут успешно работать при наличии в их полосе обычных узкополосных радиостанций.

#### *“Мягкая” передача трубки.*

Все аналоговые сотовые системы или сотовые системы TDMA используют “жесткую” передачу абонентского терминала. При такой передаче аппарат абонента теряет канал до того, как будет занят следующий. По технологии CDMA используется “мягкая” передача абонентского терминала. За телефоном абонента непрерывно следят две или три базовые станции. Схема транскодера CDMA такова, что позволяет сравнивать качество сигналов от двух приемников базовых станций и захватывать лучший.

#### *Передача данных и факсимильных сообщений в CDMA*

В системе CDMA поддерживается одновременная передача речи и данных. Два цифровых потока информации мультиплексируются на покадровой основе, причем речь имеет приоритет над данными, что позволяет поддерживать надлежащее качество ее передачи.

#### *Служба пакетной передачи данных*

Пакетная передача данных обеспечивает абонентам возможность непосредственного подключения к сети Интернет и другим сетям. Последнее будет устанавливаться через IP-адреса, которые посылаются как часть сообщения с пакетными данными. Во многих случаях для этого типа соединений не требуется никакого взаимодействия модемов. Одно из главных достоинств пакетного режима передачи данных – это возможность аппарата абонента связываться со множеством точек во время одного и того же сеанса.

Технология CDMA также подходит для организации фиксированной связи (WLL). В сетях WLL пропускная способность значительно больше таковой в подвижных сетях CDMA. Напротив, аналоговые или TDMA фиксированные беспроводные системы не обеспечивают никакого увеличения пропускной способности при переходе к системам WLL.

#### *Адаптивная регулировка мощности передатчика.*

В сетях подвижной связи абоненты перемещаются с некоторой скоростью и часто испытывают случайные падения уровня сигнала – быстрые замирания. Для компенсации такого замирания и поддержания требуемой величины соотношения пропускной способности к уровню помех в алгоритме регулирования мощности подвижной системы CDMA существует команда по увеличению мощности, передаваемой телефонным аппаратом абонента.

С опорой на преимущества, предоставляемые технологией CDMA, компанией Qualcomm (США) была разработана сотовая система мобильной связи (ССМС) общего пользования с кодовым разделением каналов. При этом основными стимулами явились увеличение абонентской емкости по сравнению с действующими ССМС, основанными на традиционном частотно-временном доступе, улучшение качества обслуживания и повышение информационной безопасности. Технические требования к системе сформулированы в ряде стандартов Ассоциации Промышленности связи (*Telecommunication Industry Association* - ТИА), определяющих характер и порядок взаимодействия различных функциональных узлов ССМС и условия совместимости аппаратуры различных фирм-производителей. К числу основных стандартов рассматриваемой ССМС относятся:

IS-95 - эфирный интерфейс (радиоинтерфейс);

IS-96 - интерфейс речевых служб;

IS-97 - интерфейс мобильной станции;

IS-98 - интерфейс базовой станции;

IS-99 - интерфейс службы передачи данных.

Учитывая особую значимость радиоинтерфейса, рассматриваемую систему называют ССМС стандарта IS-95, либо, принимая во внимание технологию организации множественного доступа, системой cdmaOne.

Система IS-95 рассчитана на работу в диапазоне частот 800 МГц, причем для прямого канала (линия "вниз") выделен участок спектра 869,04...893,97 МГц, а для обратного (линия "вверх") - 824,04...848,96 МГц. Ширина полосы канала связи составляет 1,25 МГц, поэтому при развертывании ССМС IS-95 операторы могут осуществлять частотное планирование, исходя из указанных полос. Однако согласно решению Федеральной Комиссии связи США, одному оператору может быть выделен максимальный диапазон частот, равный 12,5 МГц как в прямом (от БС к МС), так и в обратном (от МС к БС) направлениях, что соответствует 10 физическим частотным радиоканалам с полосой в 1,25 МГц.

Как указывалось выше, технология организации множественного доступа с кодовым разделением каналов основана на применении сложных (spread spectrum) сигналов, полоса которых значительно превышает ширину спектра информационного сообщения. В системе IS-95 реализовано прямое расширение спектра (DSSS) с использованием функций Уолша длины 64 и двух типов псевдослучайных последовательностей (ПСП): короткой и длинной. Линия "вниз" организована на основе синхронного варианта CDMA, использующего для разделения физических абонентских каналов ансамбль сигнатур в виде функций Уолша. Асинхронный режим CDMA в обратном канале осуществлен приписыванием различным абонентам одной соты специфических сдвигов длинной ПСП.

Как неоднократно отмечалось, выравнивание мощностей сигналов МС на входе приемника БС является непременным условием работоспособности линии "вверх" системы CDMA. В стандарте IS-95 применена быстродействующая петля автоматической регулировки мощности сигналов МС, принцип действия которой описан в [48,104]. Регулировка осуществляется в динамическом диапазоне 84 дБ с шагом  $\pm 0,5$  дБ и с периодичностью от нескольких микросекунд до 1,25 мс. Резерв фактора речевой активности также утилизирован в системе посредством использования речепреобразующего устройства (вокодера) с переменной частотой преобразования аналогового речевого сигнала в цифровой. В зависимости от активности абонента вокодер формирует потоки данных со скоростями 8,6; 4; 2 и 0,8 кбит/с [29-35].

Требуемое качество передачи данных в системе достигается с помощью довольно мощного канального кодирования, выполняемого в несколько этапов. На первом, предварительном этапе цифровой речевой сигнал с выхода вокодера, структурированный в кадры длительностью в 20 мс, кодируется блоковым циклическим кодом для формирования индикатора качества кадра и дополняется "хвостом", необходимым для последующего сверточного кодирования. Введение подобной избыточности увеличивает фактические скорости данных, заменяя первоначальный их набор на 9,6; 4,8; 2,4 и 1,2 кбит/с. Следующим этапом является сверточное кодирование. В прямом канале используется код с длиной кодового ограничения 9 и скоростью 1/2, тогда как код в обратном канале, обладающем меньшей помехоустойчивостью (мощность передатчика МС весьма мала), имеет вдвое большую избыточность, т.е. скорость 1/3 при той же длине кодового ограничения. Наконец, на третьем этапе выполняется перемежение информационного потока в кадре для нейтрализации эффекта пакетирования ошибок.

Помимо перемежения, для борьбы с быстрыми замираниями в системе использовано и многолучевое разнесение, т.е. приемники на основе алгоритма RAKE. Для этого на БС используется минимум четыре, а на МС - три параллельно работающих коррелятора. Помимо этих корреляторов, настраиваемых на определенную задержку, в каждом приемнике имеется еще и сканирующий по задержке канал, позволяющий осуществлять настройку RAKE-каналов на сигналы с наибольшей интенсивностью.

Наличие нескольких параллельных каналов корреляционной обработки позволяет осуществить *мягкую эстафетную передачу*, (*soft handoff* или *soft handover*) при переходе МС из одной соты в другую. В процессе мягкой эстафетной передачи МС может поддерживать соединение с двумя и более БС, выбирая сигнал с большей интенсивностью. Указанная процедура позволяет поддерживать высокое качество связи при переключении МС с одной БС на другую и делает эстафетную передачу практически незаметной для пользователя.



Табл.13.1. Основные характеристики стандарта IS-95

Параметр стандарта	Значение
Диапазон частот передачи, МГц: МС БС	824,040... 848,860 869,040... 893,970
Относит. нестабильность несущей частоты: МС БС	$\pm 2,5 \cdot 10^{-6}$ $\pm 5 \cdot 10^{-8}$
Вид модуляции несущей частоты: МС БС	QPSK QPSK
Ширина спектра излучаемого сигнала, МГц: по уровню -3 дБ по уровню -40 дБ	1,23 1,5
Тактовая частота ЦСП, МГц	1,2288
Количество каналов на одной несущей: МС: канал доступа канал обратного трафика БС: пилотный канал канал синхронизации канал персонального вызова канал прямого трафика	1 1 1 1 1...7 61...55
Скорость передачи данных в канале, бит/с: канал синхронизации канал персонального вызова и доступа канал трафика	1200 4800,9600 1200, 2400, 4800, 9600
Кодирование информации в каналах: МС: канал доступа и обратного трафика БС: канал синхронизации, персонального вызова и прямого трафика	Сверточный код с длиной кодового ограничения 9 и скоростью 1/3 Сверточный код с длиной кодового ограничения 9 и скоростью 1/2
Требуемое отношение сигнал/шум, дБ	6..7
Макс. эффектив. излучаемая мощность, Вт: МС (3-го, 2-го и 1-го класса) БС	1,0; 2,5; 6,3 До 50
Точность управления мощностью передатчика, дБ	+0,5
Чувствительность приемника, дБм: МС БС	-105 -117

Стандарт IS-95 обеспечивает высокую степень безопасности передаваемых данных за счет их скремблирования выборками из вышеупомянутой длинной псевдослучайной последовательности. Ключ (маска) скремблирования индивидуален для каждой МС и формируется по секретному правилу на базе ее идентификационного номера.

Основные характеристики стандарта IS-95 и технические параметры приемо-передающего оборудования представлены в табл. 13.1 [44-48].

Для систем с CDMA и, в частности, для CCMC IS-95 характерна определенная асимметрия линий "вниз" и "вверх": в первой из них (от БС) все абонентские сигналы передаются из одной пространственной точки и потому могут быть легко синхронизированы (синхронный вариант CDMA). В направлении же от БС к МС приходится применять асинхронное кодовое разделение.

Отметим, что временные шкалы отдельных БС сети IS-95 также синхронизированы. Для этого каждая БС оборудована приемником радионавигационной системы GPS NAVSTAR. Благодаря единому системному времени кодовое разделение сигналов различных БС, занимающих один и тот же частотный канал, осуществлено за счет применения различных сдвигов одной и той же короткой ЦСП.

### 13.2 Архитектура прямого канала

Логические каналы линии "вниз" включают:

- пилотный канал (*pilot channel*);
- канал синхронизации (*synchronization channel*);
- канал персонального вызова (*paging channel*);
- канал прямого трафика (*forward traffic channel*).

Отображение логических каналов на физические в прямом направлении осуществляется с помощью системы ортогональных функций Уолша длины 64:  $w_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, 63$ , где  $i$  - номер функции Уолша. Стандартом IS-95 предусматривается организация одного пилотного канала, одного канала синхронизации, от одного до семи каналов вызова (в зависимости от абонентской нагрузки на БС) и от 55 до 62 каналов прямого трафика, поскольку часть каналов вызова допускается использовать в качестве каналов трафика. Соответствие между логическими и физическими каналами показано на рис. 13.1.

### 13.2.1 Пилотный канал

Пилотный канал предназначается для начальной синхронизации МС с сетью и оценки параметров прямого канала приемником МС. Мощность, отведенная пилотному каналу, обычно на 4...6 дБ превышает мощность в канале трафика. Тем самым обеспечиваются, с одной стороны, условия для надежного ввода и последующей устойчивой работы петель автоподстройки фазы и задержки когерентного приемника МС, а с другой - точность измерений параметров сигнала БС, достаточная для процедур RAKE, эстафетной передачи и управления мощностью БС.

Согласно рис. 13.1 пилотному каналу присвоена нулевая функция Уолша  $w_0$ , т.е. последовательность из одних нулей.

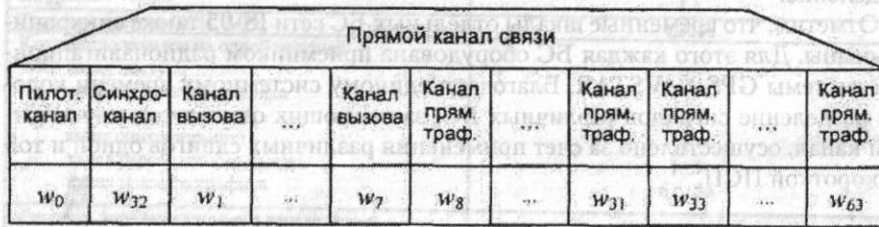


Рис. 13.1. Структура прямого канала ССМС стандарта IS-95

Информационные данные по этому каналу не передаются, т.е. могут также трактоваться как последовательность из одних нулей. После сложения по модулю 2 этих двух последовательностей результирующий поток (также состоящий из одних нулей)<sup>1</sup> поступает на преобразователь, превращающий булевы значения символов (0,1) в двуполярные отсчеты (+1, -1) соответственно. После объединения с сигналами других физических каналов (см. ниже) суммарный сигнал поступает на КФМ-модулятор, в котором подвергается прямому расширению спектра, перемножаясь с двумя псевдослучайными скремблирующими последовательностями ПСП-1 и ПСП-Q (символы I и Q отвечают синфазной и квадратурной составляющим). Период каждой из названных ПСП содержит 215 чипов, частота следования которых согласно стандарту (см. табл. 13.1) составляет 1,2288 Мчип/с. Прямой подсчет показывает, что на одном двухсекундном отрезке умещается в точности 75 периодов коротких ПСП [44-46]. Структурно короткие ПСП представляют собой M-последовательности длины

$$N = 2^{15} - 1 \text{ с характеристическими полиномами}$$

<sup>1</sup> Тривиальные нулевые последовательности данных и  $w^0$  явно показаны на рис. 13.2, чтобы сохранить единообразие с последующими схемами.

$$f_I = x^{15} + x^{13} + x^9 + x^8 + x^7 + x^5 + 1$$

и

$$f_Q = x^{15} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + 1$$

расширенные добавлением нулевого символа к цепочке из 14 последовательных нулей на каждом периоде.

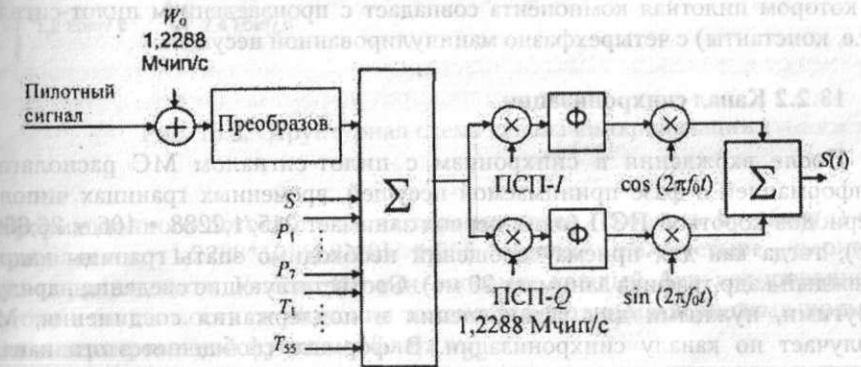


Рис. 13.2. Структурная схема пилотного канала

Как можно видеть, фактически в пилотном канале передается только пара ПСП-1 и ПСП-Q или, что эквивалентно, комплексная ПСП. Данная комплексная короткая ПСП одинакова для всех 64 CDMA-каналов и используется всеми БС системы, но с разными циклическими сдвигами. Разница в циклических сдвигах позволяет МС разделять сигналы, излучаемые БС разных сот или секторов, т.е. позволяет идентифицировать номер БС либо сектора. Для различных БС сдвиг изменяется с постоянным шагом, равным 64 чип x PILOT\_INC, где системный параметр PILOT\_INC принимает значения от 1 до 4. Таким образом, при минимальном шаге доступен  $215/26 = 29 = 512$  сдвигов коротких ПСП, т.е. возможно бесконфликтное существование сети, состоящей из 512 БС. Если же необходимо, чтобы сеть состояла из большего числа БС, то при территориальном планировании сети легко можно добиться, чтобы БС с одинаковыми циклическими сдвигами коротких ПСП не могли одновременно находиться в зоне радиовидимости МС.

С другой стороны, шаг сдвига ПСП однозначно определяет размер соты (или сектора), при котором МС с гарантией различает ПСП, имеющие



минимальный временной сдвиг. Нетрудно убедиться, что при минимальном сдвиге в 64 чипа радиус соты составит порядка 15,5 км.

После перемножения с квадратурными ПСП сигнал в каждом из квадратурных плеч КФМ-модулятора фильтруется для формирования приемлемого спектра и перемножается со сдвинутыми на  $90^\circ$  гармоническими колебаниями центральной частоты.

Суммирование выходов квадратурных плеч дает модулированный сигнал, в котором пилотная компонента совпадает с произведением пилот-сигнала (т.е. константы) с четырехфазно манипулированной несущей.

### 13.2.2 Канал синхронизации

После вхождения в синхронизм с пилот-сигналом МС располагает информацией о фазе принимаемой несущей, временных границах чипов и периодов короткой ПСП (один период занимает  $215/1,2288 \cdot 106 = 26,666...$  мс), тогда как для приема сообщений необходимо знать границы кадров (каждый кадр трафика занимает 20 мс). Соответствующие сведения наряду с другими, нужными для установления и поддержания соединения, МС получает по каналу синхронизации. В формате сообщения этого канала содержатся данные о точном времени в системе (SYS\_TIME), значении циклического сдвига короткой ПСП данной БС (PILOT\_PN), идентификаторы БС и ЦКМС (MSC), значение мощности сигнала в пилотном канале, параметры длинной ПСП (LC\_STATE), скорость передачи данных в канале персонального вызова (PRAT). Структуру физического канала синхронизации поясняет рис. 13.3.

Данные канала синхронизации, поступающие со скоростью 1200 бит/с, подаются на вход сверточного кодера. После осуществления операции кодирования (длина кодового ограничения -9, скорость кода  $1/2$ ) с выхода снимается двоичная последовательность со скоростью 2400 бит/с, поступающая далее на устройство повторения, после которого скорость потока данных удваивается до 4800 бит/с. Информация, передаваемая по каналу, структурирована в кадры длительностью в 26,666... мс. Каждый кадр совпадает с одним периодом короткой ПСП и содержит 32 бита исходных данных (128 символов с учетом сверточного кодирования и повторения). Как видно из рис. 13.3, следующей операцией является блочное перемежение в пределах кадра синхроканала, служащее для борьбы с пакетными ошибками. После блочного перемежителя поток данных подвергается прямому расширению спектра путем сложения по модулю 2 с присвоенной каналу синхронизации функцией Уолша  $w_{32}$  и преобразования булевых переменных в действительные 1 и -1. Как можно видеть, каждому биту

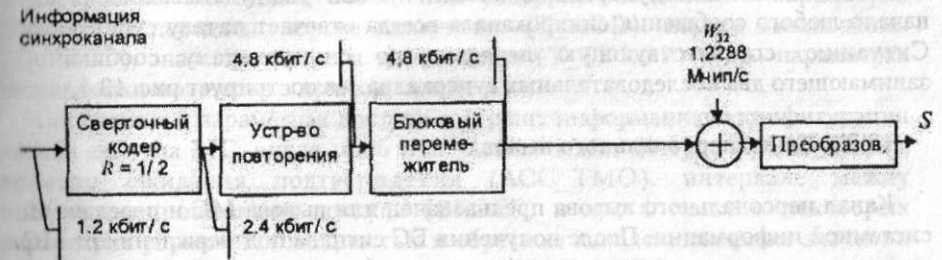


Рис. 13.3. Структурная схема канала синхронизации

информационного потока с выхода перемежителя (скорость 4,8 кбит/с) сопоставляется  $1,2288 \cdot 10^6 / 4,8 \cdot 10^3 = 256$  чипов, т.е. четыре периода последовательности Уолша. Иными словами, каждый бит кодированного потока в зависимости от значения заменяется четырьмя периодами прямой или инвертированной функции Уолша  $w_{32}$ .

Последующие операции в канале повторяют рассмотренные ранее: сигнал канала синхронизации объединяется с сигналами других каналов, поступая на вход S на рис. 13.2, после чего в КФМ-модуляторе перемножается с комплексной короткой ПСП (скремблируется) и переносится на несущую.

Каждые три кадра (96 информационных бит) в канале синхронизации образуют один суперкадр длительности 80 мс, соответствующий четырем кадрам канала трафика (см. ниже). Сообщение, передаваемое по каналу синхронизации, может занимать более одного суперкадра, вследствие чего передаваемые данные подвергаются определенной структурной организации, называемой *капсулированием*. Полученная в результате подобного преобразования капсула состоит из самого сообщения синхроканала и добавочных бит, заполняющих оставшееся битовое пространство до начала следующего суперкадра. Необходимость подобной упаковки данных объясняется тем, что начало любого сообщения всегда должно совпадать с началом суперкадра.

Каждый кадр синхроканала начинается битом-заголовком, называемым *битом начала сообщения (start-of-message - SOM)*. Значение этого бита, равное 1, указывает на начало сообщения, передаваемого по синхроканалу, а значение, равное 0, свидетельствует о том, что текущий кадр содержит сообщение, начавшееся в некотором предыдущем кадре. В результате БС может передавать синхросообщение, занимающее несколько кадров подряд. Следует также отметить, что значение SOM-бита, равное 1, всегда должно

совпадать с началом суперкадра, поскольку, как уже указывалось ранее, начало любого сообщения синхроканала всегда отвечает началу суперкадра. Ситуацию, соответствующую передаче по синхроканалу сообщения, занимающего два последовательных суперкадра, иллюстрирует рис. 13.4.

### 13.2.3 Канал персонального вызова

Канал персонального вызова предназначен для вызова МС и передаче ей системной информации. После получения БС сигнала подтверждения от МС по этому же каналу передается информация об установлении соединения и назначении канала связи. Сообщения, передаваемые по каналу вызова, могут быть четырех типов:

- заголовок (*overhead message*);
- пейджинг (*вызов*) (*paging message*);
- ордер (*команда*) (*order message*);
- назначение каналов (*channel assignment message*).

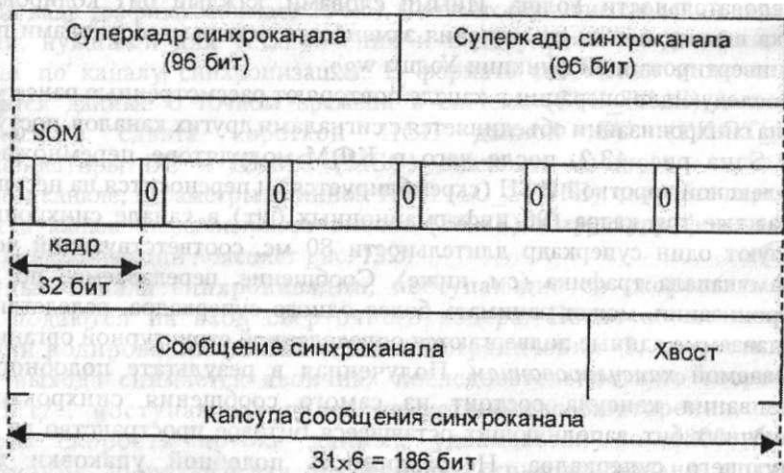


Рис.13.4 Структура кадров канала синхронизации

Заголовок содержит информацию о важнейших параметрах конфигурации системы и передается на МС в виде следующих типовых сообщений:

- параметры системы (*system parameters message*);
- параметры доступа (*access parameters message*);
- граничный список (*neighbor list message*);
- список CDMA-каналов (*CDMA channel list message*).

Первое из названных сообщений содержит сведения о параметрах эстафетной передачи: пороге включения ( $T\_ADD$ ), пороге выключения ( $T\_DROP$ ), значении таймера выключения ( $T\_TDROP$ ) и др., параметрах регулировки мощности в прямом канале и т.п.

Сообщение о параметрах доступа содержит информацию о конфигурации канала доступа МС: числе проб при установлении доступа ( $NUM\_STEP$ ), времени ожидания подтверждения ( $ACC\_TMO$ ), интервале между отдельными попытками доступа ( $BKOFF$ ) и др., а также о некоторых параметрах управления мощностью в обратном канале: начальном значении мощности излучения в канале доступа ( $INIT\_PWR$ ), шаге приращения мощности излучения ( $PWR\_STEP$ ) и др.

Сообщение о граничном списке содержит перечень циклических сдвигов ПСП соседних БС или секторов, использование которого позволяет оптимизировать процесс эстафетной передачи.

Сообщение о списке CDMA-каналов позволяет МС узнать расположение тех полос (шириной 1,25 МГц) частотного плана, в которых размещены каналы персонального вызова. Указанные сообщения постоянно принимаются МС, а их содержание меняется с течением времени в зависимости от изменения положения МС в сети.

Пейджинговое сообщение содержит вызов, адресованный одной конкретной МС либо группе МС.

Сообщение типа "ордер" охватывает широкий класс команд управления МС. Данные сообщения используются для подтверждения регистрации МС, ее блокировки в состоянии сбоя и т.п.

Сообщения о назначении каналов указывают МС выделенный канал трафика, назначают ей другой канал персонального вызова и др.

Структурная схема формирования сигналов канала персонального вызова представлена на рис. 13.5. В отличие от канала синхронизации, скорость поступления информации в канале составляет 4,8 или 9,6 кбит/с. Исходный битовый поток проходит через сверточный кодер и (только при входной скорости в 4,8 кбит/с) устройство повторения, так что при любой из двух начальных скоростей скорость кодированного потока оказывается равной 19,2 кбит/с. После осуществления блокового перемежения в пределах 20-миллисекундного кадра поток данных скремблируется децимированной длиной ПСП периода 242 -1, а затем, подвергается расширению спектра так же, как это делалось для уже рассмотренных каналов: суммируется по модулю два с отведенной каналу функцией Уолша из набора ил,-ни/7 с последующим переходом от булевых переменных к действительным +1 и -1. Далее следует объединение с остальными каналами (входы P1 - P7 на рис. 13.2), а затем (в модуляторе) перемножение с комплексной короткой ПСП и перенос на несущую.



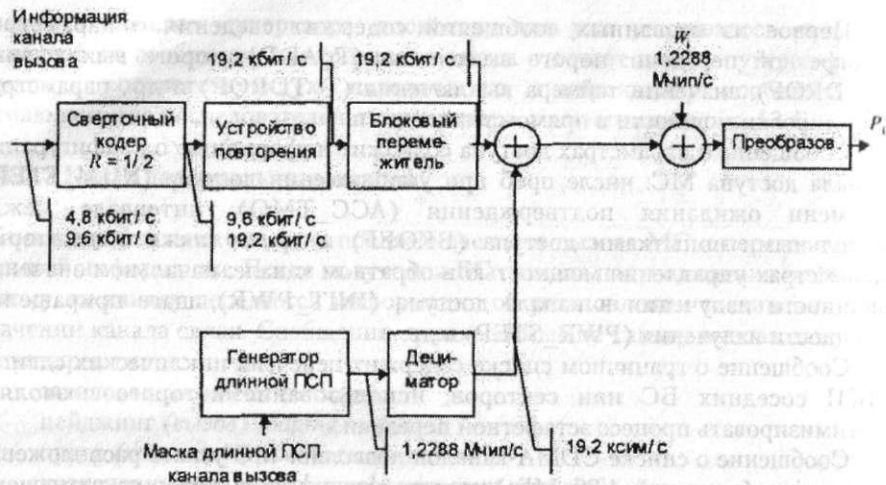


Рис.13.5 Структура канала вызова.

Символы длинной (как и короткой) ПСП имеют частоту следования 1,2288 Мчип/с, и потому для скремблирования потока после перемежения из длинной ПСП выбирается каждый 64-й символ (децимация с индексом 64). Маска генератора длинной ПСП, устанавливающая его начальное состояние, жестко связана с номером канала персонального вызова. Иными словами, маска генератора, используемая в канале вызова с функцией Уолша  $w_1$ , отличается от маски генератора для канала вызова с  $w_2$ . С какой целью это предусмотрено в стандарте, не вполне ясно, учитывая, что маска имеет весьма простую конструкцию и, следовательно, реальным потенциалом защиты данных не обладает. Формирование же самой длинной ПСП осуществляется с помощью полинома

$$f(x) = x^{42} + x^{35} + x^{33} + x^{31} + x^{27} + x^{26} + x^{25} + x^{22} + x^{21} + x^{19} + x^{18} + x^{17} + x^{16} + x^{10} + x^7 + x^6 + x^5 + x^3 + x^2 + x + 1.$$

Во временной области канал вызова поделен на временные интервалы (слоты) длительностью 80 мс (четыре кадра). Группа из 2048 слотов образует максимальный цикл (период) повторения слотов. Кадр, в свою очередь, разделен на два подкадра. Первый бит каждого подкадра получил наименование индикатора синхронизированной капсулы (*synchronized capsule indicator* - SCI). Полный формат канала персонального вызова имеет вид, представленный на рис. 13.6.

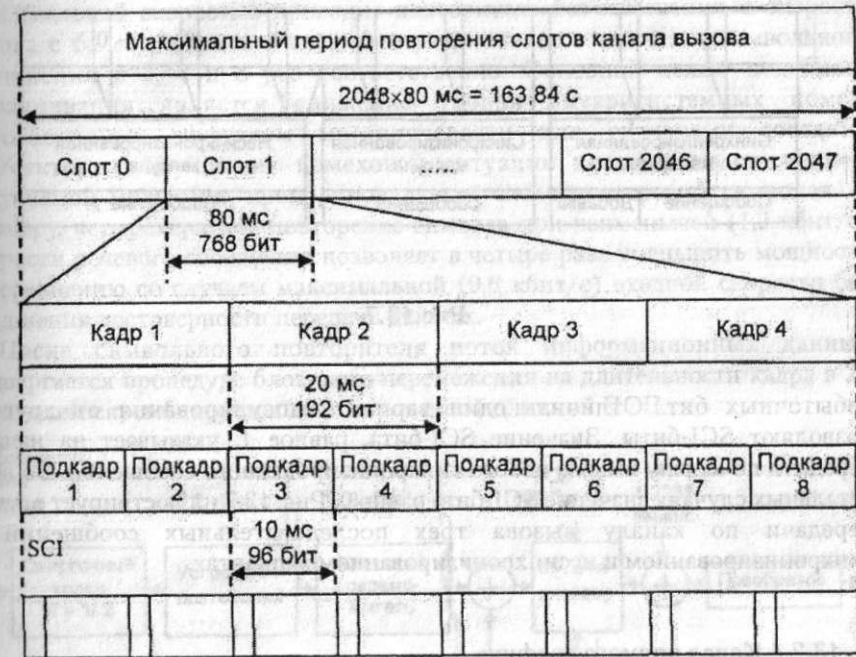


Рис.13.6 Структура кадров канала вызова

Поскольку сообщения в канале вызова могут занимать более одного подкадра и заканчиваться где-нибудь в его пределах, для того, чтобы отличить одно сообщение от другого, используют два варианта капсулирования информации: в виде синхронизированной и несинхронизированной капсул.

Если сообщение заканчивается в пределах подкадра, причем до следующего SCI-бита остается меньше 8 бит, то БС дополняет капсулу необходимым количеством добавочных бит с тем, чтобы она продлилась до начала следующего подкадра. В том случае, когда следующее капсулированное сообщение передается в синхронизированном варианте, то вне зависимости от величины остатка до SCI-бита БС добавляет в капсулу избыточные биты, чтобы продолжить ее до начала следующего подкадра. Однако, если сообщение заканчивается в пределах подкадра и до следующего SCI-бита остается более 8 бит, БС может использовать вариант несинхронизированной капсулы, т.е. передавать следующее сообщение сразу же после окончания предыдущего, не добавляя хвостовых

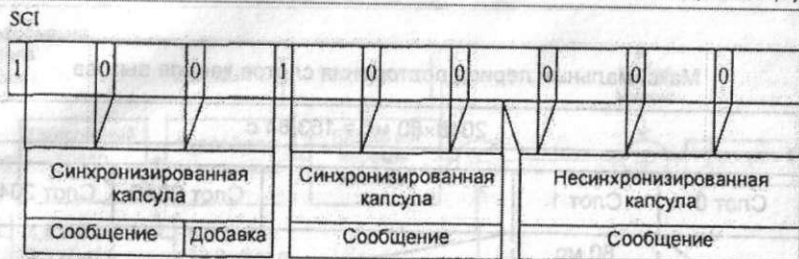


Рис.13.7

избыточных бит. Отличить один вариант капсулирования от другого позволяют SCI-биты. Значение SCI-бита, равно 1, указывает на начало передачи по каналу вызова нового синхронизированного сообщения. Во всех остальных случаях значение SCI-бита равно 0. Рис. 13.7 иллюстрирует случаи передачи по каналу вызова трех последовательных сообщений в синхронизированном и несинхронизированном вариантах.

### 13.2.4 Канал прямого трафика

Каналы прямого трафика служат для передачи речевой информации и данных, а также информации сигнализации от БС к МС. Структура канала прямого трафика (см. рис. 13.8) за небольшим исключением в точности повторяет блок-схему канала персонального вызова. Основное отличие заключается в присутствии устройства мультиплексирования потока информационных данных и *битов регулировки мощности (power control bits - РСВ)*, а также в поддержании набора из 4 различных скоростей -9,6; 4,8; 2,4 и 1,2 кбит/с, выбираемых в соответствии с текущей речевой активностью абонента.

Поток кодированных речевых данных поступает от вокодера со скоростью 8,6; 4,0; 2,0 или 0,8 кбит/с. После кодирования блоковым циклическим кодом CRC (добавление индикатора качества кадра выполняется только для первых двух скоростей) и приписывания "хвостовых" нулей для сверточного кодирования поток увеличивает скорость до соответствующего значения из четырех упомянутых. Сверточное кодирование удваивает символьную скорость, в результате чего на устройство повторения подается поток данных с одной из следующих скоростей -19,2; 9,6; 4,8 и 2,4 кбит/с. Устройство повторения осуществляет выравнивание скоростей: поток данных с

максимальной скоростью проходит повторитель без изменения, а скорость потока с более низкими значениями увеличивается за счет посимвольного повторения в 2, 4 и 8 раз соответственно. Основной целью подобного выравнивания является снижение уровня внутрисистемных помех, обусловленных эффектом многолучевости или сигналами соседних БС/секторов. Улучшение помеховой ситуации достигается снижением излучаемой мощности, пропорциональным числу повторений символов. К примеру, четырехкратное повторение символа при наименьшей (1,2 кбит/с) скорости речевого сообщения позволяет в четыре раза уменьшить мощность по сравнению со случаем максимальной (9,6 кбит/с) входной скорости без ухудшения достоверности передачи данных.

После символьного повторителя поток информационных данных подвергается процедуре блокового перемежения на длительности кадра в 20 мс, а затем скремблируется децимированной длиной ПСП.

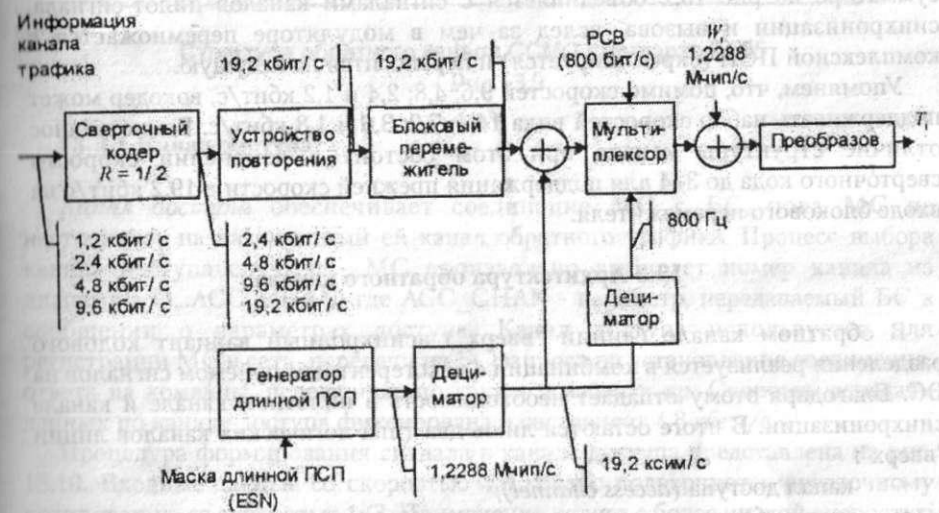


Рис.13.8 Структура канала прямого трафика

Единственное отличие состоит в том, что маска, задающая начальное состояние генератора ПСП, определяется электронным серийным номером (*electronic serial number- ESN*) МС в соответствии с некоторым секретным ключом.

Скремблированные данные далее мультиплексируются с командами регулировки мощности передатчика МС: определенные символы потока данных на входе мультиплексора заменяются РСВ-битами. Поскольку



скорость поступления данных составляет 19,2 кбит/с, а частота РСВ-битов - 800 Гц, то замене подлежит лишь один из 24 символов информационной последовательности, причем РСВ-бит помещается в одну из первых 16 позиций. Точное положение бита регулировки мощности определяется псевдослучайным образом - указателем позиции РСВ-бита служит десятичное значение 4 наиболее значимых битов с выхода первого дециматора рис. 13.8.

Мультиплексированный поток данных манипулирует канальную поднесущую, в качестве которой используется одна из последовательностей Уолша  $w_8$  ч  $w_{31}$  и  $w_{33}$  ч  $w_{63}$  с чиповой скоростью 1,2288 Мчип/с, причем номер последовательности Уолша однозначно определяет номер канала прямого трафика. В результате каждому символу потока данных сопоставляется один период соответствующей функции Уолша, и тем самым осуществляется прямое расширение спектра информационного сообщения. После этого полученный сложный сигнал со скоростью 1,2288 Мчип/с в сумматоре на рис 13.2 объединяется с сигналами каналов пилот-сигнала, синхронизации и вызова, вслед за чем в модуляторе перемножается с комплексной ПСП (скремблируется) и переносится на несущую.

Упомянем, что, помимо скоростей 9,6; 4,8; 2,4 и 1,2 кбит/с, вокодер может поддерживать набор скоростей вида 14,4; 7,2; 3,6 и 1,8 кбит/с. Единственное отличие структуры канала при этом состоит в изменении скорости сверточного кода до  $3/4$  для поддержания прежней скорости в 19,2 кбит/с на входе блокового перемежителя.

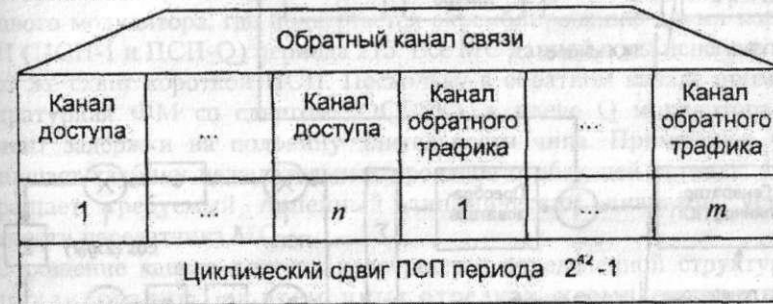
### 13.3 Архитектура обратного канала

В обратном канале (линии "вверх") асинхронный вариант кодового разделения реализуется в комбинации с некогерентным приемом сигналов на БС. Благодаря этому отпадает необходимость в пилотном канале и канале синхронизации. В итоге остаются лишь два типа логических каналов линии "вверх":

- канал доступа (*access channel*);
- канал обратного трафика (*reverse traffic channel*).

Асинхронность кодового разделения делает нерациональным применение функций Уолша в роли каналообразующих последовательностей (сигнатур) физических каналов, так как при относительных временных сдвигах они не могут сохранять ортогональность и имеют весьма непривлекательные взаимные корреляционные свойства. Поэтому за разделение каналов в линии "вверх" отвечают различные циклические сдвиги длинной ПСП периода 242 - 1. Функции Уолша в обратном канале также используются, но в ином качестве: для организации еще одной ступени помехоустойчивого кодирования данных, передаваемых МС.

Общая структура обратного канала связи системы IS-95 иллюстрируется на рис. 13.9. Каналы доступа и обратного трафика, которые используются МС, ассоциированы с определенными каналами персонального вызова. В результате на один канал персонального вызова может приходиться до  $n = 32$  каналов доступа и до  $m = 64$  каналов обратного трафика.



Структура обратного канала CCMC стандарта IS-95

Рис.13.9

#### 13.3.1 Канал доступа

Канал доступа обеспечивает соединение МС с БС, пока МС не настроилась на назначенный ей канал обратного трафика. Процесс выбора канала доступа случаен - МС произвольно выбирает номер канала из диапазона  $0 \dots ACC\_CHAN$ , где  $ACC\_CHAN$  - параметр, передаваемый БС в сообщении о параметрах доступа. Канал доступа используется для регистрации МС в сети, передачи на БС запроса на установление соединения, ответа на команды, переданные по каналу вызова и др. Скорость передачи данных по каналу доступа фиксирована и составляет 4,8 кбит/с.

Процедура формирования сигнала в канале доступа представлена на рис. 13.10. Входные данные со скоростью 4,8 кбит/с подвергаются сверточному кодированию со скоростью  $1/3$ . Применение кодера с более низкой скоростью (большей избыточностью), чем в прямом канале, как уже говорилось, объясняется более низкой помехоустойчивостью обратного канала вследствие ограниченности энергоресурса МС. После кодирования скорость информационного потока в числе кодовых символов возрастает до 14,4 кбит/с. Двукратное повторение символов в устройстве повторения доводит символьную скорость до величины 28,8 кбит/с. Применение блокового перемежения в пределах 20 мс кадра не меняет скорости информационного потока, так что на ортогональный модулятор данные поступают с прежней скоростью в 28,8 кбит/с.

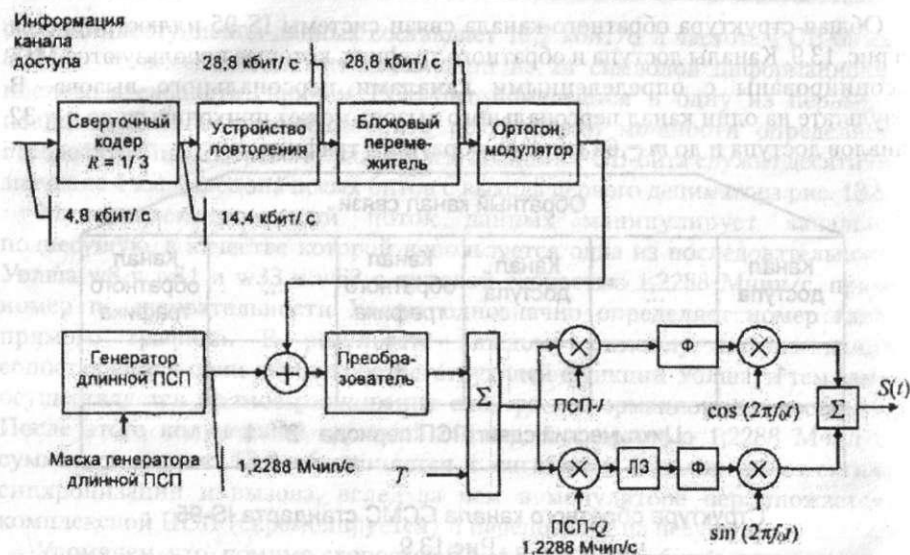


Рис. 13.10. Структурная схема канала доступа

Ортогональный модулятор осуществляет отображение (кодирование) групп из 6 двоичных символов в некоторую функцию Уолша длины 64. Подобная операция представляет собой кодирование 6-битовых блоков (64,6) ортогональным кодом. При оптимальном ("мягком") декодировании энергетический выигрыш от использования такого кода асимптотически стремится к 4,8 дБ. В то же время во многих источниках рассматриваемую процедуру именуют ортогональной модуляцией или Уолш-модуляцией [44-49]. Замена 6-символьной группы на функцию Уолша производится по следующему правилу: десятичное значение 6-разрядного двоичного числа, соответствующего группе из 6 бит, однозначно определяет номер функции Уолша. Например, если на вход ортогонального модулятора подается группа из 6 символов вида (010110), то ей соответствует десятичное значение 22, а значит, эта группа заменяется модулятором на функцию Уолша  $w_{22}$ , состоящую из 64 символов. В результате ортогональной модуляции скорость данных возрастает до  $28,8 \times 64 / 4 = 307,2$  кбит/с.

Поток ортогонально модулированных данных подвергается прямому расширению спектра с помощью длинной ПСП с определенным циклическим сдвигом, однозначно определяющим данную МС, что позволяет идентифицировать ее на БС, а значит, осуществить кодовое разделение абонентов. Циклический сдвиг длинной ПСП определяется маской

генератора длиной 42 бита, которая конструируется из идентификатора БС, номеров канала вызова и доступа.

После расширения спектра (суммирования по модулю 2 с длинной ПСП и преобразования булевых символов в двуполярные) поток, следующий со скоростью чипов, т.е. 1,2288 Мчип/с, поступает в квадратурные каналы фазового модулятора, где подвергается скремблированию двумя короткими ПСП (ПСП-1 и ПСП-Q) периода 215. Все МС данной соты используют один и тот же сдвиг короткой ПСП. Поскольку в обратном канале применяется квадратурная ФМ со сдвигом (ОQPSK), в плече Q модулятора введен элемент задержки на половину длительности чипа. Применение ОQPSK уменьшает глубину нежелательных провалов огибающей сигнала, а значит, сокращает требуемый линейный динамический диапазон усилителя мощности передатчика МС.

Сообщение канала доступа подвергается определенной структуризации (капсулированию) на временных отрезках, называемых слотами и кадрами (рис. 13.11). Слот канала доступа может состоять из  $(3 + \text{MAX\_CAP\_SZ}) + (1 + \text{PAM\_SZ})$  кадров, где параметр MAX\_CAP\_SZ определяет максимальный размер капсулы сообщения канала доступа, а PAM\_SZ - длину преамбулы канала доступа (значения этих параметров передаются на МС по каналу вызова). На длительности кадра (20 мс) содержится 88 информационных бит (тело кадра) и 8 кодированных хвостовых бит (поле T).

Сообщение канала доступа не обязательно занимает максимальный размер слота. На этот случай МС определяет необходимое число кадров для передачи сообщения и присваивает его переменной CAP\_SZ. Очевидно, что  $\text{CAP\_SZ} < 3 + \text{MAX\_CAP\_SZ}$ . Пример подобного сообщения представлен на рис. 13.12.

Сообщение канала доступа передается в структурированной форме - в виде капсулы сообщения, содержащей CAP\_SZ x 88 бит. В том случае, когда размер передаваемого сообщения меньше длины капсулы, свободные позиции заполняются добавочными битами.



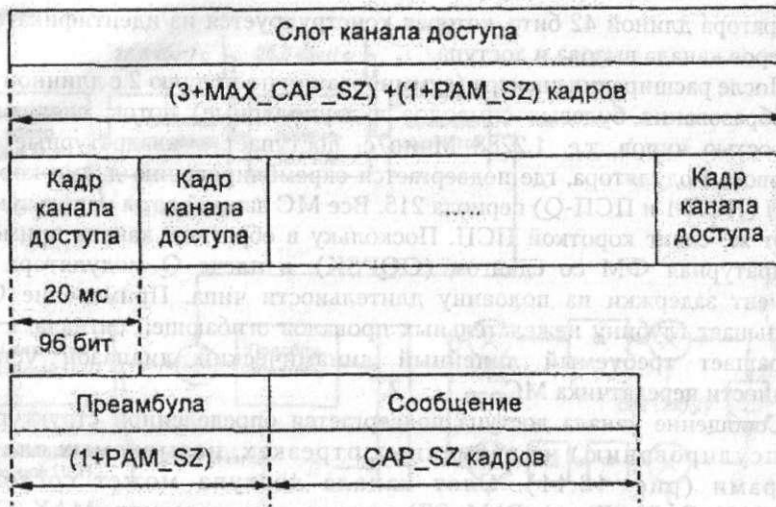
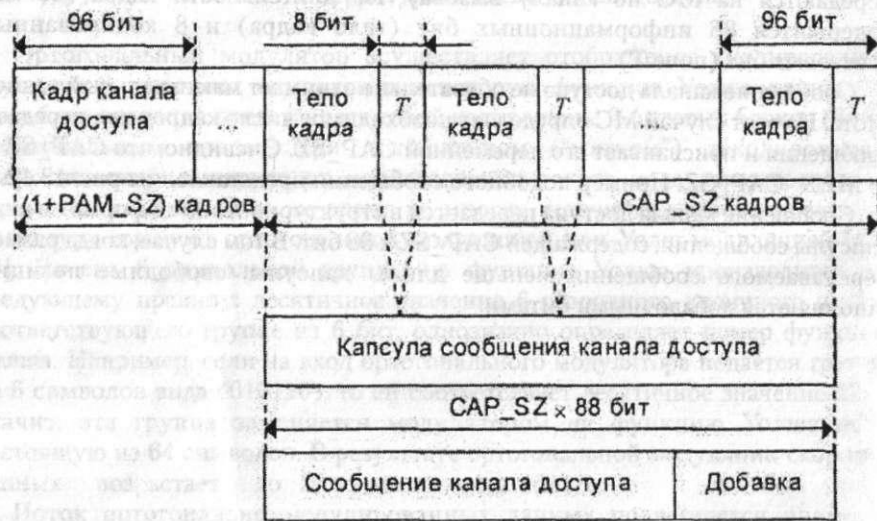


Рис.13.11 Структура кадров канала доступа



Структура сообщения канала доступа

Рис.13.12

### 13.3.2 Канал обратного трафика

Канал обратного трафика обеспечивает передачу речевой информации и данных абонента, а также управляющей информации с МС на БС, когда МС уже занимает выделенный ей физический канал. Структура канала обратного трафика и процедуры формирования сигналов практически аналогичны применяемым в канале доступа (рис. 13.13) с несколькими оговорками. Во-первых, скорость поступления данных в канал обратного трафика не фиксирована, а может изменяться в зависимости от речевой активности абонента. В канале осуществляется поддержка потока данных со скоростями<sup>1</sup> 9,6; 4,8; 2,4 и 1,2 кбит/с. Во-вторых, маска генератора длиной ПСП формируется с использованием закодированного электронного серийного номера (ESN) МС. Наиболее же существенным отличием является наличие дополнительного блока, называемого рандомизатором. Назначение данного устройства состоит в реализации возможностей по снижению уровня внутрисистемных помех в обратном канале за счет учета фактора речевой активности абонента. Алгоритм учета речевой активности в прямом канале, основанный на повторении символов с пропорциональным снижением передаваемой мощности, неприемлем для линии "вверх", так как входит в противоречие с процедурой быстрой регулировки мощности по замкнутой петле. Метод уменьшения средней мощности излучения в обратном канале при снижении скорости речевого потока состоит в псевдослучайном прореживании (или маскировании) избыточных символов, образованных в результате операции символьного повторения. Рандомизатор вырабатывает маскирующий образец, состоящий из нулей и единиц, в соответствии с которым и осуществляется прореживание, причем соотношение между числом нулей, отвечающих за исключение символов, и единиц определяется скоростью речевого потока. Так, при максимальной скорости кодированной речи 9,6 кбит/с прореживание отсутствует, т.е. маскирующий образец состоит из всех единиц. Если же скорость речевого потока составляет 1,2 кбит/с, рандомизатор вырабатывает образец, устраняющий в среднем семь из восьми символов.

На практике описанная процедура реализуется следующим образом. Как указывалось ранее, РСВ-биты поступают с частотой 800 Гц, т.е. с интервалом 1,25 мс. На основании этого 20 мс кадр канала трафика разбивается на 16 групп регулировки мощности. Рандомизатор псевдослучайным образом вырезает отдельные группы регулировки, причем количество вырезаемых групп определяется скоростью работы вокодера. При передаче речевых данных со скоростью 9,6 кбит/с ни одна из групп не исключается, если же

<sup>1</sup> Как и в линии "вниз", эти скорости уже учитывают кодирование CRC-кодом (для речевых скоростей 8,6 и 4 кбит/с) и добавление хвостовых битов для сверточного кодирования

скорость работы вокодера составляет 1,2 кбит/с, то из кадра в среднем вырезается 14 из 16 групп. При этом текущая маска, вырабатываемая рандомизатором, определяется фрагментом длиной ПСП, который использовался при расширении спектра предыдущего кадра.

В канале обратного (как и прямого) трафика предусматривается также поддержание набора скоростей 14,4; 7,2; 3,6 и 1,8 кбит/с. При этом для сохранения скорости кодированного потока в 28,8 кбит/с скорость сверточного кодера меняется с 1/3 на 1/2.

В заключение параграфа кратко рассмотрим формат передачи информации в канале трафика, а также способы мультиплексирования речевой (первичной) информации, данных (вторичной информации) и служебной информации (рис. 13.14). Кадр обратного (как и прямого) трафика занимает 20 мс. При полноскоростном (9,6 кбит/с) режиме кадр содержит 192 битовых позиции; в случае полускоростного режима (скорости поступления информации 4,8 кбит/с) кадр состоит из 96 бит и т.д. до 24 бит при скорости 1,2 кбит/с. При скоростях 9,6 и 4,8 кбит/с кадр содержит биты с информацией о качестве кадра (индикатор качества кадра). При всех скоростных режимах кадр заканчивается 8 кодированными хвостовыми битами.

Комбинированная передача первичной и вторичной (или служебной) информации определена стандартом IS-95 в двух режимах. В первом режиме, называемом *blank and burst*, вторичная или служебная информация полностью замещает речевую информацию в кадре, а значит, передача информации различного типа может производиться только в разных кадрах. Во втором режиме, носящем название *dim and burst*, в пределах кадра возможна совместная передача либо первичной и вторичной информации, либо первичной информации и информации сигнализации. Указанные режимы применяются лишь при полноскоростной передаче, т.е. при скоростях, меньших 9,6 кбит/с, передается исключительно первичная информация.

#### 13.4 Принципы организации абонентского доступа

Остановимся теперь вкратце на операциях, которые система должна выполнять для установления, поддержания и прекращения соединения МС с другой стороной. Стандарт предусматривает вызов трех типов:

- исходящий из сети, когда МС инициирует соединение с абонентом стационарной телефонной сети общего доступа (ТФОП);
- входящий в сеть, когда абонент ТФОП инициирует соединение с МС;
- внутрисетевой, когда одна МС инициирует соединение с другой МС и все процедуры, связанные с обслуживанием вызова, осуществляются без обращения к ТФОП.

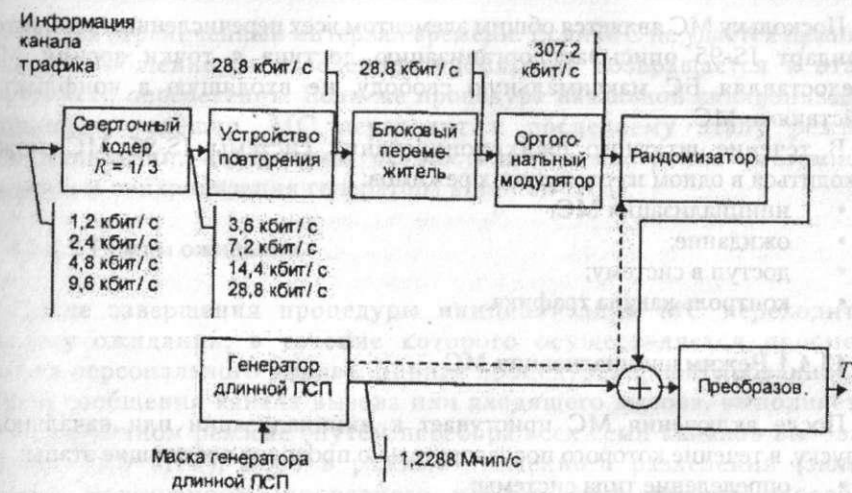
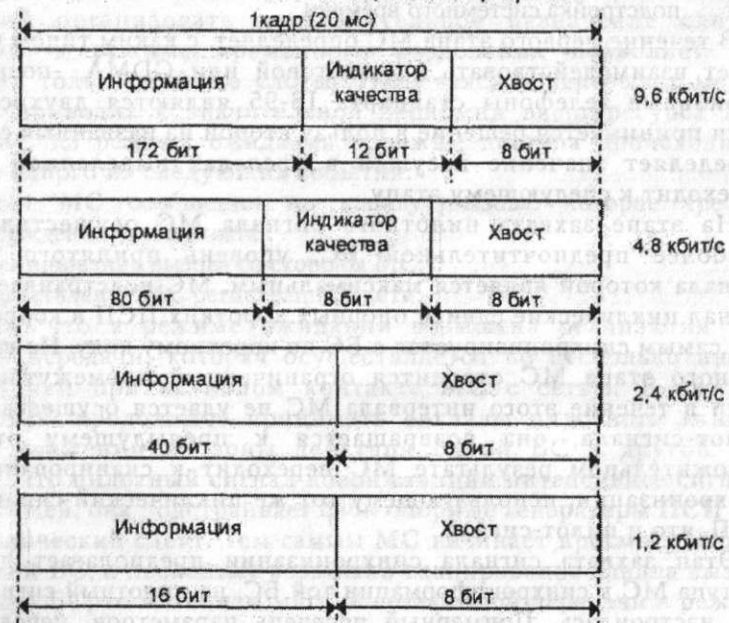


Рис.13.13 Структурная схема канала обратного трафика



Структура кадров канала обратного трафика

Рис.13.14



Поскольку МС является общим элементом всех перечисленных вариантов, стандарт IS-95 описывает организацию доступа с точки зрения МС, предоставляя БС максимальную свободу, не входящую в конфликт с действиями МС.

В течение штатного функционирования системы IS-95 МС может находиться в одном из следующих режимов:

- инициализация МС;
- ожидание;
- доступ в систему;
- контроль канала трафика.

#### 13.4.1 Режим инициализации МС

После включения МС приступает к инициализации или начальному запуску, в течение которого последовательно проходят следующие этапы:

- определение типа системы;
- синхронизация по сигналу пилотного канала;
- выделение синхросигнала;
- подстройка системного времени.

В течение первого этапа МС определяет, с каким типом ССМС она будет взаимодействовать - аналоговой или CDMA, - поскольку все мобильные телефоны стандарта IS-95 являются двухрежимными. Если принимается решение в пользу второй из названных систем, МС определяет значение несущей в пределах выделенной полосы и переходит к следующему этапу.

На этапе захвата пилотного сигнала МС осуществляет поиск наиболее предпочтительной БС, уровень принятого пилотного сигнала которой является максимальным. МС подстраивает под этот сигнал циклические сдвиги опорных коротких ПСП в корреляторах и тем самым синхронизируется с БС по короткому коду. На выполнение данного этапа МС отводится ограниченный промежуток времени. Если в течение этого интервала МС не удастся осуществить захват пилот-сигнала, она возвращается к предыдущему этапу. При положительном результате МС переходит к сканированию канала синхронизации, использующему тот же циклический сдвиг короткой ПСП, что и пилот-сигнал.

Этап захвата сигнала синхронизации предполагает достижение доступа МС к синхросигналу той БС, на пилотный сигнал которой она настроилась. Примерный перечень параметров, передаваемых в сообщении синхроканала выше. Следует отметить, что, как и на предыдущем этапе, на захват синхросигнала и прием синхросигнала

отводится ограниченный интервал времени. Если МС не удается принять синхросигнал за отведенное время, она возвращается к этапу системного определения. Если же процедура начальной синхронизации завершена успешно, МС переходит к последнему этапу режима инициализации, на котором осуществляется настройка системного времени и синхронизация генератора длинной ПСП.

#### 13.4.2 Режим ожидания

После завершения процедуры инициализации МС переходит к режиму ожидания, в течение которого осуществляется просмотр канала персонального вызова. Данная процедура, ориентированная на прием сообщения канала вызова или входящего вызова, выполняется либо в обычном режиме (путем перебора всех семи каналов вызова в полосе 1,25 МГц), либо в режиме временного разделения (*slotted mode*). Возможность последнего режима обусловлена способом передачи информации в канале вызова. Поскольку сообщения, адресованные той или иной МС, передаются в слотах, можно без затруднений организовать предварительное назначение слотов. Работа МС в режиме временного разделения позволяет МС сканировать только нужные слоты, отключаясь в перерывах между ними, что приводит к значительной экономии энергоресурса МС. Переход МС из режима ожидания в режим доступа происходит в результате одного из следующих событий:

- прием МС сообщения по каналу вызова, которое требует либо подтверждения, либо ответа;
- инициирование вызова со стороны МС;
- осуществление МС регистрации в сети.

Отметим, что в режиме ожидания возможна реализация МС эстафетной передачи, которая осуществляется по несколько иному алгоритму, чем при активном контакте МС с сетью. В режиме ожидания МС продолжает принимать сигналы пилотного канала. Если при движении из зоны действия одной БС к другой МС обнаружит, что пилотный сигнал новой станции интенсивнее сигнала от действующей, она подстраивает свои опорные генераторы ПСП под новый циклический сдвиг. Тем самым МС начинает просмотр канала вызова новой БС, а поскольку возможно сканирование канала вызова только одной БС, то механизм мягкой эстафетной передачи в режиме ожидания невозможен.

### 13.4.3 Режим доступа

В случае перехода МС из режима ожидания в режим доступа по одной из указанных причин, между МС и БС осуществляется обмен сообщениями с использованием канала вызова (в прямом направлении) и канала доступа (в обратном). В зависимости от причины перехода к рассматриваемому состоянию МС выполняет одну из следующих процедур:

- обновление информации, полученной в сообщении типа “заголовок”;
- ответ на вызов;
- инициирование вызова со стороны МС;
- регистрация;
- ответ на команду или сообщение БС.

#### Обновление информации

Сообщения типа “заголовок”, передаваемые БС, в основном содержат значения параметров конфигурации системы либо параметров доступа, которые могут изменяться с течением времени. Для того чтобы МС могла определить, какие значения являются текущими, т.е. соответствуют данному моменту времени, а какие нет, каждое сообщение сопровождается номером, содержащимся в поле CONFIG\_MSG\_SEQ или ACC\_MSG\_SEQ. В том случае если произошло изменение хотя бы одного параметра, БС увеличивает значение номера соответствующего сообщения на единицу. Таким образом, МС, приняв очередное сообщение с конфигурационными параметрами или параметрами доступа, сравнивает его номер с хранящимся в памяти. Если номер принятого сообщения выше, то МС обновляет значения соответствующих параметров, записывая их в память.

Помимо сообщений конфигурации и доступа, МС принимает следующие пейджинговые сообщения:

- вызова;
- вызова с использованием слотов;
- общее сообщение вызова.

Всякий раз, когда МС принимает пейджинговое сообщение, она просматривает его на предмет присутствия в нем *международного идентификационного номера мобильного абонента* - IMSI (*international mobile station identification*). Если находящийся в сообщении IMSI отвечает данной МС, то она переходит к этапу ответа на вызов.

#### Ответ на вызов

Основным содержанием этого этапа является передача на БС по каналу доступа ответа на сообщение вызова. Данная операция осуществляется через процедуру доступа, описываемую ниже. Получив подтверждение, БС может направить МС по каналу вызова сообщение о назначении канала с целью установления соединения. Указанное сообщение содержит такие параметры, как CDMA\_FREQ (значение несущей CDMA-канала) и CODE\_CHAN (номер CDMA-канала), которые позволяют МС настроиться на канал прямого трафика.

#### Этап регистрации

На этом этапе МС передает на БС по каналу доступа регистрационное сообщение, используя процедуру доступа. В частности, МС передает свой *электронный серийный номер* - ESN (*electronic serial number*), присваиваемый заводом-изготовителем, и *сетевой идентификационный номер* - MIN (*mobile identification number*), а также статус, местоположение и др. с целью облегчить поиск МС при входящем вызове. Между частотой регистрации и размером зоны поиска МС должен существовать определенный компромисс, который поддерживается оператором сотовой сети. Если, например, МС не будет вообще регистрироваться, то ЦКМС лишится сведений о том, включена ли МС, находится ли она в зоне его обслуживания, а если находится, то где именно. В отсутствие априорной информации о местоположении МС зона поиска окажется чрезмерно велика, что приведет к значительной нагрузке на каналы персонального вызова, поскольку все БС сети будут вовлечены в передачу поисковых сообщений. С другой стороны, частая регистрация позволит ЦКМС локализовать зону поиска МС с большой точностью, что, казалось бы, снизит нагрузку на каналы вызова. Это, однако, приведет к увеличению нагрузки на каналы доступа, а следовательно, и на каналы персонального вызова, по которым БС передают подтверждение о регистрации. Таким образом, эксплуатация ССМС предполагает поддержание некоторого оптимального соотношения между частотой регистрации МС и размером зоны ее поиска, при котором сетевой ресурс используется наиболее эффективно.

Стандарт предусматривает ряд форм регистрации МС в сети:

- при включении МС;
- при выключении МС;
- по сигналу таймера;
- по измеренной дистанции;
- по зонному принципу;
- при изменении контрольных параметров;
- по команде БС;
- по умолчанию.



Информацию об используемых формах регистрации и соответствующих контрольных параметрах БС передает по каналу персонального вызова с помощью сообщения о системных параметрах. Так, например, при регистрации по измеренной дистанции БС сообщает свои координаты и пороговую дистанцию. Каждый раз, получая координаты новой БС, мобильная станция определяет текущее расстояние до места последней регистрации. При превышении порога следует процедура регистрации и новая БС становится точкой отсчета и центром текущей зоны поиска МС [44-49].

#### Ответ на команду или сообщение БС

На этом этапе МС посылает ответ на отличные от ранее рассмотренных сообщения, принятые от БС. Примером может служить ответное сообщение МС на запрос об аутентификации со стороны БС. Как и другие, ответное сообщение передается по каналу доступа с использованием процедуры доступа.

#### 13.4.4 Процедура доступа МС

Разработка процедуры доступа МС к ССМС, или механизма соединения с БС, затруднена необходимостью установления одновременной связи нескольких МС с одной БС. В некоторой степени решению проблемы способствует организация раздельной работы МС путем назначения ей различных каналов доступа. БС, установив некоторое значение параметра ACC\_CHAN в сообщении о параметрах доступа, предоставляет МС возможность случайным образом выбрать номер канала доступа из интервала  $0 \dots \text{ACC\_CHAN}$ . Однако, если один и тот же канал доступа используют несколько МС, то велика вероятность совпадения по времени их передач. Для исключения подобной ситуации необходимо ран-домизировать время передачи сообщений различных МС таким образом, чтобы вероятность совпадения была минимальной.

Как следует из ранее изложенного, сообщения, передаваемые по каналу доступа, условно можно разделить на два типа:

- передаваемые МС в ответ на сообщения БС;
- запросные, инициируемые МС.

Соответственно этому существуют два различных механизма доступа.

Механизм установления соединения с БС основан на таком понятии, как *попытка доступа (access attempt)*. Каждая попытка доступа включает последовательность проб, т.е. передач с нарастающей мощностью (*access probe sequences*) (см. рис. 13.15).

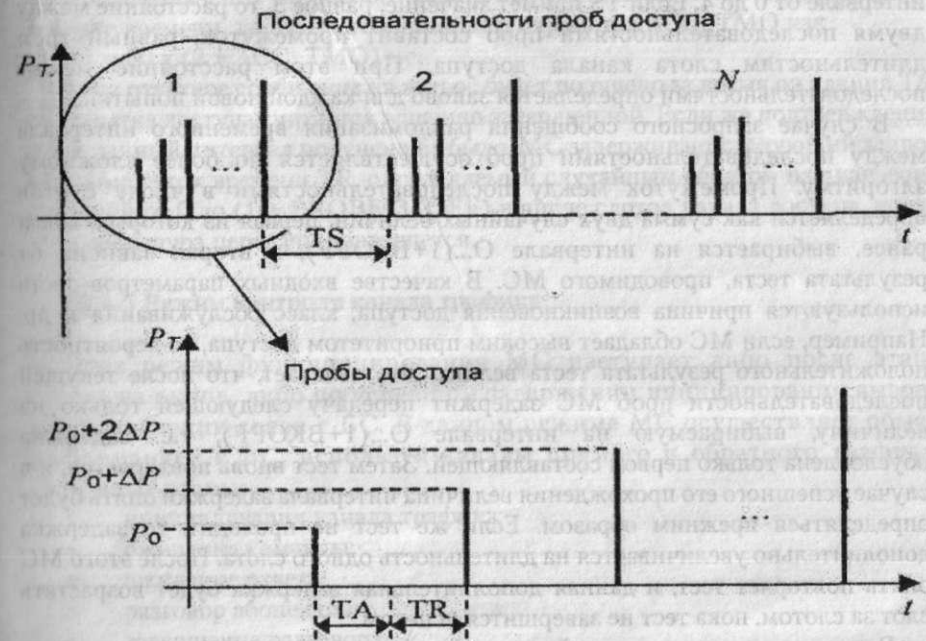


Рис. 13.15. Структура последовательности проб доступа

В случае ответного сообщения максимальное число последовательностей в попытке доступа определяется параметром MAX\_RSP\_SEQ, значение которого устанавливается системным оператором и не может превышать 15, т.е.  $N / < \text{MAX\_RSP\_SEQ}$ .

При организации запроса максимальное число последовательностей в попытке задается параметром MAX\_REQ\_SEQ, который, как и ранее, устанавливается оператором и лежит в том же интервале допустимых значений. Пробные последовательности могут передаваться по разным каналам доступа, поскольку перед каждой передачей последовательности номер канала выбирается случайным образом на интервале  $0 \dots \text{ACC\_CHAN}$ .

Случайным является и время между последовательностями проб TS. Так, для ответного сообщения временной промежуток TS определяется как равномерно распределенная на интервале  $0 \dots (1 + \text{BKOFF})$  случайная величина, выраженная в числе слотов канала доступа. Пусть, например, значение параметра BKOFF равно 3, тогда случайная величина определена на

интервале от 0 до 4. Если TS примет значение, равное 3, то расстояние между двумя последовательностями проб составит промежуток, равный трем длительностям слота канала доступа. При этом расстояние между последовательностями определяется заново для каждой новой попытки.

В случае запросного сообщения рандомизация временного интервала между последовательностями проб осуществляется по более сложному алгоритму. Промежуток между последовательностями в числе слотов определяется как сумма двух случайных величин, первая из которых, как и ранее, выбирается на интервале  $O...(1+BKOFF)$ , а вторая зависит от результата теста, проводимого МС. В качестве входных параметров теста используются причина возникновения доступа, класс обслуживания и др. Например, если МС обладает высоким приоритетом доступа, то вероятность положительного результата теста велика. Это означает, что после текущей последовательности проб МС задержит передачу следующей только на величину, выбираемую на интервале  $O...(1+BKOFF)$ , т.е. задержка обусловлена только первой составляющей. Затем тест вновь повторяется, и в случае успешного его прохождения величина интервала задержки опять будет определяться прежним образом. Если же тест не проходит, то задержка дополнительно увеличивается на длительность одного слота. После этого МС опять повторяет тест, и данная дополнительная задержка будет возрастать слот за слотом, пока тест не завершится успехом.

Введение дополнительной случайной составляющей в величину промежутка между последовательностями проб доступа обусловлено стремлением к еще большей рандомизации начала времени передачи запросных сообщений, т.е. сообщений, посылаемых МС автономно. Необходимость подобной процедуры диктуется тем, что, в отличие от ответных сообщений, частота передачи запросных не поддается контролю БС, а значит, существует вероятность одновременного запроса канала доступа несколькими МС.

Подробная структура последовательности проб представлена на рис. 13.15. Каждая проба доступа (*access probe*) представляет собой короткий запросный пакет, который передается в течение длительности слота канала доступа с определенным уровнем мощности. Максимальное число проб, составляющих последовательность, определяется параметром NUM\_STEP, значение которого устанавливается оператором системы и не превышает 15.

Для того чтобы снизить уровень помех в процессе доступа, используется метод передачи, при котором каждая последующая проба передается с нарастающим от начального значения  $P_0$  уровнем мощности. Начальный уровень мощности регулируется разомкнутой петлей управления мощностью. Приращение уровня излучения  $\Delta P$  от запроса к запросу определяется параметром PWR\_STEP, называемым коррекцией проб доступа.

После излучения запросного пакета МС ожидает ответа-подтверждения в течение времени, задаваемого с помощью параметра ACC\_TMO как

$$TA = 80 \times (2 + ACC\_TMO) \text{ мс.}$$

Если ответное сообщение на запрос будет получено за время ожидания TA, то попытка доступа считается успешно завершённой. Если же подтверждения за указанный интервал получено не было, МС задерживает следующий запрос на промежуток времени TR, определяемый случайным образом из диапазона значений от 0 до  $(1 + PROBEJ3KOFF)$  в числе слотов канала доступа, после чего процедура передачи повторяется.

### 13.4.5 Режим контроля канала трафика

Этот режим функционирования МС наступает либо после этапа ответа на вызов, либо по успешном завершении инициирования вызова и установлении связи с БС. В данном режиме МС осуществляет обмен информацией с БС, используя каналы прямого и обратного трафика. Основные этапы:

- инициализация канала трафика;
- ожидание команды;
- ожидание ответа;
- разговор абонентов;
- завершение разговора.

#### Инициализация канала трафика

На этапе инициализации канала трафика МС проверяет свою способность к приему информации от БС по каналу прямого трафика. Подтверждением данной возможности служит уверенный прием  $N5m$  последовательных кадров за время  $T50m$  (например, двух кадров за 200 мс), где  $N5m$  и  $T50m$  - параметры, определяемые стандартом IS-95. В случае успешного завершения проверки МС начинает передавать по каналу обратного трафика преамбулу канала трафика. После принятия команды подтверждения от БС в пределах временного интервала  $T51m$  нахождения на этапе инициализации (например, 2 с) дальнейшее функционирование МС определяется типом вызова:

- если вызов является входящим, МС переходит к этапу ожидания команды;
- если вызов исходящий, то МС переходит к этапу разговора.

Возможен и другой сценарий действий МС, в результате которого она возвращается на начальный этап режима инициализации МС. Подобное происходит тогда, когда МС не принимает либо заданного количества кадров от БС, либо команду подтверждения приема БС преамбулы за отведенный интервал времени.



#### Ожидание команды

МС переходит на этот этап после инициализации канала трафика при входящем вызове. На данном этапе МС ожидает приема от БС по каналу прямого трафика сигнала готовности с информационным сообщением, представляющего собой посылку вызова (звонок) с номером вызывающего абонента. В случае приема МС сигнала готовности она переходит к этапу ожидания ответа МС. Если же МС в течение 5 с после перехода на этап ожидания команды не примет сигнала готовности, то возвращается на начальный этап режима инициализации.

#### Ожидание ответа МС

Переход МС на этап ожидания ответа возможен только с этапа ожидания команды при входящем вызове. В рамках этого этапа МС ожидает ответа абонента на вызов. Если абонент отвечает на вызов, МС отключает звуковой сигнал вызова, передает команду на соединение по каналу обратного трафика БС и переходит к этапу разговора абонентов.

#### Разговор абонентов

Как следует из описания предыдущих этапов, этап разговора абонентов начинается либо после этапа инициализации канала трафика (при исходящем вызове), либо после этапа ожидания ответа МС (при входящем вызове). В ходе этапа происходит обмен первичной (речевой) информацией между БС и МС с использованием каналов прямого и обратного трафика.

#### Завершение разговора

На данном этапе осуществляется прекращение разговора и соединения БС с МС. Если инициатором разъединения является МС, она передает по каналу обратного трафика команду на прекращение соединения с БС. В противном случае аналогичную операцию осуществляет БС по каналу прямого трафика.

### 13.4.6 Эстафетная передача

Эстафетная передача, неоднократно упоминавшаяся в книге, является неотъемлемым атрибутом любых ССМС, ответственным за непрерывность контакта абонента с сетью при перемещении МС из соты в соту. "Гладкость" эстафетной передачи особенно важна для абонентов в активном состоянии, поскольку ощутимые нарушения связи в ходе разговора резко снижают качество передачи речевой информации и нервируют потребителя.

Стандарт IS-95 поддерживает три механизма эстафетной передачи МС:

- межсистемная, или жесткая, эстафетная передача (*hard handoff*);
- внутрисистемная, или мягкая, эстафетная передача (*soft handoff*);
- межсекторная (*softer handoff*).

Различают два типа жесткой эстафетной передачи:

- при переходе МС из зоны обслуживания одного оператора CDMA-системы в зону обслуживания другого либо при переходе из одного частотного диапазона (1,25 МГц) в другой. В обоих случаях МС остается в зоне обслуживания CDMA системы, поэтому данную эстафетную передачу иногда называют D-to-D (*digital-to-digital*);
- при переключении МС с CDMA-системы на аналоговую ССМС. В этом случае эстафетная передача носит наименование D-to-A (*digital-to-analog*).

Алгоритм жесткой эстафетной передачи аналогичен описанному в предыдущем параграфе. Когда интенсивность принимаемого от МС сигнала становится меньше некоторого порога, обслуживающая БС посылает об этом сообщение в ЦКМС. По команде ЦКМС соседние БС с помощью сканирующих приемников осуществляют измерение уровня сигнала, принимаемого от данной МС. Если результат измерения какой-либо БС превысил установленный порог, то ЦКМС инициирует процедуру эстафетной передачи, выделяя МС один из свободных каналов трафика новой БС, и переключает вызов из старой соты в новую. Очевидно, что при жесткой эстафетной передаче неизбежно прерывание соединения, что отрицательно сказывается на качестве приема речевой информации.

При мягкой эстафетной передаче, впрочем, как и при межсекторной, МС одновременно использует несколько каналов связи (текущей БС и новых). Так, при межсотовой эстафетной передаче может быть задействовано до трех соседних сот, а при межсекторной - два сектора одной соты. В обоих вариантах МС, используя приемник RAKE, осуществляет раздельный прием сигналов каналов прямого трафика либо различных БС, либо секторов БС. Произведя оценку качества приема сигналов, МС с помощью селектора формирует результирующий сигнал путем "склеивания" наилучших по качеству кадров различных БС, что и обеспечивает механизм мягкой эстафетной передачи. Отличие же между межсотовой и межсекторной передачей состоит в субъекте формирования подобного же результирующего сигнала в обратном канале. Поскольку при межсотовой эстафетной передаче прием сигналов осуществляется разными БС, то оценка качества кадров производится ЦКМС, тогда как при межсекторной передаче обслуживания данная операция выполняется многосекторной БС.

Характерной чертой мягкой эстафетной передачи (в отличие от жесткой) является непосредственное участие в ней МС. Последняя оценивает качество канала связи, измеряя отношение сигнал-шум в пилотном канале, приходящееся на один чип, и передает результаты измерения на БС. Существенная роль МС в осуществлении передачи обслуживания нашла

отражение в названии этой процедуры - *mobile-assisted handoff* (МАНО).

По результатам произведенных измерений ЦКМС формирует четыре списка БС в виде перечня циклических сдвигов короткой ПСП, т.е. пилот-сигналов, которые передаются МС для использования в процедуре эстафетной передачи:

- активные каналы (*active set*);
- каналы-кандидаты (*candidate set*);
- граничные каналы (*neighbor set*);
- остальные каналы (*remaining set*).

Список активных каналов представляет собой перечень БС или секторов БС, с которыми в данный момент осуществляется связь по каналам трафика. Пополнение данного списка производится по команде с БС в виде *сообщения по руководству эстафетной передачей* (*handoff direction message*). Список активных каналов может содержать от 1 до 6 БС (секторов), причем если в нем содержится только один пилот-сигнал БС, то мягкая эстафетная передача не производится.

Список каналов-кандидатов состоит из тех пилотных каналов, для которых отношение сигнал-шум незначительно отличается от аналогичного параметра активных каналов и которые могут претендовать на участие в мягкой эстафетной передаче. Включение пилот-канала в данный перечень производится в случае превышения отношением сигнал-шум порога включения (или порога обнаружения пилот-сигнала - *pilot detection threshold*  $T\_ADD$ ). Удаление БС (сектора) из этого списка происходит тогда, когда интенсивность ее пилот-сигнала оказывается ниже порога исключения (*pilot drop threshold*  $T\_DROP$ ) в течение интервала времени, задаваемого параметром  $T\_TDRP$  (*handoff drop timer expiration value*). Как и в предыдущем случае, список каналов-кандидатов может содержать до 6 представителей. Укажем, что БС может быть переведена из списка активных в список кандидатов в том случае, если она не содержится в сообщении по руководству эстафетной передачей, однако еще не истекло время, задаваемое  $T\_TDRP$ .

Список граничных каналов содержит множество тех БС, которые расположены по соседству с обслуживающей МС в данное время. Первоначально подобный список состоит из тех БС, сведения о которых содержатся в сообщении *neighbor list message*, передаваемом по каналу вызова БС, в зоне которой находится МС. Для того чтобы список соседних БС соответствовал текущему положению МС в системе, каждому пилот-каналу в граничном списке сопоставляется специальный счетчик времени (*aging counter*). Счетчик обнуляется, когда пилотный канал помещается в граничный список из активного или списка кандидатов. Значение счетчика увеличивается на единицу всякий раз после приема сообщения с

обновленными данными (*neighbor list update message*). Если значение счетчика какого-либо граничного представителя превысит порог  $NGHBR\_MAX\_AGE$ , канал переводится в список остальных. Список граничных каналов может содержать до 20 пилотных каналов. Пилотный канал может быть переведен из активного или списка кандидатов в граничный, если сведения о нем не содержатся в сообщении *handoff direction message*, причем промежуток времени с момента исключения превышает  $T\_TDRP$ .

Список остальных каналов включает все БС, использующие одну и ту же частотную полосу в 1,25 МГц и не входящие ни в один из трех ранее упомянутых списков.

Рис. 13.16 дает примерную иллюстрацию процедуры мягкой эстафетной передачи МС, движущейся из зоны обслуживания БС1 в направлении к БС2. До момента времени (1) МС обслуживается только БС1, пилот-сигнал которой является единственным представителем списка активных каналов. В процессе работы МС отслеживает наиболее сильные многолучевые компоненты сигналов в пилотном канале, оценивает их интенсивность в виде отношения сигнал-шум на чип  $q_c$  и сравнивает полученные оценки с двумя порогами  $T\_ADD$  и  $T\_DROP$ . Как видно из рис. 13.16, в момент времени (1) уровень пилотного сигнала БС2, не относящейся в данный момент к списку активных, превышает порог  $T\_ADD$ . МС по каналу обратного трафика

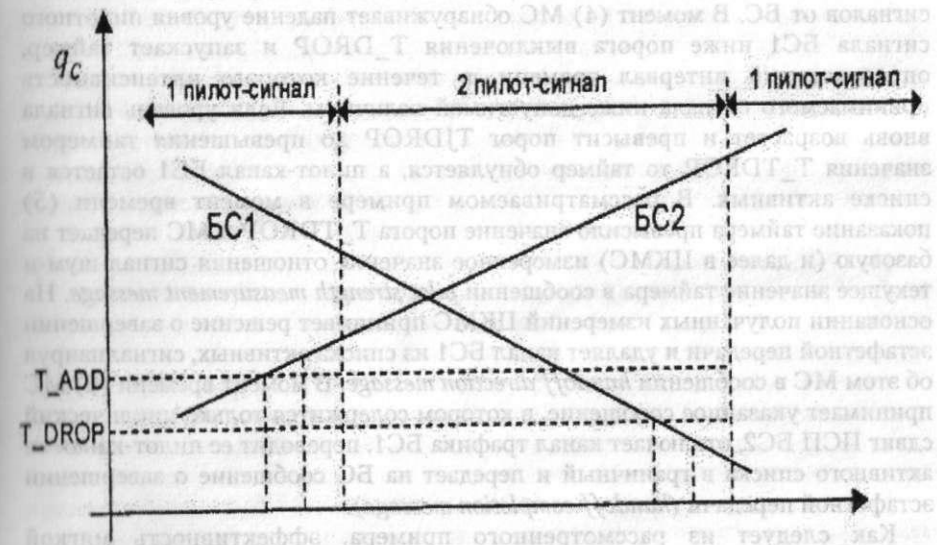


Рис. 13.16. К пояснению процедуры мягкой эстафетной передачи



информирует БС об этом превышении порога в сообщении *pilot strength measurement message* и переводит пилотный канал БС2 из граничного списка в список кандидатов. БС1 сигнализирует ЦКМС об указанном превышении порога, а тот в свою очередь определяет необходимость и возможность инициирования мягкой эстафетной передачи и при положительном решении командует контроллеру БС начать процедуру эстафетной передачи. КБС принимает команду и выделяет МС свободный канал прямого трафика БС2.

В момент времени (2) МС принимает от БС1 сообщение *hand-off direction message*, в котором указывается на необходимость установления связи с новой БС2 и содержится значение циклического сдвига короткой ПСП БС2 и номер функции Уолша, соответствующей выделенному каналу прямого трафика. После осуществления синхронизации по новому пилот-сигналу и захвата канала трафика МС в момент времени (3) переводит пилот-канал БС2 из списка кандидатов в список активных каналов и посылает на БС *сообщение об установлении режима мягкой эстафетной передачи (handoff completion message)* по каналу обратного трафика. Начиная с этого момента список активных каналов состоит из двух представителей - БС1 и БС2, а МС начинает работу в режиме мягкой эстафетной передачи, используя два различных канала прямого трафика и формируя результирующий сигнал "склеиванием" информационных кадров различных БС лучшего качества.

Дальнейшее передвижение МС изменяет энергетику принимаемых ею сигналов от БС. В момент (4) МС обнаруживает падение уровня пилотного сигнала БС1 ниже порога выключения T\_DROP и запускает таймер, определяющий интервал времени, в течение которого интенсивность принимаемого сигнала ниже допустимой величины. Если уровень сигнала вновь возрастет и превысит порог T\_DROP до превышения таймером значения T\_TDROP, то таймер обнуляется, а пилот-канал БС1 остается в списке активных. В рассматриваемом примере в момент времени (5) показание таймера превысило значение порога T\_TDROP и МС передает на базовую (и далее в ЦКМС) измеренное значение отношения сигнал-шум и текущее значение таймера в сообщении *pilot strength measurement message*. На основании полученных измерений ЦКМС принимает решение о завершении эстафетной передачи и удаляет канал БС1 из списка активных, сигнализируя об этом МС в сообщении *handoff direction message*. В момент времени (6) МС принимает указанное сообщение, в котором содержится только циклический сдвиг ПСП БС2, отключает канал трафика БС1, переводит ее пилот-канал из активного списка в граничный и передает на БС сообщение о завершении эстафетной передачи (*handoff completion message*).

Как следует из рассмотренного примера, эффективность мягкой эстафетной передачи в значительной степени определяется правильным выбором порогов T\_ADD и T\_DROP, а также временем срабатывания

таймера T\_TDROP. Установка низких порогов и большого интервала T\_TDROP приводит к расширению списка активных каналов и снижению частоты его обновления, что, с одной стороны, обеспечивает лучшее качество связи (поскольку в эстафетной передаче участвует большее количество БС), но, с другой - приводит к возрастанию нагрузки на каналы прямого трафика, а значит, к снижению абонентской емкости системы. Установка высоких порогов и малого времени срабатывания таймера увеличивает частоту обновления списков и сокращает число активных каналов, а значит, сохраняет системный ресурс, однако качество связи ухудшается, поскольку в эстафетной передаче задействовано малое количество БС. Вместе с тем, возрастает частота обмена служебной информацией между МС и БС, что опять увеличивает нагрузку на систему.

160. Нестеренко Н.И. *цифровизация всей страны*. Телеком, № 6, сентябрь, 1998, с. 4 – 6.
161. Freeman, Roger L., «Reference Manual For Telecommunication Engineering». John Wiley & Sons, Inc., New York, 1993.
162. Spectracom Prototype Network Synchronization Plan. Spectracom Corporation, 2000.
163. И.Ю.Шкляревский. «Измерения параметров синхронизации в телекоммуникационных сетях». Сети и телекоммуникации, №6, 2002, стр. 8-12.
162. В.П.Сикорский. «Математический аппарат инженера». Киев, «Техника», 1975.
163. Сайко В.Г. Беспроводное общение новой эпохи // Сети и телекоммуникации, 2000, №4, с. 40-45.
164. Лыченко М.Ю., Кравчук С.О. Становления нового виду телекоммуникаций – систем широкополосного беспроводного доступа // Винахідник і раціоналізатор, 2004, №9, с. 21-24.
165. Непомящий Б.О., Технічні рішення по створенню АТ “Українські Сателітарні Системи” універсального апаратно-програмного телекомунікаційного комплексу та системи супутникового зв'язку на його основі доступу // Винахідник і раціоналізатор, 2004, №9, с. 25-30.
166. Дингес С.И. Мобильная связь: технология DECT. М.: СОЛОН-Пресс, 2003, 272 с.

## Приложение П1.1

## Рекомендации по обеспечению гарантированного электроснабжения радиотелекоммуникационной аппаратуры

Сегодня на украинских электросетях чаще всего возникают такие сбои, как *кратковременные понижения напряжения*, связанные чаще всего с включением в сеть мощных потребителей. В принципе с какой-то частью подобных неполадок радиотелекоммуникационное оборудование может справиться и самостоятельно, но следует учитывать, что при работе с пониженным напряжением возрастает потребляемый ток, и это может привести к выходу из строя блоков питания. К сожалению, довольно сложно оценить, с какой частью подобных сбоев телекоммуникационные блоки питания способны справиться самостоятельно, так как диапазон напряжений, в котором телекоммуникационные устройства могут продолжать работу, зависит от конкретной модели, и выяснить это можно только экспериментальным путем. Но для этого надо протестировать такое оборудование на способность работать при пониженном напряжении.

Следующий случай в «рейтинге» отечественных сбоев – *высоковольтные импульсы*, вызываемые обычно близкими грозовыми разрядами. При отсутствии защиты наиболее вероятными последствиями этого становятся выход из строя блока питания и соответственно потеря данных. В таких случаях вполне достаточно использовать сетевой фильтр.

Полное отключение электроэнергии: в этой ситуации вопрос необходимости применения источников бесперебойного питания (ИБП) не обсуждается. Кроме того, для того чтобы справиться с шумом в электросети и кратковременным повышением напряжения, также достаточно сетевого фильтра.

Если кратко резюмировать, то можно сказать, что нет общего и верного для всех случаев ответа на вопрос, нужен ли ИБП для нормального функционирования связанного оборудования. Да его и не может быть, слишком много имеется неизвестных: качество конкретного участка электросети, стоимость восстановления потерянных данных, цена оборудования, ущерб от простой оборудования... Каждому придется решить этот вопрос самостоятельно. Вполне возможно, что кому-то действительно проще и дешевле обойтись без ИБП. Ну а если принципиально вопрос решен в пользу использования источника бесперебойного питания, то тогда надо проанализировать наиболее важные требования и критерии, которые помогут сделать выбор наиболее подходящей модели.

Очевидно, первым и наиболее важным критерием будет соответствие источника вашему оборудованию по *мощности*. Даже опытные пользователи ПК часто путают мощность в вольт-амперах (ВА), которой традиционно характеризуются ИБП, с мощностью в ваттах (Вт). Не вдаваясь в технические



подробности, напомним, что в вольт-амперах указывается полная мощность, равная произведению действующего напряжения на действующую силу тока. Активная мощность (Вт) всегда меньше полной и численно равна произведению полной мощности на коэффициент мощности, определяемый сдвигом фаз между током и напряжением. Для компьютерного оборудования этот коэффициент находится в пределах 0,6—0,8, т. е. полная мощность ИБП в ВА должна быть не меньше суммарной мощности всех подключаемых к источнику устройств в Вт, умноженной на коэффициент 1,4. Потребляемая ПК полная мощность зависит от конкретной конфигурации, но в среднем для современных систем следует ориентироваться на величины порядка 250—300 ВА для системного блока и 150—200 ВА — для 17-дюймового ЭЛТ-монитора. Соотношение мощности ИБП и мощности подключаемых к нему устройств заметно влияет также на следующий параметр...

**Время автономной работы характеризует**, насколько долго источник может обеспечивать функционирование телекоммуникационной аппаратуры при отсутствии напряжения в сети, и зависит главным образом от потребляемой мощности и емкости аккумуляторных батарей. В технических описаниях некоторых ИБП говорится о том, что «обеспечивается работа устройства в течение  $n$  минут». Современные системные блоки, могут не значительно различаться по потребляемой мощности, но тем не менее нелишним будет поинтересоваться, какой нагрузке на источник соответствует указанное время. Чем меньше нагрузка на ИБП, тем больше время автономной работы. Например, если нагрузка составляет 50% от номинальной мощности, то время работы увеличивается в 3—5 раз по сравнению со временем в такой ситуации, когда нагрузка полная (более точные цифры).

Следующий по важности критерий для оценки источников — **диапазон входных напряжений**, в котором ИБП обеспечивает работу без переключения на резервные элементы питания. Чем реже будут использоваться аккумуляторы, тем больше будет срок их службы и тем дольше на аппаратуру будет подаваться напряжение, максимально приближенное по форме к синусоиде. Немаловажное значение имеет взаимодействие ИБП с телекоммуникационным оборудованием (например, подключение по RS-232, USB, функциональность поставляемого в комплекте программного обеспечения и т.д.). И конечно же, не стоит забывать о защите от «дурака», удобстве настроек, уровне шума и внешнем виде, но данные параметры с трудом поддаются объективной оценке.

Надеемся, что данный здесь краткий перечень наиболее важных параметров ИБП упростит процесс выбора таких устройства.

Учебно-методическое пособие

ОЛЕЙНИК Владимир Филимонович  
Профессор, доктор технических наук

САЙКО Владимир Григорьевич  
Доцент, кандидат технических наук

БУЛГАЧ Сергей Викторович  
Начальник информационно - аналитического отдела  
центра "Укрчастотнадзор"

### Радиотелекоммуникационные технологии мобильных систем: теоретические основы и практическое применение

Подготовлено к печати 22.10.2004

Подписано в печать 29.10.2004

Формат 64x84 1/32

Печать офсетная. Услов. печ. листов. 19,375

Тираж 500 экз.

Заказ № 24-546.

Издатель 000°ДВ.К."

Свидетельство Госкоминформполитики Украины  
серия ДК № 804 от 08.02.2002 г.