

## Лекція №8

### Общие сведения

Сети фиксированного WiMAX являются реализацией технологии широкополосного беспроводного доступа Broadband Wireless Access (BWA) стандарта IEEE 802.16-2004. Основное предназначение данных сетей – это оказание услуг корпоративным и индивидуальным абонентам по высокоскоростной и высококачественной беспроводной передаче данных, голоса и видео на расстояния до нескольких десятков километров.

В сетях WiMAX реализованы самые последние достижения науки и техники в области радиосвязи, телекоммуникаций и компьютерных сетей. Стандарт IEEE 802.16 определяет применение:

- на физическом ( радио ) уровне широкополосного радиосигнала OFDM с множеством поднесущих.

- на канальном уровне используется современный протокол множественного ( многостанционного ) доступа Time Division Multiply Access (TDMA) и Scalable OFDM Access ( SOFDMA ) ,

- на сетевом (транспортном ) уровне в сетях WiMAX применяется IP протокол передачи данных, широко используемый в большинстве современных сетей передачи данных, в том числе, в сети Интернет.

### 1. Применение OFDM сигнала на физическом уровне сети WiMAX

Технология широкополосных радиосигналов (ШПС) была разработана в середине прошлого века и первоначально применялась для военных целей с целью повышения скрытности и помехоустойчивости связи. Важнейшим достоинством широкополосных систем является высокая скорость передачи данных. При этом понятие широкополосности (broadband) трактуется не только как использование радиосигнала с широким частотным спектром, но и как способность системы обеспечить высокую скорость передачи данных, необходимую для мультисервисного обслуживания (доступ в Интернет, передача данных, голоса, видео и др.).

В системах WiMAX, применяется широкополосный Orthogonal Frequency Division Multiplexing ( OFDM ) сигнал, образованный из множества разнесенных по частотному спектру узкополосных сигналов. Применение OFDM сигнала обеспечивает системам WiMAX наивысшую в классе BWA спектральную эффективность ( скорость передачи данных в одном Герце полосы частотного спектра), возможность работы вне прямой видимости, наивысшие энергетические параметры связи, обеспечивающие высокую дальность связи, возможность эффективного обслуживания мобильных абонентов

### 1.1 Спектральная эффективность OFDM сигнала системы WiMAX

Спектральная эффективность системы оценивается максимальной возможной скоростью передачи данных (количество передаваемых бит/с ) системы в единице полосы занимаемых частот в один Герц. Высокая спектральная эффективность системы WiMAX достигается за счет распределения передачи информации по параллельным подканалам поднесущих сигнала OFDM.

OFDM представляет собой множество узкополосных разнесенных по частоте сигналов -поднесущих (subcarrier) (рис.1).

OFDM сигнал формируется следующим образом. Некоторая высокоскоростная последовательность импульсов первоначально делится на множество параллельных цифровых потоков с импульсами большей длительности (рис2).

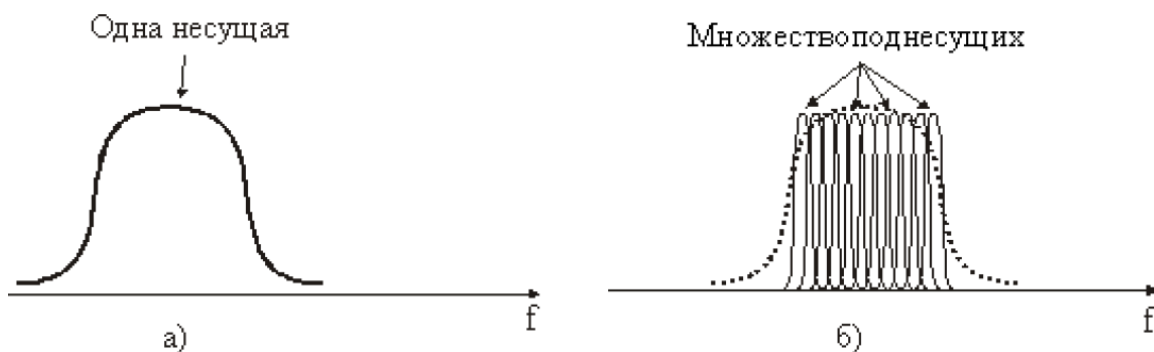


Рис. 1. Спектр радиосигнала с одной несущей (а) и OFDM (б)

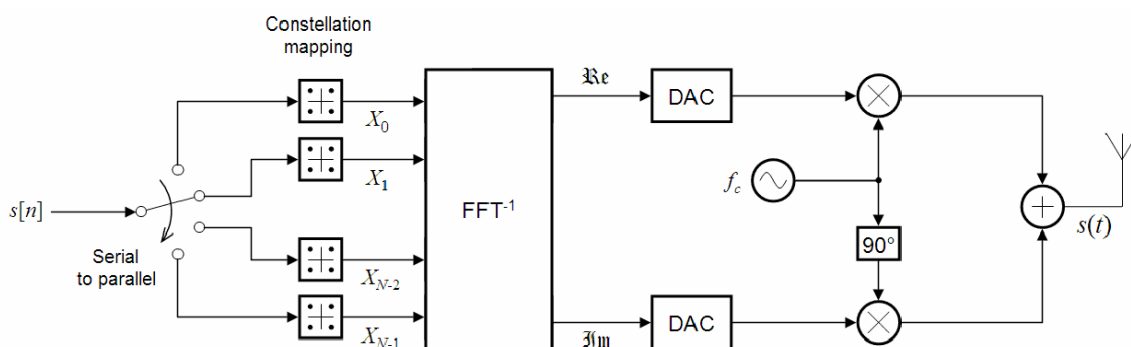


Рис.2 Формирование OFDM сигнала

Каждая вновь образованная последовательность импульсов модулируется по амплитуде и по фазе QAM полезным сигналом (constellation mapping), несущим информацию о передаваемых данных. Полученное множество модулированных последовательностей импульсов с помощью частотного мультиплексора объединяется в совокупность разделенных по частоте ортогональных каналов (поднесущих), образуя единый широкополосный сигнал. Далее сигнал с множеством поднесущих преобразуется с помощью Digital Analog Converter (DAC) в высокочастотный аналоговый радиосигнал и передается по беспроводному каналу связи.

Операция ортогонального частотного мультиплексирования с математической точки зрения представляет собой операцию FFT – дискретного обратного быстрого преобразования Фурье. С физической точки зрения мультиплексирование переводит временные импульсы time domain в частотное распределение frequency domain (рис 3). На приемной стороне

происходит обратная операция преобразования в промежуточную частоту, демультиплексирования и демодуляции широкополосного сигнала.

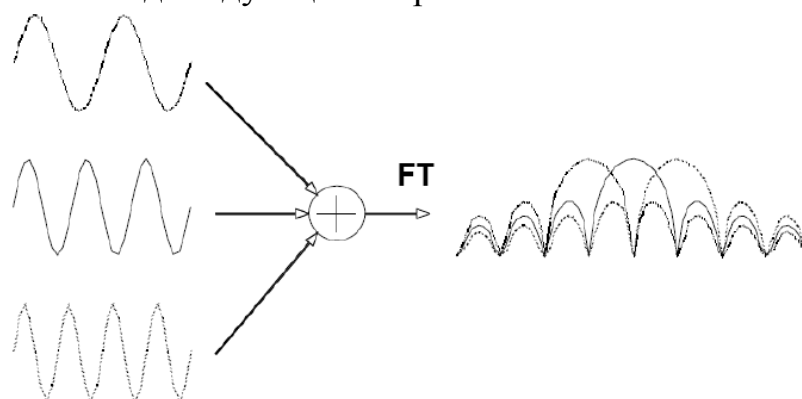


Рис.3 Принцип формирования разнесенных по частоте поднесущих

Важнейшим отличием OFDM технологии от простого разделения радиосигнала по нескольким параллельным частотным каналам является ортогональность поднесущих в групповом спектре OFDM сигнала. Физический смысл ортогональности заключается в подмешивании в структуру каждой поднесущей специальной метки – определенного уникального количества синусоидальных колебаний сигнала, различающихся по фазе на 90 град., (ортогональных функций), позволяющего демультиплексору на основе анализа данных меток разделять поднесущие сигналы даже в случае частичного перекрытия их частотных спектров. Выделение несущих в общем спектре обычного многоканального сигнала вследствие ограниченных технологических возможностей современных полосовых частотных фильтров требует достаточно большого частотного разноса несущих, что ограничивает увеличение их количества в заданной полосе частот. Выделение несущих в групповом спектре OFDM сигнала при демультиплексировании производится с помощью ортогональных преобразований сигналов. Это допускает возможность перекрытия спектров соседних поднесущих, что позволяет значительно увеличить частотную плотность их размещения в спектре сигнала и повысить спектральную эффективность.

Метод селекции сигналов и помех (шума) на основе анализа их структуры применяется в технологии широкополосной радиосвязи с середины 1990-х годов. Впервые данный метод был использован в технологии расширения спектра DSSS для формирования и выделения на фоне помех широкополосного шумоподобного сигнала, образуемого путем умножения (мультиплексирования) узкополосного сигнала на случайную скоростную последовательность импульсов. Данная технология была реализована в беспроводных локальных сетях первого поколения Wireless LAN (WLAN) стандарта IEEE 802.11, системах спутниковой навигации GPS. Метод выделения сигналов по заложенным при их формировании цифровым кодам также реализован в мобильной связи стандарта Code Division Multiply Access (CDMA).

Применение OFDM сигнала позволяет WiMAX сетям обеспечить более высокую скорость передачи данных по сравнению системами с одной несущей, что достигается за счет распределения передачи информации по множеству параллельных частотных каналов.

Использование OFDM, в принципе, не является специфичной особенностью технологии WiMAX. Модуляция OFDM также применяется, например, в системах Wi-Fi стандарта IEEE 802.11 a/g . Однако OFDM в технологии WiMAX стандарта IEEE 802.16 имеет значительно большее число поднесущих, определяющих более высокую спектральную эффективность систем WiMAX по сравнению с системами стандарта IEEE 802.11 a/g.

OFDM сигнал в WiMAX сетях фиксированного доступа стандарта IEEE 802.16-2004 имеет до 256 поднесущих, в сетях мобильного WiMAX стандарта IEEE 802.16e - до 2048 поднесущих, а в системах Wi-Fi стандарта IEEE 802.11a/g - всего лишь 64 поднесущих. Следует отметить, что большинство систем широкополосного беспроводного доступа BWA предыдущего поколения (так называемые preWiMAX системы ) базируются на чипсете стандарта IEEE 802.11a. Все модификации и усовершенствования систем Wi-Fi, позволяющие их использовать для целей BWA, выполняются на программном уровне. Тем самым, сигналы preWiMAX , также как и Wi-Fi, имеют всего 64 поднесущих. Это означает, что WiMAX сети фиксированного доступа имеет приблизительно в три и более раз большую спектральную эффективность по сравнению с Wi-Fi и preWiMAX системами. Тем самым, предел скорости передачи данных на физическом уровне сети при использовании канала связи одинаковой ширины в системах WiMAX более чем в три раза выше, чем в системах preWiMAX и Wi-Fi. Так теоретический предел скорости передачи канала WiMAX стандарта IEEE 802.16-2004 шириной 10 МГц ( 128 поднесущих ) составляет около 36 Mbps. Предел скорости передачи данных системы на базе чипсета Atheros стандарта IEEE 802.11a , используемого в Wi-Fi и pre-WiMAX в канале связи 20 МГц ( 64 поднесущих ) составляет примерно 30 Mbps, и, соответственно, в канале связи шириной 10 МГц ( 32 поднесущих ) – менее 15 Mbps.

## **1.2 Подавление замираний OFDM сигнала**

Вторым ключевым преимуществом технологии WiMAX, обеспечиваемое применением OFDM сигнала, является возможность эффективной работы канала связи в условиях отсутствия прямой видимости Non Line Of Sight (NLOS) между базовой станцией Base Station (BS) и абонентским терминалом Subscriber Station (SS).

Возможность сетей WiMAX работать в условиях NLOS обусловлена устойчивостью сигнала OFDM с множеством поднесущих к многолучевому распространению радиоволн, имеющему место вследствие переотражений сигнала от препятствий между BS и SS.

Многолучевое распространение приводит к так называемым замираниям (“федингам” fade), когда радиосигнал многократно переотражаясь от препятствий приходит в точку приема с различной амплитудой, временной и

фазовой задержкой. Переотраженные сигналы, складываясь в противофазе, приводят к снижению уровня (замиранию) амплитуды результирующего сигнала.

Для борьбы с замираниями используются различные методы. Так в системах Wi-Fi стандарта IEEE 802.11b (сигнал с одной несущей) используется метод разнесенного приема (antenna diversity), когда прямой и отраженные сигналы принимаются на две антенны, разнесенные на половину длины волны. В GSM и CDMA системах (с одной несущей) применяются сложные эквалайзеры и фильтры. Наиболее эффективным способом борьбы с замираниями является использование OFDM сигнала с множеством поднесущих.

Временные задержки импульсов поднесущих и их сложение с различными фазами на приемной стороне приводит к снижению (замираниям) в течении некоторого времени амплитуды поднесущих (burst time fading), которые в результате ортогональных преобразований трансформируются (рис 4) в замирания (burst frequency fading) поднесущих в некоторой полосе частотного спектра (рис 5). Искажения поднесущих, получаемые вследствие замираний данного типа, получили название межсимвольной интерференцией Inter-Symbol- Interference (ISI)

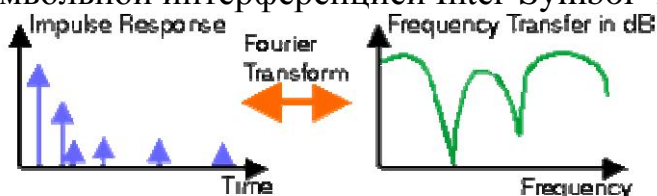


Рис. 4 Преобразование временных замираний в частотные в приемнике OFDM сигнала.

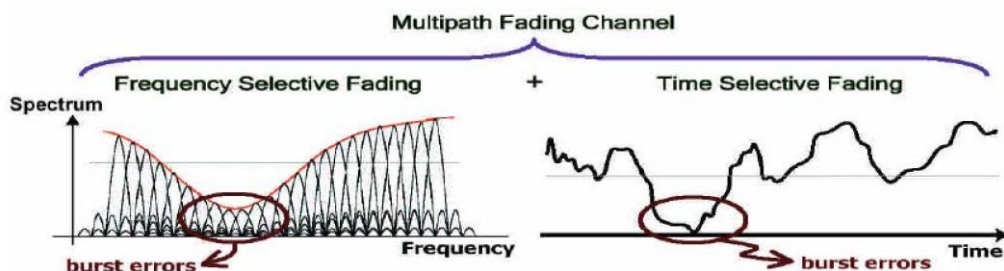


Рис.5 Частотные и временные замирания сигналов.

Эффективная селекция переотраженных сигналов (эхоподавление), поступающих с некоторой временной задержкой, может быть выполнена при наличии достаточного защитного временного интервала между моментами прихода импульсов сигналов. Длительность такого интервала должна превышать максимальное (или среднее) время задержки времени (delay spread) прихода переотраженных сигналов. Для условий офиса в локальных беспроводных сетях типичное время задержки составляет 20-200 нс, в системах BWA в условиях городской застройки – 5-10 микросек, 0.2 мс в сельской местности.

Защитный временной интервал в системах OFDM WiMAX стандарта IEEE 802.16 регулируется величиной Cyclic Prefix ( CP ), определяющей отношение между длительностью импульса поднесущей и защитным интервалом. Максимальное возможное значение  $CP=1/4$  соответствует максимально возможной в системах WiMAX величине защитного интервала, превышающего среднюю временную задержку импульсов поднесущих и обеспечивающего эффективное подавление межсимвольной интерференции ISI в условиях плотной городской застройки. Минимальный  $CP = 1/32$  – соответствует минимально возможному защитному интервалу, обеспечивающему эхоподавление при отсутствии множественных препятствий между передатчиком и приемником на расстояниях в несколько километров.

Защитный интервал в системах Wi-Fi и preWiMAX, использующих Wi-Fi радио стандарта IEEE 802.11 a/g с сигналом OFDM, выбирается на основе типовых задержек переотражений сигналов в условиях офисного применения. Тем самым параметры OFDM сигнала в системах Wi-Fi и preWiMAX с Wi-Fi радио не позволяют эффективно бороться с типовыми для городской застройки задержками сигналов и, соответственно, обеспечивать эффективную работу в отсутствие прямой видимости в городских условиях.

Следует отметить, что увеличить такой защитный интервал, например, производителем Wi-Fi чипсета, для получения возможности эффективной работы в городских условиях технологически невозможно. Дело в том, что достаточно длительный защитный интервал в системах WiMAX может быть установлен благодаря большой длительности импульсов OFDM поднесущих стандарта IEEE 802.16, в сотни и тысячи раз больший, нежели в системах стандарта IEEE 802.11 a/g. Большая длительность имеет место вследствие более низкой скорости следования импульсов поднесущих, что, в свою очередь, получено вследствие разделения исходной высокоскоростной последовательности на большее количество (256 и более) параллельных поднесущих OFDM WiMAX по сравнению с 64 поднесущими OFDM Wi-Fi. Тем самым, 64 поднесущие сигнала OFDM Wi-Fi представляют собой очень короткие импульсы, следующие с высокой скоростью, что не позволяет увеличивать их длительность и период их следования до требуемой величины для отличных от офиса применений. Вместе с тем в отдельных случаях, в сельской местности с низкой плотностью застройки, параметры ISI, определяемые величинами задержек от переотражений, могут соответствовать офисному применению, и Wi-Fi и preWiMAX системы могут так работать в условиях NLOS.

Как бы эффективно не работала система подавления межсимвольной интерференции, ошибки замираний все равно возникают. Для устранения этих и других ошибок применяется метод коррекции FEC ( forward error correction), основанный на использовании избыточных кодов. Однако коррекция может быть применена для устранения только одиночных ошибок. В случае замираний обычно имеет место групповая ошибка, когда одновременно искажаются нескольких последовательно следующих друг за

другом импульсов ( burst ) поднесущих ( рис 5). Для решения этой проблемы применяется метод устранения ошибок interleaving, когда в передатчике поднесущие OFDM перемешиваются в случайной порядке ( рандомизация ), а в приемнике их исходная последовательность восстанавливается. При этом групповые искажения на приемной стороне разносятся по частотному спектру поднесущих, приобретая одиночный характер, и могут быть устранены применением корректирующих кодов FEC. Метод interleaving тем более эффективен, чем большее количество поднесущих включено в процесс рандомизации. Тем самым OFDM сигнал WiMAX вследствие большого количества поднесущих гораздо более устойчив к ошибкам вообще и ошибкам замирания сигналов, в частности, по сравнению OFDM системами Wi-Fi и preWiMAX.

Важнейшим источником межсимвольной интерференции OFDM сигналов являются частотные искажения поднесущих от сигналов передатчиков движущихся объектов вследствие эффекта доплеровского смещения частоты. Данная проблема решается методом, аналогичным подавлению замираний, путем увеличения количества поднесущих до 1028. Это позволяет эффективно обслуживать движущие объекты, то есть мобильных абонентов.

Таким образом, использование OFDM сигнала с большим количеством поднесущих, позволяет системам WiMAX эффективно обслуживать пользователей в условиях отсутствия прямой видимости, а также движущихся ( мобильных ) абонентов.

### **1.3 Энергетические параметры канала связи WiMAX**

Технология WiMAX имеет наивысшие в классе BWA энергетические параметры канала связи, что обеспечивает заданную высокую скорость передачи данных ( пропускную способность ) на самой большой дальности и наоборот, на заданной дальности сеть WiMAX имеет самую высокую пропускную способность. Тем самым, системы WiMAX обеспечивают самую высокую плотность потока данных, измеряемую пропускной способностью в Mbps в пересчете на один кв. км покрываемой территории. Высокая пропускная способность систем WiMAX достигается за счет возможности поддержки на больших дальностях высокой символьной скорости вследствие высокой энергетики системы. Символьная скорость, часто называемая также скоростью модуляции ( или кодовая скорость ), характеризует скорость передачи информации ( данных ) на физическом ( радио ) уровне сети и представляет собой скорость передачи последовательности символов, реализуемая модуляцией сигнала. Так, например, скорости модуляции в 11, 54 Mbps в системах Wi-Fi стандарта IEEE 802.11 a/g -это символьные скорости. Реальные скорости передачи данных, измеряемые на канальном и транспортном уровнях сети, значительно меньше символьных скоростей. Энергетика системы определяется величиной параметра системного усиления ( System Gain).

Символьная скорость передачи полностью определяется используемым типом модуляции, то есть каждый тип модуляции обеспечивает

определенную символьную скорость. Тем самым, высокая плотность потока данных в сетях WiMAX достигается за счет возможности поддержки на больших по сравнению с другими системами дальностях высокоскоростных типов модуляций.

В системах WiMAX применяется квадратурная амплитудно- фазовая модуляции QAM, а также фазовая модуляция QPSK и BPSK . На сегодняшний день QAM является одной из самых эффективных методов модуляции, позволяющий достигать максимально возможные скорости передачи данных.

При реализации QAM каждая поднесущая OFDM сигнала модулируется полезным сигналом одновременно по амплитуде и по фазе, образуя сигнал, положение которого в пространстве координат фазы и амплитуды, называемого также диаграммой созвездия ( constellation diagram), несет информацию о закодированном в нем символе. На рис.6 представлено диаграмма созвездия модуляции 16QAM .

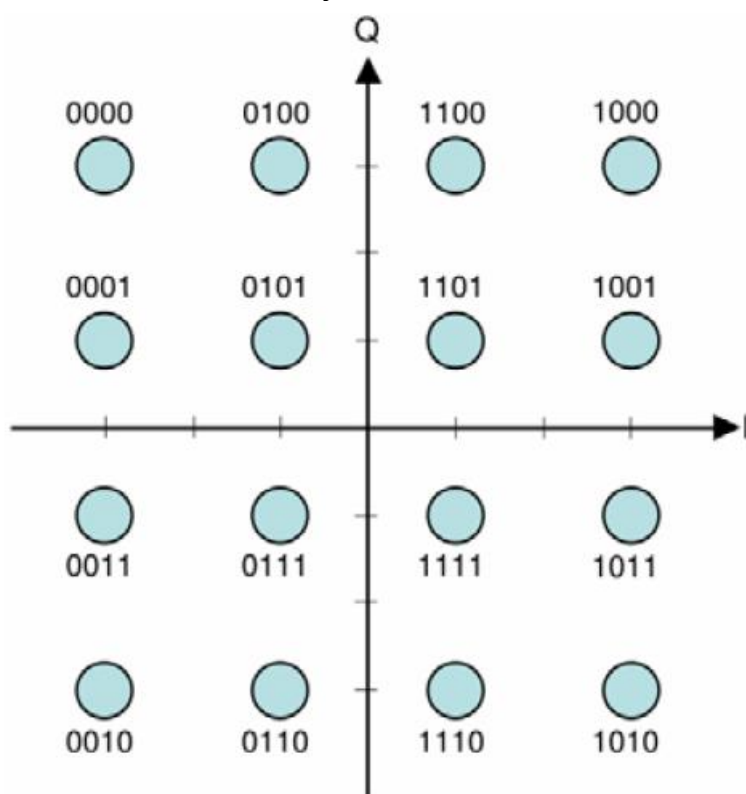


Рис. 6 Диаграмма созвездия модуляции 16 QAM

Вектор сигнала 16 QAM имеет 16 возможных позиции в пространстве координат амплитуды и фазы, что кодирует 16 значений символа от 0000 до 1111. Вектор сигнала 64 QAM имеет 64 позиции, что кодирует 64 значения символа. Модуляции BPSK и QPSK кодируют 2 и 4 значения символа с помощью, соответственно, двух и четырех возможных значений фазы. Амплитуда сигнала в модуляциях BPSK и QPSK не меняется. Тем самым эти



два типа модуляции можно рассматривать как частный случай амплитудно-фазовой модуляции QAM. Таким образом, модуляция 64QAM является самой скоростной, поскольку позволяет передавать 64 возможных значения в одном символе данных, что обеспечивает более высокую символьную скорость и, в результате, более высокую скорость передачи данных по сравнению с более низкими модуляциями.

Квадратурная амплитудно-фазовая модуляция QAM применяется практически повсеместно, в том числе в Wi-Fi и preWiMAX системах с чипсетом стандарта IEEE 802.11 a/g. При этом применяемая в системах WiMAX высокоскоростная модуляция 64 и 16 QAM может поддерживаться на значительно более высоких дальностях по сравнению Wi-Fi и preWiMAX системами с аналогичным типом модуляции 64 и 16 QAM при условии использования OFDM сигналов одинаковой мощности.

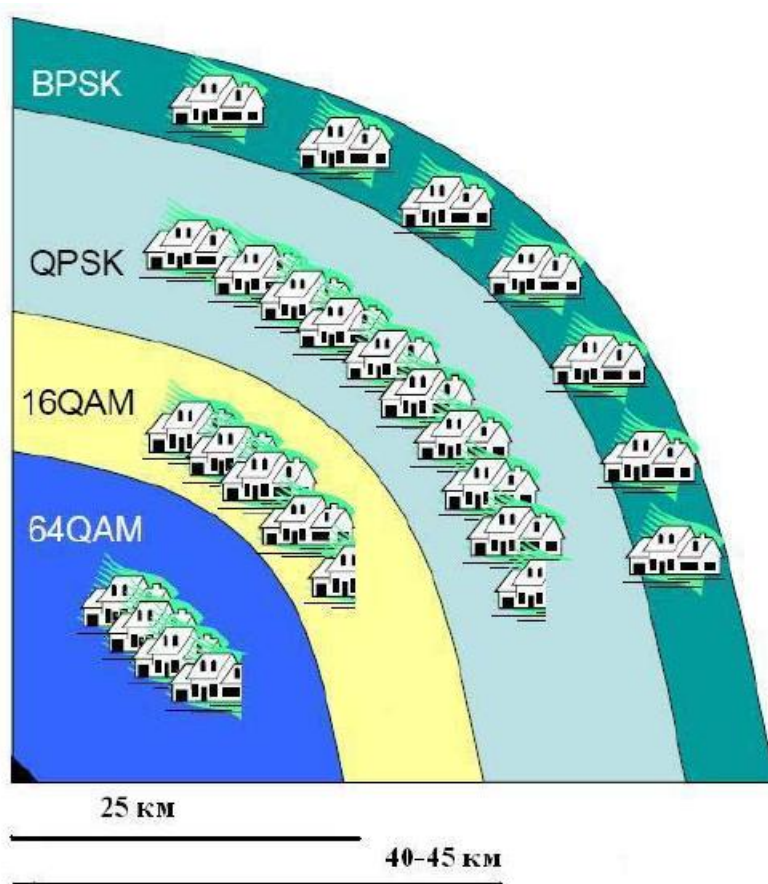


Рис. 7 Зоны обслуживания сети WiMAX

На рис. 7 представлены зоны обслуживания различными модуляциями стационарных абонентов WiMAX фиксированного доступа в диапазоне частот 5 ГГц. Так обслуживание абонентов, оснащенных внешней направленной антенной на самой скоростной модуляции 64 QAM, поддерживающей максимальную символьную скорость и соответствующую скорость передачи данных, обеспечивается на дальности до 25 км, 16 QAM . – на дальности до 40-45 км. Тем самым, дальность обслуживания на

скоростных модуляциях 64 и 16 QAM в сети WiMAX в четыре и более раз больше соответствующих дальностей обслуживания на аналогичных модуляциях систем preWiMAX.

Способность поддержки той или иной модуляции зависит от многих параметров связи, и в первую очередь, от энергетических параметров системы.

Как видно из диаграммы созвездия модуляции QAM, чем выше тип модуляции, тем меньше по амплитуде и фазе отличаются векторы соседних значений передаваемого символа. Тем самым, для безошибочного приема символа (приема с некоторым допустимым уровнем ошибок) требуется более мощный сигнал, а точнее, более высокое отношение мощности сигнала к шуму.

Каждый тип модуляции для передачи символа с уровнем ошибок, не превышающего определенного максимального значения, требует определенного минимального значения отношения уровня сигнала к шуму Signal/ Noise Ratio (SNR или S/N). Помимо SNR часто используется практически идентичное обозначение данного отношения - CNR Carrier/Noise Ratio или C/N.

Каждый тип модуляции характеризуется требуемым уровнем отношения сигнала к шуму SNR, необходимому для передачи бит информации с ошибками Bit Error Rate ( BER) не выше некоторого допустимого уровня. На рис.8 представлены зависимости отношения SNR от битовых ошибок для каждого типа модуляции.

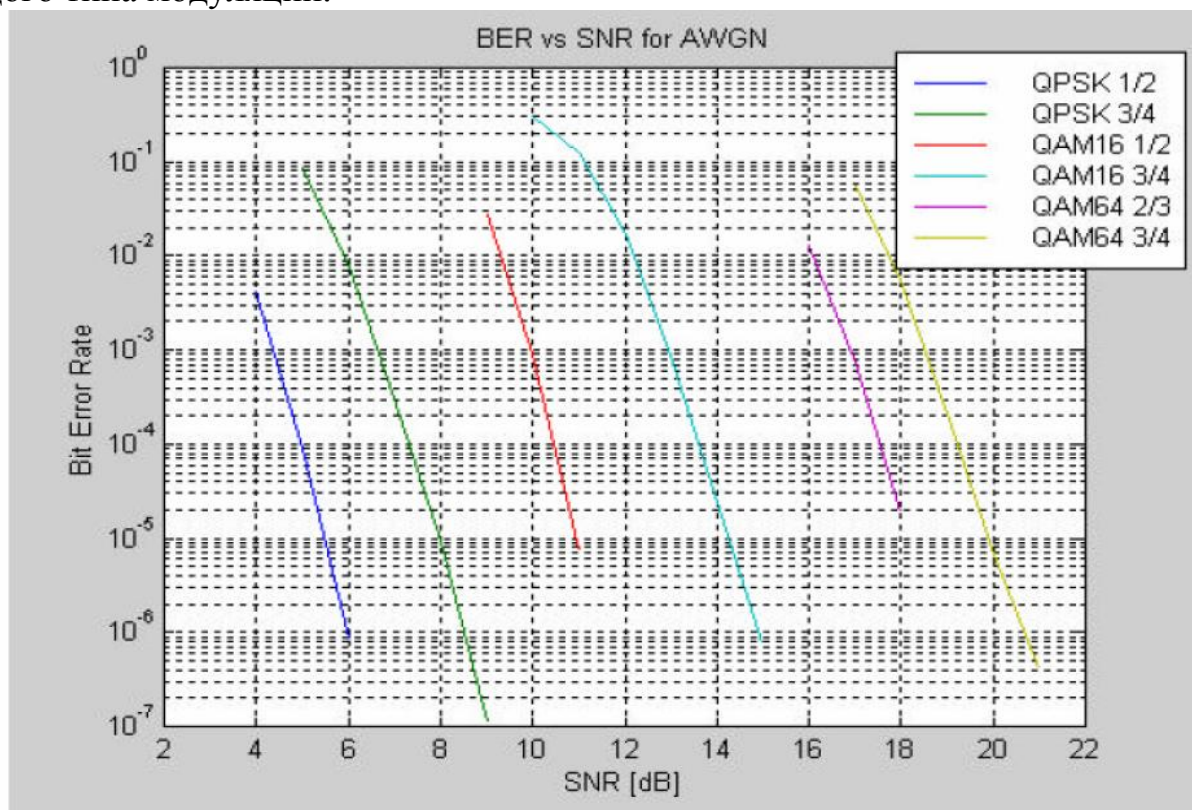


Рис. 8 Зависимость отношения сигнал/шум от битовой ошибки.

Для систем WiMAX стандарт IEEE 802.16 определяет максимально допустимый уровень битовой ошибки равный  $BER=10E-6$  (процент приема ошибочных бит информации не более 0,005%). При данном уровне ошибок система WiMAX способна поддерживать с требуемым качеством самый критичный к ошибкам сервис цифровой телефонии (сервис TDM).

Стандарт IEEE 802.16-2004 определяет для поддержки модуляции 64QAM на уровне ошибок не выше  $BER=10E-6$  с учетом коррекции ошибок FEC =3/4 значение отношения сигнал/шум для OFDM сигнала SNR равное 24.4 dB. Для поддержки остальных более низких типов модуляции требуются, соответственно, более низкие значения SNR. Более поздний стандарт IEEE 802.16e-2005 задает для фиксированных WiMAX OFDM более низкое значение SNR= 21 dB для 64QAM с  $BER=10E-6$ , и SNR= 20 dB для 64QAM для мобильных сетей WiMAX OFDMA. Для поддержки самой низкой модуляции BPSK 1/2 стандарт IEEE 802.16e-2005 определяет требуемый SNR равный 3 dB.

Отметим, что стандарт IEEE 802.16e-2005 описывает требования не только к мобильным OFDMA сетям WiMAX, а также содержит новые требования к фиксированным OFDM сетям WiMAX.

Для получения требуемого уровня SNR мощность сигнала на входе приемника системы должна быть выше соответствующего для того или иного типа модуляции порогового уровня чувствительности.

Пороговый уровень чувствительности  $R_x$  приемника для систем OFDM для модуляции, например, 64QAM, определяется как:

$$R_{x \text{ 64QAM}3/4} = N_o + SNR_{\text{64QAM}3/4} + 10 \log (BW_{ef}) + N_f + \text{Implementation Loss, dBW}; (1)$$

где  $SNR_{\text{64QAM}3/4}$  требуемый уровень отношения SNR для модуляции 64QAM =21 dB;

$N_o = 10 \log (kT_o) = -144 \text{ dB(W/MHz)}$  – Receiver Noise Floor спектральная плотность мощности теплового шума приемника,  $kT_o$  - закон равномерного распределения;

$N_f$  - значение собственного (внутреннего) шума приемника (noise figure) равное -8 dB (IEEE 802.16e-2005). Ранее считалось, что  $N_f = -6 \text{ dB}$ , в также  $N_f = -7 \text{ dB}$  по стандарту IEEE 802.16-2004.

Значение Implementation loss равно 5 dB. Эта величина отражает так называемые потери реализации, учитывающие неидеальность приемника, ошибки квантования, фазовый шум и др.

$BW_{ef}$  - эффективная ширина спектра группового OFDM сигнала. Эта величина пропорциональна количеству используемых поднесущих в спектре группового сигнала. За счет наличия защитного интервала между поднесущими эффективная ширина спектра OFDM сигнала несколько больше ширины канала  $BW$ . Для канала шириной 10 МГц без

subchannelisation ( используются все поднесущие )  $BW_{ef} = 11.52$  МГц,  $10 \log(BW_{ef}) = 10.61$  dB.

Итак,

$$R_{x \text{ 64QAM3/4}} = -101 + SNR_{\text{64QAM3/4}} + 10 \log(BW_{ef}), \text{ dBm}; (2)$$

Для других типов модуляции пороговый уровень чувствительности определяется аналогично.

Тем самым требуемый для поддержки модуляции 64QAM . пороговый уровень чувствительности системы WiMAX фиксированного доступа стандарта IEEE 802.16e-2005 при implementation loss 5 dB с шириной канала 10 МГц составляет 69.4 dBm, при  $SNR_{\text{64QAM3/4}} = 21$  dB. Например, для мобильного WiMAX по стандарту IEEE 802.16e-2005 требуемое отношение  $SNR_{\text{64QAM3/4}} = 20$  dB и, соответственно,  $R_{x \text{ 64QAM3/4}} = -70.4$  dBm. По стандарту IEEE 802.16-2004 эта величина ранее составляла 68 dBm и  $SNR_{\text{64QAM3/4}} = 24.4$  dB. Отметим, что приведенные выше значения чувствительности справедливы для приемника WiMAX, не использующего технологию разнесенного приема MIMO. Таким образом, для поддержки некоторой модуляции уровень OFDM сигнала на входе приемника Receive Strength Signal Level ( RSSL) в полосе пропускания канала BW должен превышать соответствующий этой модуляции уровень чувствительности, что равносильно тому, что входной сигнал на величину SNR отношения сигнал/шум превышает уровень теплового шума с учетом внутреннего шума приемника и потерь реализации.

Таким образом, для поддержки модуляции 64QAM . уровень OFDM сигнала на входе приемника Receive Strength Signal Level ( RSSL) должен быть для систем WiMAX согласно стандарту IEEE 802.16e-2005 не ниже уровня чувствительности -69.4 dB (  $SNR_{\text{64QAM3/4}} = 21$  dB) в полосе ширины канала  $BW = 10$  МГц.

Реальные системы WiMAX обычно имеют более высокий по сравнению с требованиями стандарта уровень чувствительности, поскольку значение потерь реализации implementation loss 5 dB и уровень внутренних шумов приемника -8 в стандарте несколько завышено. Например, чувствительность WiMAX базовой станции UNIDATA MAXBridge BS 50 фиксированного доступа стандарта IEEE 802.16-2004 в диапазоне частот 5 ГГц в канале шириной 10 МГц для 64QAM . составляет -74 dBm (при  $SNR_{\text{64QAM3/4}} = 21$  dBm ( $N_f = -6$  dB, потери реализации 4 dB)). Чувствительность абонентского терминала UNIDATA MAXBridge CPE 5 GHz ( стандарт IEEE 802.16-2004 ) составляет -70.5 dBm.

В принципе, система может поддерживать модуляцию 64QAM и при значительно (на несколько dB) более низких значениях сигнала, но при этом уровень битовой ошибки будет хуже значения  $BER = 10e^{-6}$ .

Системы preWiMAX также как и WiMAX имеют близкие требования к SNR для поддержки модуляции QAM. Однако вследствие использования

более широкого спектра (обычно 20 МГц) и наличия более высоких потерь реализации приемника уровни чувствительности систем LTE WiMAX обычно на 5-10 dB хуже систем WiMAX.

Так одна из лучших систем на базе чипсета 802.11a, обеспечивающая передачу TDM трафика в топологии точка-точка (PtP), имеет пороговую чувствительность -65 dBm для канала BW=10 МГц, -62 dBm для BW=20МГц (BER не ниже 10E-6). Следует отметить, что в спецификациях систем Wi-Fi и LTE WiMAX можно встретить другие более высокие цифры чувствительности, нередко превышающие теоретический предел. Однако подобные данные либо справедливы для более низкого уровня ошибок, например, BER=10E-3, либо просто завышены малоизвестными производителями по маркетинговым мотивам.

Каждая система характеризуется параметром, называемым системным усилением System Gain, определяющим максимальную дальность связи. Системное усиление определяется как :

$$\text{System Gain} = T_x - R_x;$$

где  $T_x$  – выходная мощность передатчика системы;  $R_x$  - чувствительность приемника системы.

Система Wi-Fi имеет ограничения на максимальную мощность радиосигнала при работе на той или иной модуляции. Например, система Wi-Fi с максимальной выходной мощностью передатчика  $T_x = 20$  dBm поддерживает модуляцию 64QAM . при уровне мощности радиосигнала не выше 13 dBm. При этом максимальная выходная мощность, например, 20 dBm система Wi-Fi реально может поддерживать только на низких модуляциях BPSK, QPSK.

Таким образом, вследствие существенной разницы в чувствительности приемника WiMAX и Wi-Fi, а также способности передатчика WiMAX поддерживать высокие модуляции на максимальных мощностях радиосигнала, системы WiMAX имеют системное усиление выше чем Wi-Fi на 5 -10 dB на низких модуляциях и 12-17 dB на высоких модуляциях при одинаковой максимальной  $T_x$  выходной мощности передатчика.

Для расчета дальности связи используют уравнение бюджета канала связи Link Budget. Данное уравнение связывает уровни мощности на входе приемника  $RSSL_{RX}$  и выходной мощности передатчика  $T_x$ , находящихся друг от друга на расстоянии D:

$$RSSL_{RX} = T_x + G_{TX} + G_{RX} - L_{RX} - L_{TX} - L_D, \text{ dBm}; \quad (3);$$

где  $T_x$  - выходная мощность передатчика, dBm

$G_{TX}$  – коэффициент усиления антенны передатчика, dBi;

$G_{RX}$  – коэффициент усиления антенны приемника, dBi;

$L_{RX}, L_{TX}$  – СВЧ потери мощности сигнала, соответственно, в приемнике и передатчике, в кабеле, разъемах и др.

$L_D$  – потери в dB на пути распространения радиоволн на дальность D км.

Например, в условиях LOS потери мощности сигнала в свободном пространстве рассчитываются как,

$$L_D = 20 \log ( 4\pi D / \lambda ), \text{ dB};$$

где  $\lambda$  длина волны.

В условиях NLOS потери рассчитываются по более сложным формулам.

Поскольку система поддерживает связь на модуляции 64QAM, если уровень сигнала на входе приемника  $RSSL_{RX}$  будет выше уровня чувствительности  $R_X$ , то согласно выражению Link Budget (3) для этого необходимо, чтобы

$$RSSL_{RX} - FM = T_X + G_{TX} + G_{RX} - L_{RX} - L_{TX} - L_D - FM \geq R_X, \text{ dBm};$$

$$L_D \leq T_X - R_X + G_{TX} + G_{RX} - L_{RX} - L_{TX} - FM;$$

где FM – запас по замираниям fade margin.

В реальных системах вследствие замирания сигнала из-за многолучевого распространения радиоволн обычно требуется, чтобы уровень сигнала  $RSSL$  превышал уровень чувствительности сигнала на некоторую величину, называемую запасом по замираниям Fade Margin (FM). В системах WiMAX для поддержки модуляции 64QAM сигнала OFDM достаточно запаса fade margin равное 1 dB, на практике используют величину fade margin 3 dB.

Таким образом, для работы на дальности D км, потери распространения радиоволн должны быть меньше величины:

$$L_D \leq \text{System Gain} + \text{усиление антенн} - \text{СВЧ потери} - \text{Fade Margin}$$

Таким образом, чем выше System Gain системное усиление и меньше требуемый запас по замираниям Fade Margin, тем больший бюджет линка имеет система и соответственно, тем больше дальность связи.

Как было отмечено, системы фиксированного WiMAX имеют минимум на 5-10 dB выше System Gain по сравнению с системами PreWiMAX. Кроме того, OFDM сигнал preWiMAX системы имеет значительно меньшее число поднесущих. Также защитный интервал между поднесущими не рассчитан на обработку многолучевого распространения сигналов на высоких дальностях связи (отличных от офисных условий). Это приводит к низкой эффективности обработки замираний системами preWiMAX и, как следствие, необходимости больших запасов по замираниям fade margin, равными 6 dB в условиях LOS (при наличии зоны Френеля) и 12 dB при наличии оптической видимости (near LOS, полное или частичное отсутствие зоны Френеля).

Таким образом, системы WiMAX имеют бюджет линка Link Budget на 10- 20 dB больше, нежели системы preWiMAX. Как известно, увеличение Link Budget на 6 и 12 dB увеличивает дальность связи, соответственно, LOS и NLOS в два раза.

В Таблице 1 представлены сравнительные данные по энергетическим параметрам систем WiMAX при работе на высоких модуляциях 64QAM и preWiMAX при работе на модуляции 64QAM.

Таблица 1. Энергетические параметры систем WiMAX и preWiMAX

Система	Rx, чувствительность, BS/SS 64QAM $\frac{3}{4}$ , BW=10 МГц	Tx power BS/SS	Fade Margin	Требуемый SNR, 64QAM $\frac{3}{4}$ ,	System gain DL	Величина запаса DL Link Budget
WiMAX, IEEE 802.16-2004, 5 ГГц	-70/-70	20/20	1	21	90	18
Airspan MicroMAX IEEE 802.16 -2004, 5 ГГц	-74/-76	22/20	1	21	98	28
MAXBridge BS 50 IEEE 802.16 -2004, 5 ГГц	-74/-71	24/20	1	21	95	25
PreWiMAX IEEE 802.11a, 5 ГГц	-62/-62	13/13	6	21	75	-

Представляет интерес также сравнительный анализ дальности- скорости передачи данных WiMAX систем в диапазоне частот 5 ГГц с системами BWA диапазона частот 2.4 ГГц. Потери мощности сигнала при распространении радиоволн в условиях LOS на первых 50 км в диапазоне частот 2.4 ГГц на 7 dB меньше аналогичных потерь в диапазоне частот 5 ГГц. Тем самым, увеличение Link Budget на 7 dB могло бы дать увеличение дальности связи в два раза. Однако такого преимущества системы BWA 2.4 ГГц не имеют.

Большинство систем BWA в диапазоне 2.4 ГГц работает на модуляции BPSK, QPSK с одной несущей (стандарт IEEE802.11b). Системы 2.4 ГГц стандарта IEEE 802.11g, поддерживающие модуляцию QAM и OFDM с множеством поднесущих, в целях обратной совместимости с системами IEEE 802.11b на модуляциях BPSK, QPSK используют сигнал с одной несущей. Системы с одной несущей для устойчивой работы требуют очень высокого значения величины Fade Margin. Например, для поддержки модуляции BPSK для любых систем теоретически достаточно SNR =3 dB. Системы WiMAX способны устойчиво работать на данной модуляции при SNR=4 dB ( Fade Margin =1 dB). Для системы с одной несущей для поддержки модуляции BPSK ( стандарт IEEE 802.11b/g ) требуемый уровень SNR для условий LOS составляет 19 dB ( fade margin 15 dB). В условиях оптической видимости ( частичное перекрытие зоны Френеля ) Near LOS требования к SNR для BWA систем в 2.4 ГГц достигают 25- 30 dB ( fade margin 20 dB). Фактически более высокие значения fade margin для систем 2.4 ГГц с одной несущей лишают эти системы всех преимуществ использования более низких частот. В результате системы BWA 2.4 ГГц имеют более низкие значения Link Budget ( на величину 15-25 dB), что приводит к существенно более низким дальностям связи. Фактически там, где система BWA 2.4 ГГц способна работать на модуляции BPSK, QPSK в канале шириной 20 МГц с реальной скоростью передачи данных до 3-4 Mbps и с максимальным радиусом обслуживания базовой станции (без использования усилителей ) до 8-10 км, система WiMAX способна работать на максимальной модуляции 64QAM . в канале шириной 10 МГц со скоростью передачи данных в 25 Mbps. Более

того , система WiMAX способна поддерживать данную скорость на дальности до 25 км.

Системы WiMAX фиксированного доступа имеют еще одно очень важное технологическое новшество, связанное с применением OFDM радиосигнала, никогда ранее до появления сетей WiMAX не использовавшееся. Речь идет о так называемой технологии sub-channelization, когда абонентские устройства могут использовать для канала связи Uplink не все доступные в канале поднесущие, а только некоторую часть из них. В частности минимальное количество поднесущих uplink канала связи составляет одну шестнадцатую часть полного набора поднесущих. При применении sub-channelization используемая часть поднесущих обеспечивает требуемую для абонента скорость передачи данных UL восходящего канала, требования по скорости к которой в типовых приложениях обычно ниже чем для DL нисходящего канала. При этом ширина UL канала становится значительно меньше ширины канала с полным набором поднесущих, что увеличивает энергетику UL канала максимально на 12 dB.

Для повышения дальности связи необходимо повышать энергетику как со стороны базовой станции так и со стороны абонента. Повышение выходной мощности базовой станции не является серьезной проблемой, а вот увеличение выходной мощности абонентского терминала имеет ограничения. Поэтому применение механизма sub-channelization, повышающего энергетику абонентского терминала, является одним из мощных инструментов, также позволяющих значительно увеличивать дальность связи систем WiMAX.

В целом, благодаря более высоким энергетическим параметрам система WiMAX при прочих равных условиях имеет в два- четыре раза большую дальность связи на одной и той же символьной скорости по сравнению с системами preWiMAX. А если учесть спектральную эффективность, то системы WiMAX обеспечивают более чем в два раза большую скорость передачи данных на дальности в два- четыре раза большей по сравнению с системами preWiMAX.

#### **1.4 Влияние интерференции на OFDM канал связи WiMAX**

В реальных системах помимо теплового и внутреннего шума приемника присутствует интерференция. Влияние интерференции приводит к деградации уровня чувствительности приемника. Чем выше уровень интерференции, тем на большую величину сигнал на входе приемника RSSL должен превышать уровень чувствительности приемника для поддержки соответствующей модуляции.

Экспериментально установлено, что если уровень интерференции  $I$  (спектральная плотность мощности) находится ниже уровня теплового шума  $N$  на величину в 6 dB, т.е  $I/N = -6$  dB, то эта интерференция не оказывает влияния на приемник системы.



Спектральная плотность теплового шума ( мощность шума в полосе 1 МГц) Power Spectral Density (PSD) приемника составляет  $N = 10 \log(kT_o) + N_f = -136 \text{ dB(W/MHz)}$ , где  $N_f = -8 \text{ dB}$ . Поэтому уровень интерференции  $I_{\text{FLOOR, BW=10}}$ , не оказывающей влияния на систему WiMAX, в канале связи шириной  $BW = 10 \text{ МГц}$ , равен:

$$I_{\text{FLOOR, BW=10}} = -136 + 30 + 10 \log(10) - 6 = -102 \text{ dBm};$$

В канале шириной 5 МГц данный уровень интерференции равен  $I_{\text{FLOOR, BW=10}} = -105 \text{ dBm}$ . Обратим внимание, что пороговый уровень интерференции

$I_{\text{FLOOR, BW=10}}$  зависит только от ширины канала связи и не зависит от частоты, на которой работает система. При этом пороговый уровень спектральной плотности мощности  $I_{\text{PSD FLOOR}}$  интерференции, измеряемый в  $\text{dBm/MHz}$ , не

зависит и от ширины канала. Уровень интерференции можно также оценивать на входе апертуры антенны величиной плотности потока мощности Power Spectral Flux Density (PSFD) интерференции  $I_{\text{PSFD}}$ ,

определяемой как:

$$I_{\text{PSFD FLOOR}} = I_{\text{PSD FLOOR}} - 10 \log(\lambda^2) - G + 10 \log(4\pi), \text{dB}[(\text{mW}/\text{m}^2)/\text{MHz}];$$

где  $I_{\text{PSD FLOOR}}$  - пороговый уровень плотности потока мощности интерференции на входе приемника,  $\text{dB}(\text{mW}/\text{MHz})$

$\lambda = 0,0535 \text{ м}$  длина волны на частоте 5.6 ГГц;  $G$  – коэффициент усиления антенны.

Пороговый уровень спектральной плотности потока мощности power flux spectral density (pfsd) зависит от частоты, на которой работает система. Обычно данный показатель используют при расчете допустимых норм излучения на рабочих местах и санитарных зон радиотехнических объектов.

Таким образом, система WiMAX способна поддерживать некоторую модуляцию с уровнем ошибок  $\text{BER} = 10E-6$  при уровне мощности сигнала равном чувствительности приемника для данной модуляции и уровне интерференции равном или ниже уровня шума на 6 dB.

При отсутствии интерференции чувствительность приемника на модуляции 64QAM . равна:

$$R_{\text{x 64QAM3/4}} = N + \text{SNR}_{\text{64QAM3/4}} + 10 \log(BW_{\text{ef}}) + \text{Implementation Loss, dBW} \quad (4);$$

то при  $I/N = -6 \text{ dB}$  и  $C = R_{\text{x 64QAM3/4}}$ ,  $\text{SNR}_{\text{64QAM3/4}} = 21 \text{ dB}$ , при Implementation Loss равном 0 dB:

$$C/I \geq C/N - I/N = R_{\text{x 64QAM3/4}}/N + 6 = \text{SNR}_{\text{64QAM3/4}} + 6 = 27 \text{ dB};$$

Тем самым, для системы WiMAX с высококачественным приемником (значение параметра Implementation Loss близком к нулю), требуемое отношение мощности сигнала к мощности интерференции, называемое также защитным отношением, имеет вид

$$C/I \geq C/N + 6, \text{ dB};$$

Для работы системы WiMAX в условиях интерференции на минимальном для поддержки модуляции 64QAM . с BER=10E-6 уровне сигнала, необходимо обеспечить  $C/N = SNR_{64QAM3/4} = 21 \text{ dB}$  , т.е :

$$C/I \geq 27 \text{ dB} ;$$

Тем самым, для системы WiMAX идеальным приемником ( потери реализации равны нулю) при выполнении критерия  $C/I \geq 27 \text{ dB}$  и минимально достаточном для поддержки модуляции 64QAM . уровне входного сигнала  $RSSL = R_{x \text{ 64QAM3/4}}$  , гарантируется, что интерференция находится ниже уровня теплового шума приемника на величину не менее 6 dB и независимо от типа интерференции практически не оказывает влияния на работу системы.

При превышении пороговой величины  $I/N = -6 \text{ dB}$  интерференция начинает влиять на работу системы. Степень негативного влияния зависит от типа сигнала интерференции (помехи). При оценке чувствительности приемника в качестве шума приемника рассматривается Гауссовский или “белый” шум. Реальный сигнал помехи по своей структуре, естественно, может быть другим и его влияние на работу системы может быть как сильнее, так и слабее влияния белого шума. Например, узкополосная помеха может оказывать незначительное влияние на широкополосный OFDM сигнал. Точная теоретическая оценка влияния различных типов помех на работу приемника системы является достаточно сложной задачей. Относительно точная теоретическая оценка взаимного влияния интерференции возможна для однотипного оборудования. При этом предполагается, что влияние интерференции от однотипного (также использующего широкополосный OFDM радиосигнал) с анализируемым оборудованием аналогично влиянию белого шума.

Влияние интерференции на систему заключается в снижении (деградации) уровня чувствительности приемника.

Чувствительность системы для модуляции 64QAM . в канале  $BW = 10 \text{ МГц}$  при  $\text{implementation loss} = 0 \text{ dB}$ ,  $N_f = 8 \text{ dB}$  согласно выражению (1) равна:

$$R_{x \text{ 64QAM3/4}} = -106 + SNR_{64QAM3/4} + 10 \log (BW_{ef}) = -75.4 = -75 \text{ dBm}$$

При  $I/N = -6 \text{ dB}$  деградация чувствительности приемника, представляющая собой разницу между  $C/N$  и  $C/(N+I)$ , не превышает 1 dB. То есть, при  $I/N = -6 \text{ dB}$  справедливо  $C/(N+I) = 1 + C/N$ .

На рис 9. приведена зависимость между отношением  $C/I$  сигнал/интерференция и мощностью сигнала  $C$ , требуемой для поддержки модуляции 64QAM . в канале шириной 10МГц.

Если интерференция равна или превышает уровень  $I/N = -6 \text{ dB}$  (точка А на рис.9), то для работы системы на некоторой модуляции необходимо, чтобы мощность полезного сигнала превышала деградировавший вследствие воздействия интерференции уровень чувствительности приемника системы для этой модуляции (точка С на рис 9). Соотношение между значением спектральной плотности мощности интерференции  $I$  и величиной деградации  $\delta$  уровня чувствительности имеет вид:

$$I = 10 \log (10\Delta/10^{-1}) + N, \text{ dB(W/MHz)};$$

При мощности интерференции  $I$  равной уровню шума приемника  $N$  и при допущении, что интерференция представляет собой белый шум или, как минимум, интерференция происходит от однотипной системы, деградация чувствительности равна  $3 \text{ dB}$ , т.е.  $C/(N+I) = 3 + C/N, \text{ dB}$  ( точка D на рис 9) . При мощности интерференции на  $10 \text{ dB}$  выше уровня теплового шума приемника ( $I/N=10 \text{ dB}$ ) деградация чувствительности равна  $9.5 \text{ dB}$ , т.е.  $C/(N+I) = 9.5 + C/N$ .

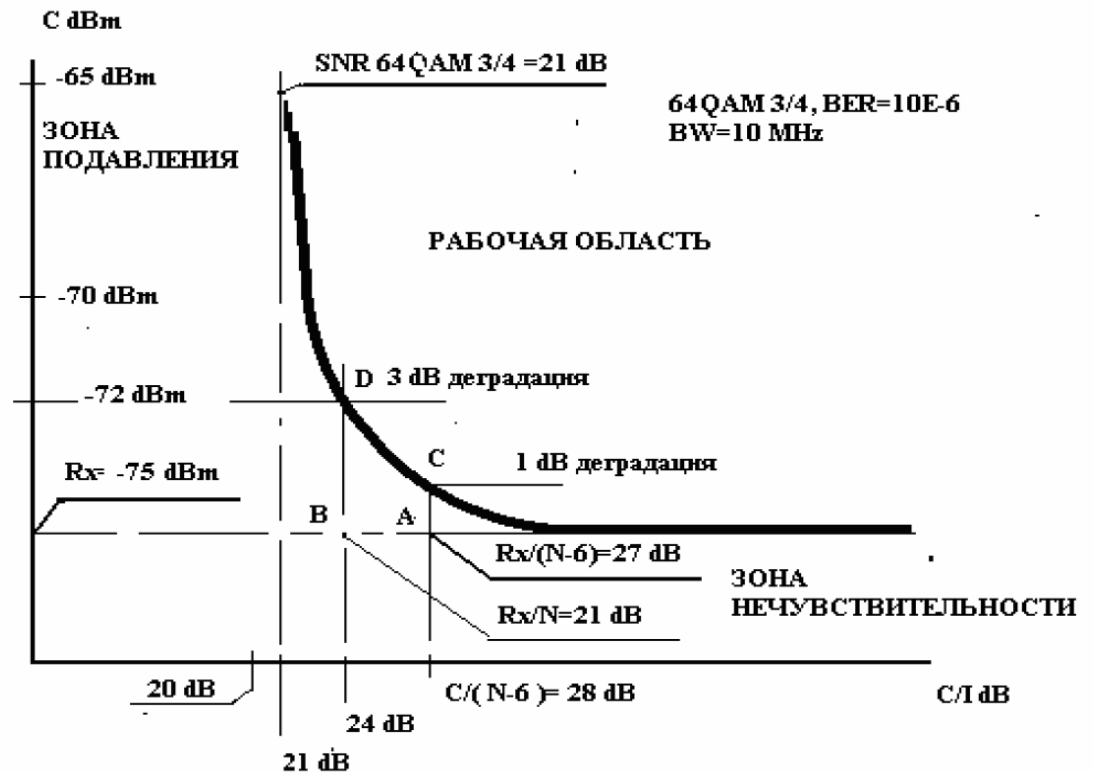


Рис 9. Зависимость между  $C/I$  и требуемой мощностью сигнала  $C$

Таким образом, при  $I=N$  необходимо, чтобы  $C/I \geq C/N + 3 \text{ dB}$ , при implementation loss =0. При мощности интерференции выше уровня шума на  $10 \text{ dB}$ , т.е  $I/N=10 \text{ dB}$ , необходимо, чтобы выполнялось отношение  $C/I \geq C/N - 9.5 + 10 = C/N + 0.5 \text{ dB}$ .

В пределе, при высоком уровне интерференции ( $I/N > 10 \text{ dB}$ ) и implementation loss близком к нулю, для работы системы на некотором типе модуляции, требующем соответствующий уровень  $C/N$ , необходимо:

$$C/I \geq C/N, \text{ dB};$$

Таким образом, для работы системы WiMAX в условиях высокой интерференции (при  $I/N > 10 \text{ dB}$ ) для поддержки модуляции 64QAM с  $BER=10E-6$  необходимо обеспечить уровень мощности сигнала, при котором выполняется:

$$C/I \geq C/N = \text{SNR}_{64\text{QAM}3/4} = 21 \text{ dB};$$

На рис.9 можно выделить три области- зону нечувствительности, зону подавления и рабочую область.

Зона нечувствительности охватывает область, где уровень мощности сигнала находится ниже порога чувствительности, и поэтому система не может поддерживать соответствующий тип модуляции с уровнем ошибок BER=10E-6.

Зона подавления охватывает уровень мощности сигнала выше порога чувствительности и левее кривой зависимости C от C/I, где интерференция подавляет работу системы на соответствующей модуляции вследствие недостаточно высокой мощности сигнала C.

Рабочая область охватывает уровень мощности сигнала выше порога чувствительности и правее кривой зависимости C от (C/I), где выполняется требуемое отношение C/I, и система может работать на соответствующей модуляции в условиях интерференции благодаря достаточно высокой мощности сигнала C.

WiMAX является системой с автоматической регулировкой мощности АTRC. На базовых станциях задается максимально возможный уровень входного сигнала RSSL ( RSSI). Для систем WiMAX с шириной канала 5 или 10 МГц данный уровень обычно устанавливается равным -65 ~ -68 dBm, превышающем чувствительность приемника для 64QAM . примерно на 5-10 dB.

Таким образом, для работы системы WiMAX на модуляции 64QAM . с BER=10-6 в условиях интерференции на максимальном уровне сигнала на входе приемника, превышающем уровень чувствительности на 10 dB и более, необходимо обеспечить:

$$C/I \geq 21 \text{ dB}$$

На рис. 10 приведены зависимость  $I_{MAX} = F(C/I)$  максимальной допустимой для поддержки модуляции 64QAM . в канале шириной 10МГц мощности интерференции  $I_{MAX}$  от текущего значения отношения сигнал/интерференция C/I, и зависимость  $C = F(C/I)$  мощности сигнала C, требуемой для поддержки модуляции 64QAM . в канале шириной 10МГц, от текущего значения отношения C/I сигнал/интерференция.

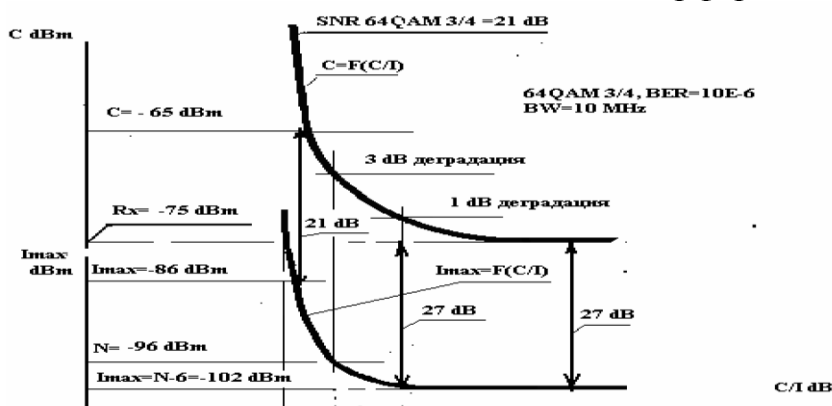


Рис 10 Зависимости  $I_{MAX} = F(C/I)$ ,  $C = F(C/I)$ .

Выполнение критерия  $C/I \geq 27$  dB необходимо для системы с идеальным приемником (потери реализации равны нулю) при минимально возможном, находящимся на границе чувствительности для 64QAM, и  $BW=10$  МГц уровне мощности сигнала  $C = R_x = -75$  dBm. При этом максимально допустимая мощность интерференции  $I_{MAX}$  должна быть на 6 dB ниже уровня теплового шума  $N$ , то есть пороговый уровень интерференции  $I_{FLOOR}$ , на котором деградация чувствительности идеального приемника не превышает 1 dB, равен  $I_{FLOOR} / N = -6$  dB. Например, в полосе  $BW=10$  МГц пороговый уровень интерференции составляет  $I_{FLOOR} = I_{MAX, BW=10} = N_{BW=10} - 6$  dB = -102 dBm, где  $N_{BW=10} = -96$  dBm - мощность теплового шума приемника системы в полосе  $BW=10$  МГц.

Отношение  $C/I \geq 27$  dB является критерием электромагнитной совместимости и применяется при расчете норм ЧТР при радиочастотном планировании.

При высоком уровне мощности сигнала  $C \geq R_x + 10$  dBm необходимо выполнения критерия  $C/I \geq 21$  dB. При мощности сигнала  $C = R_x + 10$  dBm максимально допустимая мощность интерференции, например, в полосе  $BW=10$  МГц составляет  $I_{MAX, BW=10} = N_{BW=10} + 10$  dB = -86 dBm.

Тем самым, система WiMAX может нормально работать на наивысшей модуляции 64QAM, в условиях интерференции  $I$  при выполнении  $C/I \geq 21 \sim 27$  dB в зависимости от уровня входного сигнала на входе приемника системы RSSL начиная от своего минимального уровня, близкому к чувствительности приемника для 64QAM, и заканчивая максимальным регулируемым АTRC уровнем, обычно превышающем чувствительность для модуляции 64QAM, на 5-10 dB.

Интерференция по разному влияет на различные хотя и однотипные системы. Известно, что системы с пониженной чувствительностью не только менее чувствительны к полезному сигналу, но также менее чувствительны (восприимчивы) к интерференции (помехе). В приведенной выше оценке влияния интерференции качество реализации системы WiMAX никак не учитывается. Более точно, данная оценка справедлива для систем с идеальным приемником с потерями реализации implementation loss близкими к нулю. Реальные системы обычно имеют отличные от нуля потери реализации, что уменьшает их чувствительность.

Современные приемники базовых станций WiMAX обычно имеют значение внутренних шумов приемника (noise figure) равное -5 ~ -6 dB. Потери реализации implementation loss реальной системы WiMAX можно рассчитать на основе разницы между максимальным теоретически возможным уровнем чувствительности для данной модуляции и ширины канала, и реальной чувствительностью приемника системы WiMAX при тех же условиях, приводимой в спецификациях на оборудование.

Теоретический максимально возможный уровень чувствительности, например, для модуляции 64QAM . в полосе BW=10 МГц согласно (1) при implementation loss=0 и noise figure =-5 dB равен -78.4 dBm и при implementation loss=0 и noise figure =-8 dB равен -75.4 dBm. Тем самым, например, потери реализации системы MAXBridge CPE 5.2 производства “Юнидата” составляют 5 dB (при условии noise figure -8 dB), что как для абонентского устройства очень даже неплохо. Потери реализации, например, базовой станции UNIDATA MAXBridge BS 50 ( noise figure = - 6 dB) равны 4 dB. Потери реализации, например, базовой станции Airspan MicroMAX ( noise figure = - 6 dB) также равны 4 dB.

Заметим, что максимально теоретически возможный уровень чувствительности систем WiMAX фиксированного доступа по версии стандарта IEEE 802.16-2004 отличается от значения аналогичного параметра в новой версии этого же стандарта IEEE 802.16e-2005 вследствие разных допущений о величине собственных шумов приемника и различиям в требованиях к SNR. Отметим также, что максимально возможный теоретический уровень чувствительности WiMAX рассчитывается без учета применения технологии разнесенного приема MIMO. Использование MIMO 2x2 повышает system gain системы и, соответственно, бюджет канала связи link budget примерно на 5 dB, но никак не чувствительность приемника системы. Тем не менее, можно встретить спецификации оборудования некоторых систем мобильного WiMAX, где увеличение system gain за счет применения MIMO приписывается увеличению чувствительности системы. Это приводит к тому, что приводимые уровни чувствительности системы могут быть, например, ниже теплового шума приемника, что невозможно ни теоретически, ни практически.

Стандарт IEEE 802.16e-2005 допускает величину потерь реализации системы WiMAX максимально до 5 dB.

Помимо потерь реализации при расчетах ЭМС реальных систем следует учитывать разницу между максимально допустимым по стандарту уровнем собственных шумов приемника noise figure = -8 dB и значением noise figure реальных систем, которое может не превышать значения в 4-5 dB. Далее при расчетах примем, что noise figure -8 dB.

Согласно выражению (1) потери реализации снижают чувствительность приемника, то есть для нормальной работы такой системы требуется более мощный радиосигнал. Потери реализации могут быть вызваны, например, повышенным фазовым шумом приемника. Фазовый шум мешает правильной демодуляции QAM сигнала в приемнике системы, что и требует повышения его мощности на входе приемника.

Таким образом, у системы с потерями реализации занижен (загрублен) уровень чувствительности на величину Implementation Loss и для ее нормальной работы требуется более высокий уровень мощности входного сигнала и, соответственно, фактически более высокое отношение C/N .

На рис 11. приведена зависимость между мощностью сигнала, требуемого для поддержки модуляции 64QAM . в канале шириной 10МГц с

учетом потерь реализации 5 dB и текущим значением отношения C/I сигнал/интерференция.

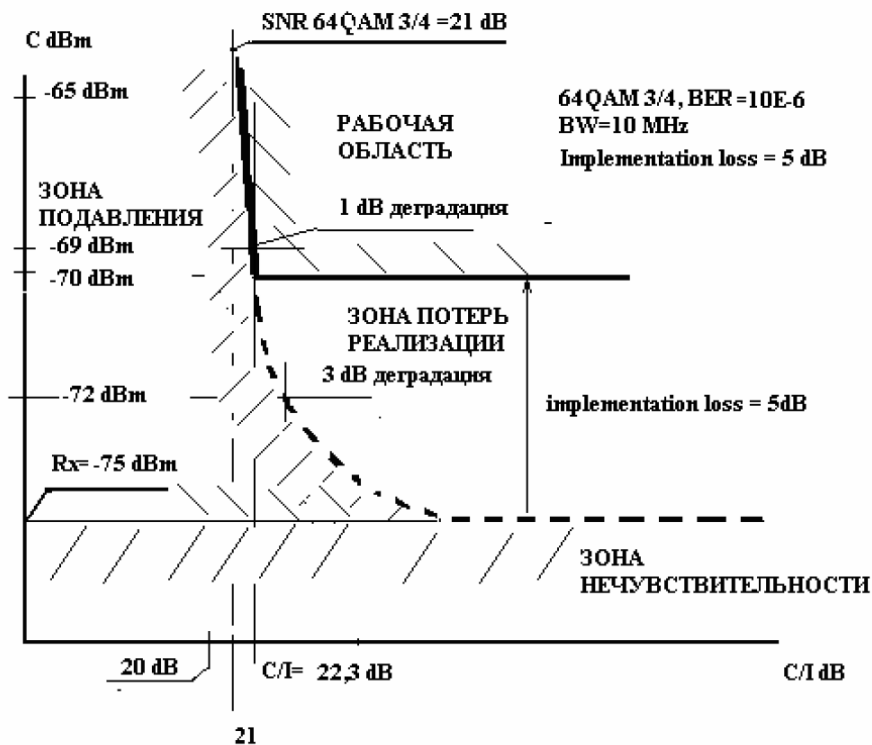


Рис. 11 Зависимость между требуемой мощностью сигнала C и значением отношения C/I с учетом потерь реализации.

Потери реализации уменьшают рабочую область, понижая согласно выражению (4) чувствительность системы на величину Implementation loss. Тем самым, интерференция, деградирующая чувствительность на величину, не превышающую пониженный вследствие потерь реализации уровень чувствительности плюс 1 dB, не влияет на приемник системы.

Для того, чтобы интерференция не оказывала влияния на систему с потерями реализации равными значению implementation loss, т.е. чувствительность этой системы была деградирована дополнительно не более чем на 1 dB, необходимо, чтобы значение отношения сигнал/ шум+ интерференция превышало значение требуемого для поддержки той или иной модуляции отношения сигнал/ шум на величину суммарного понижения чувствительности вследствие потерь реализации и вследствие интерференции  $\Delta = \text{implementation loss} + 1 \text{ dB}$ :

$$C/(N+I) = \text{implementation loss} + 1 + C/N = \Delta + C/N, \text{ dB} \quad (5);$$

Мощность интерференции  $I_{\text{MAX, BW}}$  в канале шириной BW, приводящей к суммарному понижению чувствительности на величину  $\Delta$ , согласно выражению (5) рассчитывается как  $I_{\text{MAX, BW}} = \log(10 \Delta / 10^{-1}) + N_{\text{BW}}$ , dBm, (6)

где  $I_{\text{MAX, BW}}$  - максимально допустимая мощность интерференции в канале шириной BW в dBm,

$N_{BW}$  – мощность теплового шума приемника системы в полосе шириной  $BW$  в dBm.

При, например, implementation loss =2 dB уровень чувствительности уже понижен на 2 dB, и интерференция с уровнем  $I=N$  приводит к дополнительной деградации чувствительности на 1 dB, и следовательно, не оказывает влияния на приемник системы.

Для систем с implementation loss равном 3 dB уровень максимально допустимой мощности интерференции равен  $I_{MAX}=1.8 + N = 2+N$ .

При максимальном значении implementation loss равном 5 dB выражение (5) имеет вид:

$$C/(N+I) = 6 + C/N, \text{ dB (7);}$$

Для выполнения равенства (7) мощность интерференции рассчитывает как:

$$I_{MAX} = 10 \log (106/10 - 1) + N = 4.7 + N = 5 + N, \text{ dBm;}$$

Деградация чувствительности системы с потерями реализации 5 dB не превышает 1 dB при мощности интерференции равной  $4.7+N$ , что, например, для работы системы на модуляции 64QAM в канале  $BW=10$  МГц требует отношения сигнал/интерференция  $C/I=C/(4.7 + C/N)= 22.3$  dB (см. рис 11).

Таким образом, интерференция, не превышающая более чем на 5 dB ( $I/N=5$  dB) уровень теплового шума системы WiMAX с максимально допустимым уровнем потерь реализации в 5 dB, приводит к деградации этой системы не более чем на 1 dB и поэтому практически не влияет на систему.

Учитывая, что мощность сигнала на входе приемника реальной системы для поддержки той или иной модуляции должна превышать уровень чувствительности на 3 dB (fade margin =3 dB), то для практического применения можно принять, что на приемник системы с потерями реализации равными implementation loss не оказывает влияния интерференция с мощностью меньше или равная пороговому уровню  $N+implementation\ loss, \text{ dBm}$  ( $I/N=implementation\ loss$ ). Погрешность такой аппроксимации примерно равна 1 dB.

Таким образом, вычислив потери реализации как разницу между максимально возможным уровнем чувствительности (при noise figure равном -8 dB) системы на модуляции  $M$  в канале шириной  $BW$  и реальной чувствительностью системы для этих же условий, можно рассчитать пороговый уровень интерференции  $I_{FLOOR, BW}$  в полосе канала шириной  $BW$ , как максимально возможный уровень интерференции, не приводящий к деградации чувствительности более 1 dB.

Например, пороговый уровень интерференции  $I_{FLOOR, BW=10}$  в виде “белого шума  $I=N+5$  dB ( $I/N= 5$  dB) , не оказывает влияния на систему WiMAX с потерями реализации 5 dB, в канале связи шириной 10 МГц, т.е

$$I_{FLOOR, BW=10} = N + 10 \log (10) + 5 = -106 + 10 \log (10) + 5 = -91 \text{ dBm}$$

Собственные шумы noise figure приемника реальных систем могут быть ниже величины -8dB и достигать значения -5 и даже -4 dB. При низком



уровне собственных шумов noise figure приемник системы имеет также более низкое значение теплового шума  $N$  и, соответственно, более низкий пороговый уровень интерференции  $I_{\text{FLOOR}}$ .

Если значение величины noise figure меньше -8 dB, и ее точное значение неизвестно ( не указано в спецификациях на оборудование), а измерить эту величину не представляется возможным, поскольку это требует специального оборудования, то для оценки максимально допустимого уровня интерференции можно воспользоваться следующей методикой.

Пороговый уровень интерференции  $I_{\text{FLOOR, BW}} = N + \text{implementation loss} + 10 \log(\text{BW})$  как максимально допустимый уровень мощности интерференции  $I_{\text{MAX, BW}}$ , не приводящий к деградации чувствительности больше 1 dB в полосе шириной BW для модуляции M, приблизительно (с погрешностью равной  $10 \log(\text{BW}_{\text{ef}}) - 10 \log(\text{BW})$ ) можно вычислить из выражения (4) следующим образом:

$$I_{\text{FLOOR, BW}} = N + \text{implementation loss} + 10 \log(\text{BW}) = N_{\text{BW}} + \text{impl. loss} = R_{xM} - \text{SNR}_M, \text{ dBm} \quad (8),$$

где  $R_{xM, \text{BW}}$  - чувствительность системы для модуляции M в канале шириной BW;

$N_{\text{BW}}$  - мощность теплового шума приемника в полосе BW.

Тем самым, при расчете максимально допустимого уровня интерференции, не приводящей к деградации чувствительности приемника системы больше чем 1 dB, величины потерь реализации и noise figure не используются и могут быть неизвестны.

Таким образом, для определения порогового уровня мощности интерференции  $I_{\text{FLOOR, BW}}$  не влияющей на систему WiMAX в полосе ширины канала BW (деградация чувствительности не превышает 1 dB), следует просто найти разницу между уровнем чувствительности для нужной ширины канала, например, для 64 QAM, BW=10 МГц и требуемым для модуляции 64 QAM значением  $\text{SNR}_{64\text{QAM}3/4} = 21 \text{ dB}$ . Например, для BW=10 МГц и  $R_{x64\text{QAM}3/4, \text{BW}=10} = -70 \text{ dBm}$  пороговый уровень интерференции  $I_{\text{FLOOR, BW}=10}$  равный максимальной мощности интерференции  $I_{\text{MAX, BW}=10}$  в канале шириной BW=10 МГц, приводящей к деградации реальной чувствительности системы на 1 dB, равен:

$$I_{\text{FLOOR, BW}=10} = R_{x64\text{QAM}3/4, \text{BW}=10} - \text{SNR}_{64\text{QAM}3/4} = -70 - 21 = -91 \text{ dBm}.$$

Тем самым, мы имеем очень простое правило определения порогового уровня интерференции  $I_{\text{FLOOR}}$  для системы с потерями реализации, заключающееся в получении разности значения чувствительности системы  $R_{xM}$  для некоторой модуляции M и требуемого для поддержки этой же модуляции значения сигнал/шум  $\text{SNR}_M$ :

$$I_{\text{FLOOR}} = R_{xM} - \text{SNR}_M, \text{ dBm}$$

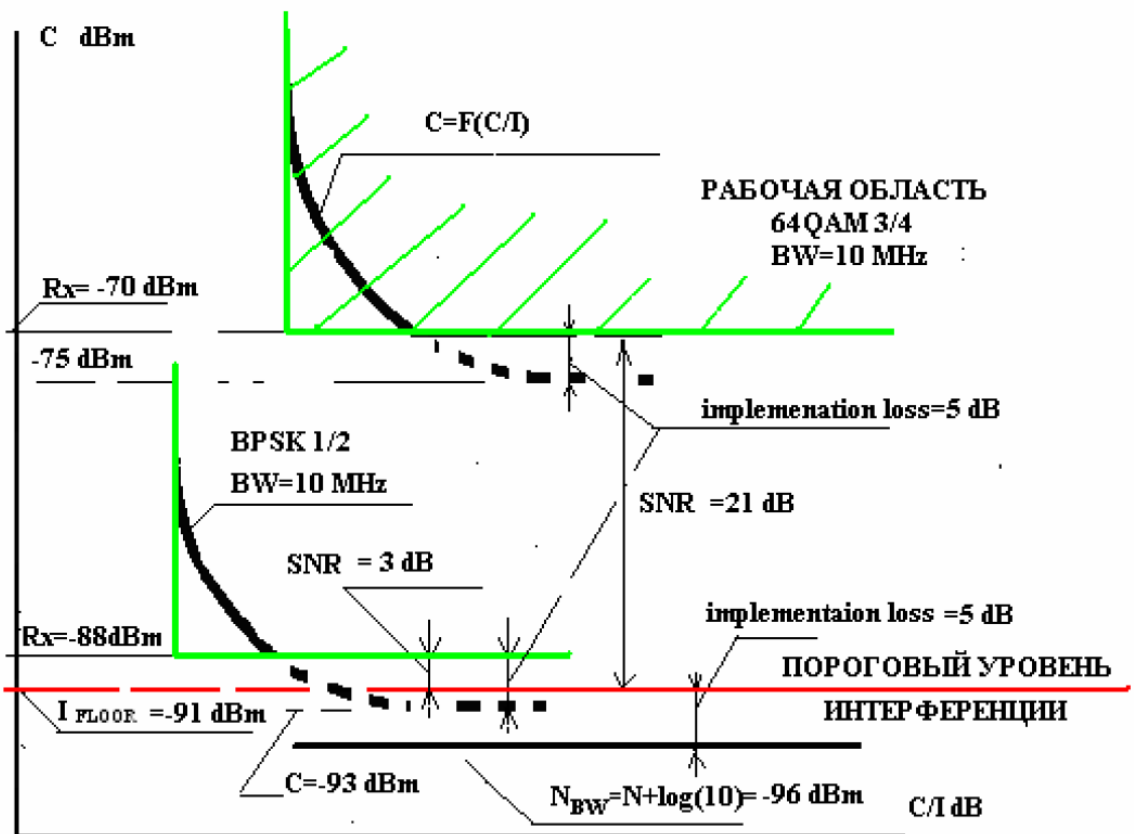


Рис.12 Пороговый уровень интерференции и рабочие области модуляций

Рабочая область для модуляции  $M$  и ширины канала  $BW$  для систем с потерями реализации представляет собой практически прямоугольную область, ограниченную уровнем  $N_{BW} + \text{implementation loss} + \text{SNR}_M$ , равным реальной чувствительности системы  $R_{xM}$ , и границей  $C/I = \text{SNR}_M$  (рис. 12).

Граница максимально допустимого уровня интерференции  $I_{\text{FLOOR}}$ , при которой деградация чувствительности не превышает 1 dB, одинакова (для систем WiMAX) для всех типов модуляции сигнала с одинаковой шириной канала, т.е. уровень интерференции на данном пороговом уровне одинаково влияет как на сигнал с модуляцией 64QAM, так и на сигнал с модуляцией BPSK с той же самой шириной канала (рис. 12).

Исходя из (8) требуемое для системы с потерями реализации отношение сигнал/интерференция  $C/I$  для поддержки модуляции, например, 64QAM, равно:

$$C/I \geq \text{SNR}_{64\text{QAM}3/4} = 21 \text{ dB}.$$

Таким образом, мы опять получили классический критерий  $C/I \geq \text{SNR}_M$  dB, выполнение которого требуется для поддержки некоторой модуляции  $M$ , одинаково справедливый как для системы с потерями реализации, так и для системы, работающей на высоком уровне входного сигнала (превышающий уровень чувствительности на 5-10 и более dB). Это логично, поскольку потери реализации заставляют работать систему на более высоких значениях мощности сигнала, что делает применимым правило  $C/I \geq \text{SNR}$ .

Мы имеем, казалось бы, парадоксальную ситуацию, когда чем хуже приемник системы, тем он более устойчив к воздействию мощной интерференции (помехи). Однако, здесь опять следует отметить, что система с потерями реализации требует для своей нормальной работы и более мощного уровня полезного сигнала на входе приемника. Понятно, что при одинаково высоких уровнях полезного сигнала система с потерями реализации и система без потерь абсолютно одинаково восприимчивы к интерференции. При низком уровне входного сигнала система с потерями реализации может вообще не работать, а система без потерь может нормально функционировать, хотя и страдать от интерференции. Данное обстоятельство в системах широкополосного беспроводного доступа было замечено еще давно, когда более мощные радиокарты с выходной мощностью  $T_x \text{ power} = 20 \text{ dBm}$ , но заниженной чувствительностью вследствие высоких потерь реализации, в условиях помех при определенных условиях работали лучше, чем более качественные радиокарты с меньшей мощностью  $15 \text{ dBm}$ , но более высокой чувствительностью с низкими потерями реализации. Причина этого явления заключается в том, что, например, мощность помехи может находиться ниже повышенного (вследствие высоких потерь реализации и пониженной чувствительности) порогового уровня интерференции  $I_{\text{FLOOR}}$  мощной радиокарты и тем самым не влиять на приемник этой радиокарты. В то же время другие менее мощные, но более чувствительные карты, могут страдать от этой же самой помехи, мощность которой может превышать более низкий (вследствие низких потерь реализации и повышенной чувствительности) пороговый уровень  $I_{\text{FLOOR}}$  этой радиокарты. При этом мощности более чувствительной карты может не хватать, чтобы вывести отношение  $C$  и  $C/I$  в рабочую область и, тем самым, побороть негативное влияние такой помехи.

Таким образом, пороговый уровень интерференции  $I_{\text{FLOOR,BW}}$  для модуляции  $M$  в канале шириной  $BW$ , на котором деградация чувствительности не превышает  $1 \text{ dB}$ , для систем с потерями реализации  $5 \text{ dB}$  по стандарту IEEE 802.16 составляет величину  $I_{\text{FLOOR,BW}} = R_{xM,BW} - \text{SNR}_M$ .

Пороговый уровень интерференции  $I_{\text{FLOOR,BW}}$  для модуляции  $M$  в канале шириной  $BW$ , на котором деградация чувствительности не превышает  $1 \text{ dB}$ , для систем с потерями реализации близкими к нулю составляет величину  $I_{\text{FLOOR,BW}} = R_{xM,BW} - \text{SNR}_M - 6 = N_{BW} - 6 \text{ dB}$ .

Например, для модуляции 64QAM и канала шириной  $BW=10 \text{ МГц}$  пороговый уровень интерференции  $I_{\text{FLOOR}}$  для системы IEEE 802.16-2004 (потери реализации  $5 \text{ dB}$ , noise figure  $-8 \text{ dB}$ ) составляет:

$$R_{x, 64\text{QAM } 3/4, 10} - \text{SNR}_{64\text{QAM}} = -70 - 21 = -91 \text{ dBm};$$

Для системы с потерями реализации близкими к нулю и величиной noise figure  $-8 \text{ dB}$  ( по стандарту IEEE 802.16 -2004 ) пороговый уровень

интерференции  $I_{\text{FLOOR}}$  для модуляции 64QAM и канала шириной  $BW=10\text{МГц}$  составляет:

$$I_{\text{FLOOR}} = N_{\text{BW}} - 6 = 96 - 6 = -102 \text{ dBm};$$

Для идеальной системы WiMAX с потерями реализации близкими к нулю и величиной noise figure  $-4 \text{ dB}$  пороговый уровень интерференции  $I_{\text{FLOOR}}$  для модуляции 64QAM и канала шириной  $BW=10\text{МГц}$  составляет:

$$I_{\text{FLOOR}} = N_{\text{BW}} - 6 = N + 10\log(10) - 6 = -106 \text{ dBm};$$

где,  $N = 10 \log(kT_o) + N_f = -140 \text{ dB(W/MHz)}$  - спектральная плотность мощности теплового шума приемника при  $N_f = -4 \text{ dB}$ ;  $kT_o$  - закон равномерного распределения.

Таким образом, максимально допустимый уровень интерференции, не оказывающий влияния на систему WiMAX, весьма существенно зависит от качественных параметров ее приемника. Чем более качественная система, тем больше она подвержена интерференции и, в то же время, тем больше она имеет возможностей для предотвращения ее негативного влияния.

### **1.5 Поддержка системой WiMAX адаптивной модуляции в условиях интерференции**

На практике непосредственно измерить значение отношения  $C/I$  без учета шума приемника  $N$ , невозможно. В реальных системах WiMAX оценивается отношение сигнал к шуму плюс интерференция  $C/(N+I)$ , обозначаемое как SINR (Signal to interference plus noise ratio) или CINR (Carrier to interference plus noise ratio). Система WiMAX вычисляет уровень  $\text{CINR} = C/(N+I)$  на основе анализа уровня ошибок при демодуляции радиосигнала.

Как было показано выше, для поддержки системой некоторой модуляции  $M$  в условиях интерференции мощность сигнала должна превышать деградировавший уровень чувствительности для этой модуляции. Это соответствует тому, что измеренное значение CINR, равное текущему значению  $C/(N+I)$  учетом интерференции, для поддержки некоторой модуляции  $M$  должно быть равным или превышать уровень  $\text{SNR}_M$ , требуемый для поддержки данной модуляции при отсутствии интерференции. Например, для поддержки системой WiMAX модуляции 64QAM необходимо, чтобы измеренное значение CINR было равно:

$$\text{CINR} \geq \text{SNR}_{64\text{QAM}3/4} = 21 \text{ dB}$$

Выбор текущей рабочей модуляции система WiMAX проводит путем перебора всех возможных типов модуляций начиная с самой низшей BPSK или QPSK с измерением величины CINR и ее сравнением с требуем уровнем SNR для текущей проверяемой модуляции. Наивысшая модуляция  $M$ , на которой будет выполняться критерий  $\text{CINR} \geq \text{SNR}_M$ , устанавливается системой в качестве рабочей модуляции.

Некоторые системы WiMAX в процессе измерения CINR и выбора рабочей модуляции также вычисляют текущее значение отношения сигнала к

шуму  $C/N$  (обозначаемое как SNR) без учета интерференции. Значение SNR может быть получено на основе оценки уровня мощности полезного (без интерференции) входного сигнала RSSI (Receive Strength Signal Indicator), получаемого путем усреднения измеренных значений уровня мощности каждой поднесущей в полосе пропускания приемника системы. В этом случае, исходя из выражения (4), при известном implementation loss значение SNR можно вычислить как :

$$\text{SNR} = \text{RSSI} - N - \text{implementation loss, dB}$$

Чем ниже уровень интерференции  $I$ , тем ближе текущие измеряемые значения SNR и CINR. При уровне интерференции  $I/N \ll -6$  dB (при implementation loss = 0) измеряемое значение CINR = SNR. При  $I/N = -6$ , значение CINR = SNR + 1 (при implementation loss = 0). При высоком уровне интерференции разница между текущими значениями CINR и SNR может достигать 10 dB. т.е CINR = SNR + 10 dB. Таким образом, разница в значениях измеряемых величин CINR и SNR дает представление о величине интерференции, воздействующей на систему.

Обычно базовую станцию WiMAX настраивают на работу в условиях отсутствия или низкого уровня интерференции, задавая максимальный уровень мощности входного сигнала, превышающим чувствительность  $R_{x64QAM3/4}$  на 5-10 dB, что для систем с шириной канала 10 МГц составляет порядка -65 ~ -68 dBm. Система WiMAX способна работать на модуляции 64QAM. при CINR  $\geq 21$  dB. Запас по замираниям fade margin для CINR обычно выбирается для стабильной работы 3 dB. Порог переключения на более низкую модуляцию, например, 64QAM 2/3 может составлять 1 dB. Верхний и нижний пороги переключения модуляций образуют так называемый гистерезис. Тем самым, система WiMAX может быть стандартно настроена таким образом, что при достижении, например, CINR = 23 dB включается модуляция 64QAM, которая меняется на модуляцию 64QAM 2/3 при снижении уровня CINR ниже 20 dB.

Если измеряемый уровень CINR меньше 20 dB при, например, RSSI = -70 dBm и чувствительности для 64QAM, например -74 dBm, то это свидетельствует о наличии достаточно высокой интерференции. В этом случае, если снизить уровень мощности интерференции невозможно или затруднительно, то для работы системы на базовой станции может быть повышен максимальный уровень входного сигнала до -65 и даже до -60 dBm.

Измеренное значение CINR дает точную оценку отношения  $C/(N+I)$  независимо от типа и структуры сигнала интерференции, при условии, если, конечно, система WiMAX адекватно измеряет (вычисляет) CINR. Для измерения CINR может быть использован пилот сигнал, преамбула, или весь пакет данных (burst). Обычно каждая система WiMAX реализует свой собственный механизм оценки текущего CINR, поскольку стандарт IEEE 802.16 не содержит требований к способу его реализации. Следует отметить, что правильность измерения системой WiMAX текущего значения CINR определяет обоснованность выбора рабочей модуляции, от чего во многом

зависят качественные характеристики канала связи. Тем самым, одним из важнейших параметров эффективности и совершенства той или иной системы WiMAX является адекватность измерения CINR в различных условиях, например, при работе вне прямой видимости, наличии большого количества переотражений радиосигнала, в условиях присутствия высокого уровня интерференции различных типов.

Для оценки адекватности измерения системой величины CINR, SNR, а также в какой то мере и качества реализации приемника WiMAX, представляет интерес анализ показателя, равного разности измеренных значений RSSI и SNR (CINR при отсутствии интерференции). Аналогично выражению (4) при отсутствии интерференции выполняется:

$$\text{RSSI} - \text{CINR} = N + 10 \log (BW_{\text{ef}}) + \text{Implementation Loss, dBm} \quad (9)$$

Например, для канала шириной  $BW=10$  МГц,  $\text{Implementation Loss} = 0$ ,  $N=108$  dB(mW/MHz) при noise figure  $N_f = -6$  dB выражение (9) имеет вид:

$$\text{RSSI-CINR} = -108 + 10.5 = -97.5 = 98 \text{ dBm}$$

При  $N_f = -8$  dB,  $N=106$  dB(mW/MHz) и максимально допустимой величине  $\text{Implementation Loss}=5$  dB

$$\text{RSSI-CINR} = -106 + 10.5 + 5 = -91 \text{ dBm}$$

Таким образом, значение показателя RSSI-CINR в полосе 10 МГц для типовой системы WiMAX при отсутствии интерференции должно находиться в пределах

$$-91 \text{ dBm} = \text{RSSI-CINR} = -98 \text{ dBm} \quad (10)$$

Следует отметить, что допустимая стандартом IEEE 802.16 погрешность измерений RSSI составляет 4 dB и CINR - 2 dB.

Максимально достижимое при отсутствии интерференции значение показателя  $\text{RSSI-CINR} = -98$  dBm для канала связи шириной  $BW=10$  МГц соответствует идеальной реализации приемника базовой станции с типичным для реальных систем уровнем собственного шума не выше  $N_f = -6$  dB,  $\text{Implementation Loss} = 0$  и отсутствии погрешности измерений RSSI, CINR. Чем ближе значение показателя RSSI-CINR к величине  $-98$  dBm в полосе 10 МГц при отсутствии интерференции, тем более качественная реализация системы WiMAX и адекватное измерение CINR.

Обычно высокая точность измерения RSSI и CINR необходима на базовой станции в uplink (UL) канале, поскольку от этого зависит точность установки базовой станцией выходной мощности  $T_x$  абонентского устройства в процессе процедуры ранжирования ranging. Погрешность же измерений CINR в downlink (DL) канале в абонентском устройстве может быть значительно выше допустимых пределов при высоком уровне RSSI. Дело в том, что DL канал не подвергается автоматической регулировке усиления, и для системы не имеет значение точность измерения CINR в DL канале при его значениях свыше 25 dB. Поэтому CINR в DL канале системы WiMAX обычно редко превышает значений 28-32 dB при каком угодно высоком уровне входного сигнала RSSI. Тем самым, при высоком уровне  $\text{RSSI} > -65$  dBm в DL канале на абонентском терминале выражение (10)

может не давать объективную оценку качества приемника системы. При  $RSSI < -65$  dBm и  $CINR < 25$  dB выражение (10) применимо и позволяет более объективно судить о качестве реализации приемника также абонентского WiMAX терминала.

В Таблице 2 приведен фрагмент показаний статистики подключений базовой станций Airspan MicroMAX стандарта IEEE 802.16-2204 (WiMAX) в диапазоне частот 5.6 Гц, BW=10 МГц.

Таблица 2. Параметры подключения абонентских терминалов к базовой станции WiMAX Airspan MicroMAX, частота 5590 МГц, ширина канала связи 10 МГц

range	ssan	bsrssi	bscincr	dlmod	ssrssi	sscincr	ulmod
42343	28	-81.04	12.65	16QAM 1/2	-79.00	20.20	QPSK 3/4
13259	26	-74.29	19.09	16QAM 3/4	-75.30	22.90	16QAM 3/4
27065	28	-75.89	19.86	64QAM 3/4	-74.90	27.60	16QAM 3/4
12713	17	-78.77	19.16	64QAM 2/3	-76.60	26.30	16QAM 3/4
1734	28	-68.64	24.15	64QAM 3/4	-56.70	31.10	16QAM 3/4

Параметры RSSI и CINR канала UL на базовой станции соответствуют показаниям bsrssi и bscincr, для канала DL на абонентских терминалах, соответственно, ssrssi и sscincr в dBm. Параметр range задает дальность связи в метрах.

На дальности 27.065 км терминал подключен на модуляции DL 64QAM и UL 16QAM, что, между прочим, дает производительность канала в BW=10 МГц порядка 25-30 Mbps. Величина RSSI-CINR для UL канала равна  $bsrssi - bscincr = -75.89 - 19.86 = -95.75$  dBm. Значения показателя  $bsrssi - bscincr$  по другим абонентским каналам также находится в пределах  $-93 \sim -98$  dBm, что свидетельствует о высоком качестве реализации приемника базовой станции.

Значения показателя  $ssrssi - sscincr$  для DL канала на абонентских терминалах для случаев когда  $CINR < 25$  dB и  $RSSI < -65$  dBm также находится в пределах  $-97 \sim -99$  dBm, что также свидетельствует о высоком качестве приемника абонентских терминалов.

На практике точность измерения мощности входного сигнала RSSI можно оценить путем сравнения Link Budget бюджета каналов UL и DL, которые должны совпадать. Уровень мощности  $RSSL_{DL SS}$  канала DL на абонентском устройстве может быть рассчитан как:

$$RSSL_{DL SS} = T_{XBS} + G_{BS} + G_{SS} - L_{BS} - L_{SS} - L_D, \text{ dBm};$$

где  $T_{XBS}$  - выходная мощность передатчика базовой станции BS, dBm

$G_{BS}$  – коэффициент усиления антенны передатчика базовой станции BS, dBi;  $G_{SS}$  – коэффициент усиления антенны абонентского устройства SS, dBi;  $L_{BS}, L_{SS}$  – СВЧ потери мощности сигнала, соответственно, на базовой станции и абонентском устройстве, в кабеле, разъемах и др.

$L_D$  – потери в dB на пути распространения радиоволн на дальность D км.

Соответственно, уровень мощности  $RSSL_{UL SS}$  канала UL на базовой станции может быть рассчитан как:

$$RSSL_{UL SS} = T_{X SS} + G_{SS} + G_{BS} - L_{BS} - L_{SS} - L_D, \text{ dBm};$$

где  $T_{X BS}$  – выходная мощность передатчика абонентского устройства SS, dBm, назначается базовой станцией в процессе ранжирования ranging.

$G_{BS}$  – коэффициент усиления антенны передатчика базовой станции BS, dBi;

$G_{SS}$  – коэффициент усиления антенны абонентского устройства SS, dBi;

$L_{BS}, L_{SS}$  – СВЧ потери мощности сигнала, соответственно, на базовой станции и абонентском устройстве, в кабеле, разъемах и др.

$L_D$  – потери в dB на пути распространения радиоволн на дальность D км.

Поскольку потери на пути распространения радиоволн на дальность D км в UL и DL канале в условиях LOS должны совпадать, то должно выполняться:

$$T_{X BS} + G_{BS} + G_{SS} - L_{BS} - L_{SS} - RSSL_{DL SS} = T_{X SS} + G_{SS} + G_{BS} - L_{BS} - L_{SS} - RSSL_{UL SS}, \text{ dBm};$$

$$T_{X BS} - RSSL_{DL SS} = T_{X SS} - RSSL_{UL SS},$$

Таким образом, при точном измерении системой уровня RSSI, при отсутствии систематической ошибки измерения на базовой станции и абонентском устройстве, в условиях LOS должно выполняться равенство:

$$T_{X BS} - RSSI_{DL SS} = T_{X SS} - RSSI_{UL SS}, \text{ dBm}; \quad (11)$$

где  $RSSI_{DL SS}, RSSI_{UL SS}$  – измеряемые значения расчетных величин  $RSSL_{DL SS}, RSSL_{UL SS}$

Поскольку на базовых станциях и абонентских терминалах обычно используются различные радиотрансиверы и WiMAX чипсеты, то можно принять, что при измерениях RSSI в DL и UL каналах систематическая погрешность отсутствует.

Согласно выражению (11) при точном измерении системой уровней входного сигнала потери мощности сигнала в UL и DL каналах при LOS должны быть симметричны.

Рассчитаем потери мощности сигнала в UL и DL каналах на примере работы системы Airspan MicroMAX 5 ГГц (Таблица 2). Условия LOS, выходная мощность базовой станции  $T_{X BS} = 22 \text{ dBm}$ , максимальная выходная мощность абонентского устройства  $T_{X SS} = 20 \text{ dBm}$ , которая на невысоких



дальностях может быть понижена со стороны базовой станции в процессе начальной и периодической процедурах ранжирования.

На дальности 42 км выходная мощность абонентского устройства максимальна  $T_{X SS} = 20$  dBm и потери мощности сигнала в DL и UL каналах согласно (9) составляют:

$$T_{X BS} - \text{RSSI}_{DL SS} = 22 \text{ dBm} + 79 \text{ dBm} = 101 \text{ dBm};$$

$$T_{X SS} - \text{RSSI}_{UL S} = 20 \text{ dBm} + 81.04 \text{ dBm} = 101 \text{ dBm};$$

На дальности 12 км  $T_{X SS}$  также равно 20 dBm и потери мощности равны:

$$T_{X BS} - \text{RSSI}_{DL SS} = 22 \text{ dBm} + 76.6 \text{ dBm} = 98.6 \text{ dBm}$$

$$T_{X SS} - \text{RSSI}_{UL SS} = 20 \text{ dBm} + 78.77 \text{ dBm} = 98.77 \text{ dBm};$$

На дальности 1.7 км базовая станция понижает выходную мощность  $T_{X SS}$  до 10 dBm и потери мощности равны:

$$T_{X BS} - \text{RSSI}_{DL SS} = 22 \text{ dBm} + 56.7 \text{ dBm} = 78.7 \text{ dBm}$$

$$T_{X SS} - \text{RSSI}_{UL SS} = 10 \text{ dBm} + 68.64 \text{ dBm} = 78.64 \text{ dBm}$$

Как мы видим, система MicroMAX достаточно точно измеряет входную мощность сигнала как на базовой станции, так и на абонентском терминале.

На практике оценка симметричности DL и UL канала проводится не столько с целью оценки точности измерения системой уровней RSSI, а сколько для анализа правильности установки и настройки оборудования базовой станции и абонентских терминалов. Если при установлении связи наблюдается значительная асимметричность потерь в DL и UL каналах, то это свидетельствует об отсутствии LOS, или, например, о неполадках в антенно-фидерном тракте, если имеются условия LOS.

Важным отличием систем WiMAX от preWiMAX является способ измерения CINR, SNR, реализуемой системой в процессе ее работы. Система WiMAX измеряет CINR в том числе с учетом количества принятых ошибочных символов и на основе анализа полученного уровня CINR выбирает тип поддерживаемой модуляции. Системы preWiMAX вообще могут не проводить оценку SNR, а тем более CINR, а выбор типа модуляции проводить на основе анализа уровня входного сигнала RSSI (RSSI) и в лучшем случае ошибок на MAC уровне системы. Также может проводиться оценка уровня шума (интерференции) на основе измерения уровня мощности сигналов, не распознанных демодулятором приемника, и даваться весьма приблизительная оценка результирующего  $C/(N+I)$ . Тем самым, для preWiMAX систем возможна ситуация, когда индикаторы показывает хороший уровень входного сигнала RSSI и SNR, но в радиоканале вследствие воздействия помех имеется высокий уровень ошибок. Такая ситуация в системах WiMAX при условии точного измерения CINR принципиально невозможна. Качественная система WiMAX всегда адекватно реагирует на высокий уровень интерференции путем понижения уровня модуляции на основе анализа получаемого значения CINR и не допускает увеличение ошибок в радиоканале свыше требуемой величины.

При оценке дальности связи в условиях интерференции выражение (3) расчета мощности входного сигнала RSSL трансформируется в выражение расчета требуемого уровня  $C/(N+I)$  или  $C/I$  отношения сигнал /интерференция.

Следует отметить, что влияние интерференции любого типа на OFDM сигнал с небольшим количеством поднесущих, а также на сигнал с одной несущей, в общем случае, носит более деструктивный характер, чем на сигнал с большим количеством поднесущих. Это выражается в том, что уровень  $C/(N+I)$ , требуемый для работы, например, 64QAM . в условиях сильной интерференции для сигнала с меньшим количеством поднесущих (preWiMAX) может быть значительно больше требуемого уровня  $C/(N+I)$  для сигнала с большим количеством поднесущих (WiMAX). Это дает дополнительный запас по энергетике сигнала системам WiMAX при работе в условиях интерференции и увеличивает максимальную дальность связи.