

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
03110, м. Київ, вул. Солом'янська, 7**

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БРЕСЛАВСЬКИЙ ВЛАДИСЛАВ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 621.396.96

**ДИСЕРТАЦІЯ
МОДЕЛІ ТА МЕТОДИКИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
ФУНКЦІОНУВАННЯ САМООРГАНІЗОВАНИХ РАДІОМЕРЕЖ**

Спеціальність 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Викорстання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ В.О. Бреславський

(підпис)

Науковий керівник Заїка Віктор Федорович доктор технічних наук,
професор

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Бреславський В.О. Моделі та методики підвищення ефективності функціонування самоорганізованих радіомереж. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі). – Державний університет телекомунікацій, Київ, 2021.

На сьогодні основним завданням урядів країн всього світу є суттєве збільшення частки електронних інформаційних ресурсів у загальному інформаційному просторі. Водночас, варто зазначити, що ключовим завданням Уряду та відповідних державних установ завжди було і є оперативне забезпечення доступу до інформації та знань усіх категорій користувачів. На сьогоднішній день доступ до інформації в загальній світовій мережі Інтернет та відповідних державних сервісів є однією з головних потреб громадян, оскільки виконувати дистанційну роботу, навчання, отримувати доступ до комунальних установ є життєво важливим фактором. Рівень доступу громадян до інформаційних ресурсів відповідає рівню розвитку країни.

На теперішній час велика кількість досвідчених фахівців галузі акцентували свої наукові праці на загальних аспектах та методах підвищення зв'язності, пропускну здатності та живучості радіомереж, які розглядаються окремо із різних математичних та технічних напрямків. Наприклад, найбільш великий внесок у теорію підвищення ефективності функціонування радіомереж та пропускну здатності внесли: Н. Бандурко, В. Толубко, Л. Беркман. Живучості радіосистем: В. Заїка, К. Строчак. Зв'язності радіозасобів: О. Головін, А. Тяжев, Н. Бугой, В. Плаксієнко, Ю. Хлапонін.

У зазначених роботах акцентовано увагу на загальних аспектах та методах підвищення зв'язності, пропускну здатності та живучості радіомереж, які розглядаються окремо із різних математичних та технічних напрямків.

Але, зазначені радіомережі внаслідок невеликої розповсюженості мають такі недоліки як: часткова втрата інформаційного контенту під час зміни

топології вузлів передачі даних, обмежена пропускна здатність та кількість абонентів мережі що потребує збільшення кількості вузлів та підвищення рівня потужності сигналу. Крім того, недоліками роботи існуючих систем - прототипів самоорганізованих радіомереж є неможливість забезпечення сучасних вимог до якості обслуговування внаслідок необхідності ретрансляцій, мінливості пропускної здатності радіоканалу, її залежності від відстані між рухомими радіозасобами, потужності передачі, кількості сусідніх радіовузлів і рівня створюваного ними трафіку і т.д. Останнім часом у відкритих зарубіжних наукових джерелах велика увага приділяється питанням застосування радіозасобів на основі технології програмно-конфігурованого радіо для самоорганізованих мереж.

В дисертаційній роботі розглянути методи та методики підвищення ефективності функціонування самоорганізованих мереж нової генерації.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному.

Виявлено вплив умов поширення радіохвиль на показники зв'язності радіозасобів на основі технології SDR, зокрема, встановлено, що повільні завмирання зменшують, а швидкі завмирання збільшують ймовірність «ізоляції» радіозасобів.

Сформульована задача оцінки пропускної здатності радіозасобів на основі технології SDR самоорганізованої мережі, яка визначається ймовірністю якісного забезпечення зв'язку і ймовірністю успішного радіоприйому при апріорно невідомому територіальному розподілі радіовузлів з урахуванням середніх втрат поширення і завмирань.

Запропоновано алгоритм оцінки пропускної здатності самоорганізованої мережі з радіозасобами технології SDR, який дозволяє оцінити чинники, що її визначають, окремо і, таким чином, визначити шляхи підвищення пропускної спроможності мережі з програмно-конфігурованими радіозасобами.

Визначено пропускну здатність широкосмугової мережі та запропоновано її статистична модель для багатопроменевого радіоканалу зв'язку зі статистикою впливу одночасно швидких і повільних завмирань.

Запропоновано модель оцінки живучості самоорганізуючої бездротової мережі із радіозасобами технології SDR, який дозволяє оцінити чинники, що її визначають, окремо і, таким чином, визначити шляхи підвищення живучості мережі з програмно-конфігурованими радіозасобами.

Удосконалено методику розрахунку мобільності самоорганізованої бездротової мережі, яка розроблена на основі нового системного критерію мобільності, який на відміну від існуючих моделей враховує динаміку змін пропускну здатності з обсягом переданих даних

Удосконалено методику оцінки зв'язності радіозасобів на основі технології SDR самоорганізованої мережі нової генерації. Самоорганізовані мережі (COM), на відміну від проводових і стільникових мереж, не мають можливості управляти потоками даних через базові станції (точки доступу) внаслідок їх відсутності.

В дисертаційній роботі було здійснено розрахунок зв'язаності, а також створено математичну модель оцінки необхідної щільності радіовузлів мережі, яка дозволяє визначити кількість радіозасобів COM (N) як функцію дальності радіозв'язку R і площі території COM S.

Вдосконалено алгоритм маршрутизації самоорганізованих радіомереж.

Усе вищезазначене зумовлює актуальність теми дисертаційної роботи, спрямованої на розв'язання наукового завдання розробки моделей та методів побудови системи самоорганізованих радіомереж. Ці нагальні проблеми досліджуються для найбільш ефективної їх реалізації в телекомунікаційних мережах України.

Дисертаційна робота, в тому числі виконувалась в рамках держбюджетної науково-дослідної теми «Розробка надвисокошвидкісної бездротової мережі backhaul з гігабітними каналами із можливістю використання неліцензійного терагерцового діапазону» (2016-2017 р.р.), (ДР № 0116U004698) та у відповідності до науково-дослідних тематик, які проводилися на замовлення ДП «Український державний центр радіочастот» і результати проведення дослідження яких відображені у звіті НДР «Методика з виконання вимірювання

параметрів якості послуг фіксованого телефонного зв'язку методом випробування на реальному трафіку» (ДР № 0116U004698) - 2014 р.

Обраний напрям досліджень відповідає тематиці науково-дослідних робіт Державного університету телекомунікацій, що проводилися протягом 2014-2016 р.р., а саме: «Система широкосмугового радіодоступу на базі вітчизняних розробок» (ДР № 0114U002178), «Дослідження каналу радіозв'язку в нижній частині терагерцового діапазону при швидкості передачі більше 1 Гбіт/с» (ДР № 0114U002179), «Бездротова система передачі даних в НВЧ діапазоні» (ДР № Oil 4U002180), «Статистична оцінка електромагнітної сумісності мереж бездротового зв'язку нового покоління» (ДР № 0114U002181), Українського науково-дослідного інституту зв'язку, що проводилися протягом 2008-2015 р.р., а саме: «Розробка рекомендацій з питань конвергенції рухомого та фіксованого зв'язку (FMC)», (ДР № 0113U005218).

Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі Державного університету телекомунікацій. Впровадження результатів досліджень підтверджуються відповідними актами. Питання, розглянуті та розроблені в дисертаційній роботі, відповідають основним завданням та напрямам створення сучасної інформаційної інфраструктури України.

Ключові слова: самоорганізовані радіомережі, зв'язаність, пропускна здатність, живучість вузлів передачі, ефективність функціонування, маршрутизація.

ABSTRACT

Nowadays one the main targets of all the countries across the globe is to significantly increase the share of electronic information resources in the common information space. At the same time, it should be noted that the prompt access to information and knowledge for all user categories has always been and remains the key task of any government and relevant state institution. The access to the Internet information and governmental services is one of the immediate human needs, since telecommuting, studying, access to functions of public institutions and other organizations and authorities are vitally important. Accordingly, the level of citizens' access to information corresponds to the country's level of development.

A large number of experienced telecommunication field professionals have focused their scientific works on general aspects and methods aiming to increase the connectivity, bandwidth and survivability of radio networks, which are considered from different mathematical and technical aspects. For example, the largest contributions to the theory of efficiency of radio networks and bandwidth were made by Н. Бандурко, В. Толубко, Л.Беркман; to the theory of survivability of radio systems were made by В. Левин, В. Заїка, К. Строчак; and to the theory of increasing connectivity were made by А. Тяжев, Н. Бугой, В.Плаксієнко, Ю. Хлапонін.

However, the referred radio networks, due to their insufficient coverage, have some disadvantages like partial loss of information when the topology of data transmission nodes is changed; restricted bandwidth and limited number of network subscribers – all these require increase in the quantity of nodes and increase in the signal power level. Other disadvantages of the existing systems-prototypes of self-organizing radio networks are the impossibility to meet current requirements for the quality of service due to retransmissions, variability of radio channel capacity, its dependence on the distance between mobile radio facilities, transmission power, the number of neighboring radio nodes and generated traffic, etc. International scientific sources have recently paid much attention to the use of radio devices based on software-configured radio technology for self-organizing networks.

This thesis research focuses on the methods and methodologies aiming to increase the efficiency of self-organizing new generation networks. Scientific novelty of the results of this research is as follows:

The influence of different conditions of radio wave propagation on the connectivity of radio facilities based on the SDR technology was revealed. In particular, it was found that slow fading decreases, and fast fading increases the probability of “isolation” of radio equipment.

The task of calculating the throughput of radio facilities has been formulated based on the SDR technology of a self-organizing network, which is determined by the probability of high-quality communication and successful radio reception with an a priori unknown territorial distribution of radio nodes in view of the average propagation losses and fading.

An algorithm for calculating the throughput of a self-organizing network with radio devices of the SDR technology is proposed. The algorithm makes it possible to calculate the key factors separately and, thus, to determine the ways to improve the network throughput with software-configurable radio facilities.

The broadband network throughput has been determined and its statistical model is proposed for a multipath radio communication channel with the statistics of the effect of both fast and slow fading.

A model is proposed to assess the survivability of a self-organizing wireless network with the SDR technology radio devices. The model allows to evaluate the key factors separately and, thus, to determine the ways to improve the survivability of a network with software-configurable radio facilities.

The methodology for calculating mobility of a self-organizing wireless network has been improved. It has been developed on the basis of a new systemic criterion for mobility, which, in contrast to existing models, takes into account the dynamics of changes in throughput and the volume of transmitted data.

The method for calculating the connectivity of radio facilities based on the SDR technology of a new generation self-organizing network has been improved. Feature: Self-organizing networks (SON), in contrast to wired and cellular networks, do not control data flows through base stations (access points) due to the absence of the latter.

This thesis research contains calculation of connectivity and a mathematical model that has been created to assess the required density of radio nodes in the network. This enables to determine the number of radio facilities COM (N) as a function of the radio communication range (R) and the COM area (S).

A routing algorithm for self-organizing radio networks has been developed.

All the listed above provides for the relevance of the topic of this thesis research, which is aimed at solving the scientific problem referring to development of models and methods for constructing a self-organizing radio network system. These real issues have been investigated with a view to implementing the successful results of such investigation in the telecommunication networks in Ukraine.

This thesis research has been carried out within the framework of the state budget research topic “Development of over-high-speed wireless backhaul network with gigabit channels with the possibility to use unlicensed terahertz range” (2016-2017), (thesis research No. 0116U004698). Besides, this thesis research is based on the researches carried out at the request of the State Enterprise “Ukrainian State Center of Radio Frequencies” with their results reflected in the research report “Methodology for measuring the quality parameters of fixed telephone services by testing the real traffic” (thesis research No. 0116U004698) – 2014.

The direction of this research corresponds to the research works carried out by the State University of Telecommunications during 2014-2016, namely: “Broadband radio access system based on domestic developments” (thesis research No. 0114U002178); “Research of radio communication channel in the lower part of the terahertz range at speed transmissions over 1 Gbit/s” (thesis research No. 0114U002179); “Wireless data transmission system in the microwave range” (thesis research No. Oil 4U002180); “Statistical evaluation of the electromagnetic compatibility of new generation wireless communication networks” (thesis research No. 0114U002181), as well as the research works carries out by the State Enterprise “Ukrainian Scientific-Research Institute of Communication” during 2008-2015, namely: “Development of Recommendations on Mobile and Fixed Convergence (FMC)”, (thesis research No. 0113U005218).

The results of this thesis research are being used by the State University of Telecommunication in the educational process. The implementation of research results

is confirmed by the relevant Acts. The issues, considered and developed in this thesis research, correspond to the main tasks and development of the current information infrastructure of Ukraine.

Key words: self-organizing radio networks, connectivity, throughput, survivability, transmission nodes, operational efficiency and routing.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у наукових фахових періодичних виданнях України:

1. Бреславський В.О. Створення комплексної системи моніторингу з використанням аналізаторів сигналізації телекомунікаційних мереж. Київ, Наукові записки УНДІЗ. 2014. № 1. с. 69-76.

2. Бреславський В.О. Вимірювання якості передачі мови в телефонних системах. Використання алгоритму PESQ, як оцінки сприйняття якості передачі мови. Київ. Наукові записки УНДІЗ 2014. № 3. с. 53-61.

3. Бреславський В.О. Методи і процедури первинної обробки значень параметрів телекомунікаційної мережі. Кременчук. Вісник Кременчуцького національного університету. 2015. № 2(91). с. 64-70.

4. Бреславський В.О. Оцінка якості надання послуг в мережах стільникового зв'язку. Житомир. Вісник Житомирського державного університету. 2015. № 1(79). с. 264-271

5. Плющ О.Г., Бреславський В.О., Грищенко Л.М. Методика оцінки щільності радіовузлів в само організованих мережах. Київ. Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2016. № 1. с.5-10.

6. Сайко В. Г., Плющ А. Г., Бреславський В.О., Лисенко Д. О. Анализ состояния и перспектив развития рынка услуг широкополосных систем беспроводного доступа. Научно-практический журнал «Зв'язок», Київ. ДУТ. 2016. № 1. с.20-23.

7. Сайко В. Г., Бреславський В.О., Лисенко Д.О. Спосіб підвищення завадостійкості каналів радіозв'язку для мобільних мереж нового покоління. Научно-практический журнал «Зв'язок», Київ. ДУТ. 2015. №4. с.29-32.

8. Сайко В. Г., Бреславський В.О., Лисенко Д.О. Спосіб вимірювання відношення сигнал/шум для адаптивних радіоліній мобільного зв'язку. Научно-практический журнал «Зв'язок», Київ. ДУТ. 2014. №6. с.49-51.

9. Плющ О.Г., Бреславський В.О., Грищенко Л.М. Развитие широкополосных систем беспроводного доступа нового поколения: технико-

экономический анализ. Київ. Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2015. № 4. с.49-55.

10. Сайко В.Г., Оксіюк О.Г., Бреславський В.О., Лисенко Д.О. Техніко-економічний аналіз динаміки розвитку ринку мобільних послуг широкополосного доступу. Київ. Сучасний захист інформації. 2015. № 4. с.44-55.

11. Сайко В.Г., Бреславський В.О., Грищенко Л.М., Кравченко В.І. Математична модель розрахунку мобільності децентралізованої безпроводової мережі. Київ. Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2016. № 2. с.17-22.

Статті у зарубіжних наукових фахових періодичних виданнях

12. Бреславський В.О. Лаптев О.А. International Journal of Science and Engineering Investigations (IJSEI)" Denmark. vol. 9. issue 107. 2020. с 46-50.

13. Бреславський В.О. Лаптев О.А. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering (IJATCSE) Scopus Indexed - ISSN 2278 – 3091

Публікації за матеріалами наукових конференцій

14. Бреславський В.О. Типові методи вимірювання якості в телекомунікаційних мережах. XI Всеукраїнська конференція студентів і молодих науковців «Інформатика, інформаційні системи та технологій» 28.03. 2014 р. Тези доповідей. Одеський національний університет, Одеса, 2014. с.10-12.

15. Бреславський В.О., Сайко В.Г. Использование алгоритма PESQ в измерениях качества речевой связи в телефонных системах. 4 міжнародна наукова конференція студентів та молодих вчених. Одеса. 2014, с.147-148.

16. Бреславський В.О. Оцінка якості надання послуг в мережах стільникового зв'язку. 7 Всеукраїнська конференція студентів і молодих науковців. Дніпро. 2015. с.61-62.

17. Казимиренко В.Я., Кравченко В.І., Бреславський В.О., Наритник Т.Н. Аналіз розвитку мереж широкосмугового бездротового зв'язку через призму сталого економічного розвитку. Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології» том 2 Актуальні

питання побудови сучасних телекомунікаційних систем і мереж. 17-20 листопада 2015 року. Київ: ДУТ, с. 34-36.

18. Казимиренко В.Я., Кравченко В.І., Бреславський В.О., Наритник Т.Н. Использование терагерцового диапазона при развертывании мультисервисной сети широкополосного доступа. Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології» том 2 Актуальні питання побудови сучасних телекомунікаційних систем і мереж. 17-20 листопада 2015 року. Київ: ДУТ, с. 27-30.

19. Бреславський В.О., Лисенко Д.О. Методика розрахунку мобільності децентралізованої бездротової мережі. П'ята міжнародна науково-технічна конференція «ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАТИЗАЦІЇ» 22-23 грудня 2015 р. Тези доповідей четвертої міжнародної науково-технічної конференції. Київ-Полтава-Китовище-Париж-Орел-Харків. с. 34

20. Бреславський В.О. Вимірювання рівнів випромінювання при контролі електромагнітних завад в самоорганізованих радіомережах. VI Наукова Практична конференція: «СВІТОВИЙ РОЗВИТОК НАУКИ ТА ТЕХНІКИ» 7.12.2020. Запоріжжя. с 31-34.

Патенти

1. Сайко В.Г., Наритник Т.М., Казимиренко В.Я., Бреславський В.О., Єрмаков А.В. Мікрохвильова система широкосмугового безпроводового доступу з підвищеною щільністю покриття зони обслуговування UMDS-TH. Патент України на корисну модель

№ 109005, дата публікації 25.07.2016.-Бюл.№ 14 з пріоритетом від 25.07.2016.

2. Сайко В.Г., Наритник Т.М., Грищенко Л.М., Бреславський В.О., Лисенко Д.О., Дакова Л.В.

Пристрій для вимірювання відношення сигнал/шум в приймальних комплексах адаптивного мобільного радіозв'язку. Патент України на корисну модель № 108734, дата публікації 25.07.2016.-Бюл.№ 14 з пріоритетом від 25.07.2016.

3. Сайко В.Г., Наритник Т.М., Казіміренко В.Я., Бреславський В.О., Лисенко Д.О. Мікрохвильова система широкосмугового мультисервісного радіодоступу з підвищеною пропускною здатністю. Патент України на корисну модель. № 107550, дата публікації 10.06.2016.-Бюл.№ 11 з пріоритетом від 10.06.2016.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	16
ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1_АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ АСПЕКТІВ РЕАЛІЗАЦІЇ І РОЗВИТКУ МЕРЕЖ ЦИФРОВОГО РАДІОЗВ’ЯЗКУ НОВОГО ПОКОЛІННЯ	23
1.1 Аналіз динаміки розвитку технічних аспектів ринку мобільних послуг широкосмугового доступу	23
1.1.1 Загальна характеристика стану розвитку широкосмугових систем бездротового доступу	23
1.1.2 Дані стану розвитку світового ринку мобільних телекомунікацій.....	30
1.1.3 Особливості розвитку ринку мобільних послуг технології M2M	31
1.1.4 Мобільні широкосмугові мережі 4-го і 5-го поколінь	32
1.2. Особливості побудови та функціонування бездротових самоорганізуючих мереж на основі технології SDR.....	38
1.2.1 Побудова та функціонування бездротових самоорганізуючих мереж.	38
1.2.2 Архітектура програмно-конфігурованого радіо	44
1.3 Математична модель розрахунку мобільності децентралізованої бездротової мережі.....	51
1.3.1 Постановка задачі	51
1.3.2. Модель розрахунку мобільності самоорганізованої бездротової мережі	54
Висновки до розділу 1.....	59
РОЗДІЛ 2_ВДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКИ ОЦІНКИ ЗВ’ЯЗАНОСТІ САМООРГАНІЗОВАНОЇ РАДІОМЕРЕЖІ	61
2.1 Ймовірнісна модель функціонування пристроїв на основі технології SDR в самоорганізованій радіомережі	61
2.2 Використання терагерцового діапазону для передачі інформаційного трафіку в радіосистемах	65
2.2.1 Загальні положення.....	66
2.2.2. Особливості терагерцового діапазону при використанні в мобільних телекомунікаціях.....	71
2.2.3. Аналіз особливостей передачі по бездротовому каналу зв’язку в діапазоні 120 ГГц	82
2.2.4 Попередня оцінка довжини лінії зв’язку в діапазоні 130...134ГГц	85

2.2.5 Оцінка довжини бездротового каналу зв'язку при модуляції 64QAM (запропонований формувач), смуга 40МГц	86
2.2.6 Оцінка довжини бездротового каналу зв'язку при модуляції QPSK, смуга 2ГГц.	87
2.3 Оцінка зв'язності радіозасобів самоорганізованої радіомережі.....	88
2.3.1 Поняття зв'язності	88
2.3.2 Розрахунок дальності зв'язку точка-точка з урахуванням довільного переміщення	88
2.3.3 Методика оцінки щільності радіовузлів в самоорганізованих мережах	93
2.3.3.1 Математична модель оцінки «необхідної» щільності радіовузлів мережі.....	95
Висновки до розділу 2.....	99
РОЗДІЛ 3_ОЦІНКА ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ ТА ЖИВУЧОСТІ САМООРГАНІЗОВАНОЇ РАДІОМЕРЕЖІ ПОБУДОВАНОЇ РАДІОЗАСОБАМИ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ SDR.....	101
3.1 Постановка задачі.....	101
3.2 Модель оцінки статистичних характеристик багатопроменевого каналу високошвидкісних широкосмугових мереж бездротового зв'язку.....	104
3.2.1 Загальні зауваження.....	104
3.2.2 Постановка задачі	105
3.2.3 Статистичні характеристики пропускної спроможності багатопроменевого каналу радіозв'язку.....	108
3.3 Модель оцінки живучості самоорганізуючої бездротової мережі.....	112
3.3.1 Методика оцінки живучості ССЗ побудованої на основі радіозасобів технології SDR	112
3.3.2 Приклад оцінки живучості мережі зв'язку із радіозасобами на основі технології SDR	119
3.3.3 Способи підвищення живучості самоорганізуючих мереж	122
3.3.3.1 Оцінка якості надання послуг в мережах стільникового зв'язку .	122
3.3.3.2 Принципи побудови систем моніторингу	133
3.3.3.3 Комплексна система моніторингу самоорганізуючих мереж із використанням аналізаторів сигналізацій телекомунікаційних систем...	137

3.3.3.4 Вдосконалення алгоритму маршрутизації самоорганізованих радіомереж	148
Висновки до розділу 3.....	154
РОЗДІЛ 4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБЛЕНИХ МОДЕЛЕЙ І АЛГОРИТМІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ В САМООРГАНІЗОВАНИХ МЕРЕЖАХ	157
4.1. Постановка задачі.....	157
4.2 Спосіб адаптивного вибору режимів роботи радіозасобів нового покоління в умовах складної заводової обстановки	158
4.3 Система широкопasmового безпроводового доступу із використанням терагерцового діапазону	167
4.4 Методи і процедури первинної обробки значень параметрів телекомунікаційної мережі	174
4.4.1 Актуальність задачі.....	174
4.4.2 Методи первинної обробки значень параметрів телекомунікаційної мережі.....	174
4.4.3 Процедури збору інформації про роботу телекомунікаційної мережі.....	177
4.4.4 Визначення особливостей процесу статистичного моніторингу характеристик телекомунікаційної мережі	179
4.4.5 Моделювання часових рядів	181
4.4.6 Аналіз тренду.....	182
4.4.7 Аналіз сезонності	183
4.4.8 Модель АРПСС	185
4.4.9 Оцінювання параметрів	187
4.4.10 Оцінювання моделі	188
Висновки до розділу 4.....	188
ВИСНОВКИ.....	191
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	192
ДОДАТОК 1	206
ДОДАТОК 2	207
ДОДАТОК 3	208

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

1. COM - самоорганізовані мережі.
2. (SDR) - Software-defined radio— система радіозв'язку, в якій програмне забезпечення використовується як для модуляції, так і для демодуляції радіосигналів.
3. СМО - системи масового обслуговування мережі LTE
4. АЦП - аналого-цифровий перетворювач
5. ЦАП - цифро-аналоговий перетворювач
6. ПЛІС - програмована логічна інтегральна схема
7. ДМ - децентралізовані мережі
8. МТ - мобільний термінал
9. OFDM (Orthogonal Frequency - Division Multiplexing) — це метод мультиплексування (поєднання кількох потоків даних в один спільний простір), який підрозподіляє заданий радіоспектр на набір ортогональних піднесних, через які передається інформація.
10. ППС - приймально-передавальна станція.
11. ММХ - міліметрові хвилі
12. ССЗ - самоорганізовані системи зв'язку
13. SUR - оказник живучості системи
14. Е - оцінка ймовірності блокування виклику
15. SQI - (Speech Quality Index) параметр оцінки якості мови -
16. BER - відсоток помилкових бітів
17. FER - відсоток неправильно декодованих фреймів
18. АСТС - аналізатор сигналізацій телекомунікаційних систем
19. АВП - аналізатор виду перешкод
20. АКК - аналізатор якості каналу
21. АПЧ - аналізатор придатності частоти
22. БАВС - блок автоматичного ведення зв'язку
23. TDMA - множинний доступ з розподілом по часу
24. FDMA - множинний доступ з розподілом по частоті
25. ТС - термінальна станція

ВСТУП

Відмінними особливостями сучасних самоорганізованих радіомереж є розподілене (децентралізоване) функціонування, відсутність фіксованої інфраструктури зв'язку, висока живучість мережі за рахунок ретрансляції і забезпечення декількох маршрутів доставки інформації до адресата. Сучасні тенденції вдосконалення таких радіомереж полягають в наступному. З точки зору фізичного рівня, якщо порівнювати з відомими вітчизняними та зарубіжними системами-прототипами, функціонування розроблених нових радіомереж подібного класу передбачається в більш високочастотному діапазоні, з істотно збільшеною шириною робочої смуги частот, багатопозиційними сигнальними конструкціями і адаптивними багаточастотними схемами передачі (технології MIMO). Останні дві тенденції розвитку на фізичному рівні пов'язані з розвитком цифрових сигнальних процесорів і програмованих логічних інтегральних схем.

Актуальність теми. Відомими недоліками роботи існуючих систем-прототипів самоорганізованих радіомереж є неможливість забезпечення сучасних вимог до якості обслуговування внаслідок необхідності ретрансляцій, мінливості пропускної здатності радіоканалу, її залежності від відстані між рухомими радіозасобами, потужності передачі, кількості сусідніх радіовузлів і рівня створюваного ними трафіку і т.д. Останнім часом у відкритих зарубіжних наукових джерелах велика увага приділяється питанням застосування радіозасобів на основі технології програмно-конфігурованого радіо для самоорганізованих мереж. З точки зору якості обслуговування, очевидними перевагами використання радіозасобів на основі технології програмно-конфігурованого радіо в самоорганізованих радіомережах є, по-перше: збільшена дальність радіозв'язку за рахунок посилення на передавальній та приймальній сторонах, що дозволяє скоротити число ретрансляцій, і, таким чином, підвищити пропускну спроможність і зменшити затримку передачі інформації від джерела до адресата; по-друге: істотне зменшення внутрішньосистемних завад за рахунок адаптивно формованих діаграм

спрямованості, що дозволяє в рази збільшити просторове ущільнення одночасних сеансів радіозв'язку, і, таким чином, підвищити пропускну здатність.

Крім того, сьогодні у зв'язку зі зростанням обсягу телекомунікаційних систем, що використовують електромагнітні випромінювання різних частотних діапазонів, виникають серйозні проблеми. З одного боку, вже не вистачає частотного ресурсу для введення в дію нових засобів телекомунікацій, а з другого боку зростає і поступово наближується до критичного рівень електромагнітного випромінювання, і це шкодить здоров'ю людей. Таким чином, існує необхідність в нових телекомунікаційних технологіях та системах, які б дозволяли нарощувати об'єми інформації, що передається, і робили б це на екологічно безпечному рівні.

Для практичної реалізації вищезгаданих переваг необхідний новий підхід до побудови радіосистеми в цілому. У зарубіжних наукових джерелах цей підхід отримав назву наскрізного проектування. Таким чином, завдання пошуку та обґрунтування відповідних інженерно-технічних рішень представляється надзвичайно актуальною і необхідною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась в рамках держбюджетної науково-дослідної теми «Розробка надвисокошвидкісної бездротової мережі backhaul з гігабітними каналами із можливістю використання неліцензійного терагерцового діапазону» (2016-2017 р.р.), (ДР № 0116U004698). та у відповідності до тематик науково-дослідних, які проводилися на замовлення ДП «Український державний центр радіочастот» і результати проведення дослідження яких відображені у звіті НДР «Методика з виконання вимірювання параметрів якості послуг фіксованого телефонного зв'язку методом випробування на реальному трафіку» (ДР № 0116U004698) – 2014 р.

Обраний напрям досліджень відповідає тематиці науково-дослідних робіт Державного університету телекомунікацій, що проводилися протягом 2014-2016 р.р., а саме: «Система широкосмугового радіодоступу на базі вітчизняних розробок» (ДР № 0114U002178), «Дослідження каналу радіозв'язку в нижній частині терагерцового діапазону при швидкості передачі більше 1 Гбіт/с» (ДР №

0114U002179), «Бездротова система передачі даних в НВЧ діапазоні» (ДР № 0114U002180), «Статистична оцінка електромагнітної сумісності мереж бездротового зв'язку нового покоління» (ДР № 0114U002181), Українського науково-дослідного інституту зв'язку, що проводилися протягом 2008-2015 р.р., а саме: «Розробка рекомендацій з питань конвергенції рухомого та фіксованого зв'язку (FMC)», (ДР № 0113U005218). Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі Державного університету телекомунікацій. Впровадження результатів досліджень підтверджуються відповідними актами. Питання, розглянуті та розроблені в дисертаційній роботі, відповідають основним завданням та напрямам створення сучасної інформаційної інфраструктури України, які визначені у таких концептуальних документах як: — Концепція державної інформаційної політики (2011 р.) Основні засади розвитку інформаційного суспільства України на 2012-2020 роки, — Національна програма інформатизації.

Науковою задачею є розробка моделей та методик оцінки зв'язності, пропускну здібності самоорганізованих радіомереж.

Метою даної роботи є підвищення зв'язності і пропускну здатності самоорганізованих радіомереж.

Для досягнення мети необхідне вирішення наступних основних завдань:

1. Розробити математичну модель розрахунку мобільності самоорганізованої бездротової мережі, яка дозволяє децентралізованій мережі, побудованої на різних організаційно-технічних принципах, порівняти по-новому системному критерію мобільності, яка на відміну від відомих - враховує необхідну пропускну здатність і об'єм переданих повідомлень.

2. Сформулювати задачу оцінки зв'язності радіозасобів на основі технології SDR самоорганізованої мережі, яка визначається ймовірністю якісного забезпечення зв'язку і ймовірністю успішного радіоприйому при апріорно невідомому територіальному розподілі радіовузлів з урахуванням середніх втрат поширення і завмирань.

3. Провести аналіз особливостей терагерцового діапазону при використанні в мобільних телекомунікаціях. Встановити довжину каналу лінії зв'язку в діапазоні 130...134 ГГц для передачі даних. Створити методику використання терагерцового діапазону для передачі інформаційного трафіку в радіосистемах. Провести розрахунок радіовидимості в СОМ для міських умов

4. З урахуванням статистичних характеристик пропускної спроможності багатопроменевого каналу радіозв'язку провести оцінки щільності розподілення ймовірності пропускної пропускної здатності та живучості самоорганізованих мереж нової генерації.

5. Визначитись у доцільності видів маршрутизації для самоорганізованих мереж. Вдосконалити або розробити новий алгоритм для направлення трафіку у СОМ.

6. З метою забезпечення більш якісного результату при проведенні вимірювань на телекомунікаційних мережах, розробити методику з виконання вимірювання параметрів якості послуг фіксованого зв'язку методом випробування на реальному трафіку.

Практична цінність роботи. полягає в тому, що сукупність розроблених методик і моделей оцінок зв'язності і пропускної здатності дозволяє здійснити побудову початкового наближення самоорганізованої радіомережі, оцінити число і параметри радіозасобів, необхідні для організації радіозв'язку на заданій території, оцінити ймовірність успішного радіоприйому і, відповідно, пропускну здатність радіозасобів на основі технології програмно-конфігурованого радіо в умовах впливу внутрішньосистемних і навмисних завад.

Практичне застосування вдосконаленої методики використання терагерцового діапазону дозволило здійснити розрахунок довжини ліній зв'язку в діапазоні 130-140 ГГц та виявити особливості передачі по бездротовому каналу зв'язку в діапазоні 120 ГГц.

Об'єкт дослідження – є процес підвищення ефективності функціонування (підвищення зв'язності, пропускної здатності та живучості) самоорганізованих радіомереж нової генерації.

Предмет дослідження – моделі і методики підвищення ефективності функціонування самоорганізованих радіомереж нового покоління, а також методи маршрутизації радіомереж для забезпечення зв'язності, пропускнуої здатності та живучості самоорганізованих радіомереж нової генерації.

Методи досліджень. Для досягнення поставлених в дисертаційній роботі задач використано методи теорії інформації, теорії оптимального управління, системного аналізу, елементи теорії ієрархічних багаторівневих систем, методи імітаційного моделювання, багатокритеріальної оптимізації та теорії конфлікту.

Наукова новизна одержаних результатів роботи полягає у наступному:

1. Вперше розроблено математичну модель розрахунку мобільності самоорганізованої бездротової мережі, яка дозволяє здійснювати порівняння децентралізованих мереж, побудованих на різних організаційно-технічних принципах за системним критерієм мобільності з урахуванням необхідної пропускнуої здатності і обсягу переданих повідомлень.

2. Вдосконалено методику оцінки зв'язності радіозасобів на основі технології SDR самоорганізованої мережі нової генерації, яка, на відміну від відомих, дозволяє здійснювати розрахунок дальності зв'язку точка-точка з урахуванням довільного переміщення.

3. Вдосконалено методику використання терагерцового діапазону для передачі інформаційного трафіку в радіосистемах, яка, на відміну від існуючих, враховує ефективність використання траси розповсюдження інформації в цифровому форматі.

4. Вперше розроблено методику оцінки щільності розподілення ймовірності пропускнуої здатності та живучості самоорганізованої мережі нової генерації.

5. Вдосконалено алгоритм маршрутизації самоорганізованих радіомереж, який, на відміну від відомих, дозволяє усунути перевантаженість мережі через постійну передачу даних.

6. Вперше розроблено методику з виконання вимірювання параметрів якості послуг фіксованого зв'язку методом випробування на реальному трафіку.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційне дослідження є самостійно виконаною роботою, в якій відображено особистий авторський підхід та особисто отримані теоретичні та прикладні результати, які відносяться до вирішення задачі синтезу самоорганізованої радіомережі. Формулювання мети та завдань дослідження проводилось спільно з науковим керівником. Основні положення і результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно та опубліковані у наукових працях [119-122]. У спільних наукових працях здобувачеві належить: [123] – питання аналізу динаміки та шляхи розвитку ринку мобільних широкосмугових послуг; [129] – модель розрахунку мобільності децентралізованої безпроводової мережі; [135] – Аналіз розвитку мереж широкосмугового бездротового зв'язку через призму сталого економічного розвитку.

Наукові положення, що виносяться на захист, та висновки і рекомендації дисертації належать автору. Основна частина отриманих в дисертації результатів доповідалась автором особисто на міжнародних науково-технічних конференціях і симпозіумах.

Апробація результатів дисертації. Основні теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на науково-технічних конференціях та семінарах професорсько-викладацького складу і наукових співробітників Державного університету телекомунікацій .

Публікації. На тему дисертаційної роботи опубліковано 19 наукових праць, у тому числі 10 статей (з них 4 одноосібно) у фахових науково-технічних журналах, 12 матеріали доповідей (з них 3 одноосібно) у збірниках наукових праць на науково-технічній конференції та симпозіумі, отримано 3 патенти України на корисну модель [121- 123].

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків (акти впровадження). Загальний обсяг роботи складає 208 сторінок друкованого тексту, у тому числі містить 60 рисунків та 9 таблиць, 3 додатка. Список використаних джерел на 13 сторінках містить 138 найменувань.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ АСПЕКТІВ РЕАЛІЗАЦІЇ І РОЗВИТКУ МЕРЕЖ ЦИФРОВОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

1.1 Аналіз динаміки розвитку технічних аспектів ринку мобільних послуг широкосмугового доступу

Сьогодні значне прискорення темпів зростання світового ринку телекомунікаційних послуг здійснюється в першу чергу за рахунок збільшення попиту на послуги стільникового зв'язку і швидкого розвитку Інтернету [1-7]. Він поступово стає переважним глобальним середовищем цифрового ТВ-мовлення.

Мета цього підрозділу – розгляд технічних і економічних аспектів розвитку мереж і ринку послуг мобільного широкосмугового зв'язку нового покоління і їх впливу на економічне зростання країн.

1.1.1 Загальна характеристика стану розвитку широкосмугових систем бездротового доступу

Ключовий тренд поточного часу – інтеграція телевізорів і ТВ приставок з Інтернетом. Термін «Smart TV» аналогічний поняттю «Smart Phone» і говорить про те, що це телевізор із значно розширеним набором функцій. «Розумні телевізори» починають більш орієнтуватися на:

- Internet TV.
- Поточне відео на Інтернет-ресурсах (так званий Over-the-topcontent).
- Відео за запитом (Video on demand або VOD).
- Інформаційно-розважальні додатки (віджети).
- Перегляд зображень і інших ресурсів мережі.
- Відтворення мультимедіа, існуючого вдома на PC, ноутбуку, телефоні та інших цифрових носіях.

Потокове відео або технологія OTT (Over the Top) набула широкого поширення у сфері надання відео послуг через Інтернет. Термін OTT означає доставку відеосигналу на приставку (комп'ютер, мобільний телефон) користувача по некерованій мережі Інтернет на відміну від послуг IPTV, які надаються через керовану оператором мережу з гарантованим QOS. Все активніше використовується телевебінар – телевізійна презентація (віщання) через Інтернет в режимі реального часу з можливістю інтерактивного спілкування з аудиторією через відео -, голосовий і текстовий чати.

Широкополосний Інтернет, що впроваджується в даний час більшістю передових операторів зв'язку, сам по собі не створює якоїсь додаткової вартості, але забезпечує можливість впровадження нових послуг, для яких пропускну здатність існуючих систем передачі було недостатньо. Однією з найбільш перспективних послуг на даній платформі є без сумніву доставка інтерактивного мультимедіа контенту (тобто інформаційного змісту) користувачеві.

З прискореним впровадженням високошвидкісних («швидких») мереж передачі даних в сегменті кінцевих користувачів з'явився спосіб прямого доступу до користувача, а саме, доступ по широкополосних IP-мереж.

Перевага широкополосної IP-мережі, яка служить для доставки мультимедійного інформаційного змісту, полягає, в першу чергу, в її розгалуженості і інтерактивності, завдяки чому набір послуг, які можуть бути надані покупцеві, істотно багатший. До додаткових послуг у сфері мультимедійного контенту відносяться наступні:

- цифрове телебачення (TVoIP);
- відео за запитом (Video on Demand - VOD);
- прокат відеоконтентів (Video Rental);
- ігри за запитом (Games on Demand - GOD);
- адаптація пакетів з урахуванням користувача (per User Profiles);
- попередній перегляд контенту (Try before Pay).

Причинами такого швидкого збільшення темпів зростання послуг стільникового зв'язку є не тільки загальне збільшення населення в світі і зростання його доходів, скільки бурхливий розвиток науково-технічного

прогресу, серйозні соціально-економічні зміни в суспільстві. Мобільний зв'язок дає імпульс до зростання всієї світової економіки і сприяє формуванню нових тенденцій її розвитку і ринок послуг стільникового зв'язку є одним з секторів, що динамічно розвиваються в світовій економіці.

Економіка кожної країни напряму залежить від розвитку зв'язку та Інтернету. Завдяки Інтернету розвивається малий бізнес, електронна комерція, зростає продуктивність праці і ефективність бізнес - процесів підприємств, вирішуються питання енергозбереження та безпеки, медицини та освіти. Проведені провідними аналітиками дослідження ІКТ дозволили виявити характерну залежність: чим вище рівень ШСД, тим більший внесок у ВВП країни. На рис. 1.1 представлено три групи країн: з низьким проникненням ШСД – внесок до ВВП складає 0,8%; з середнім – 1,4%; з високим – 2,3%.

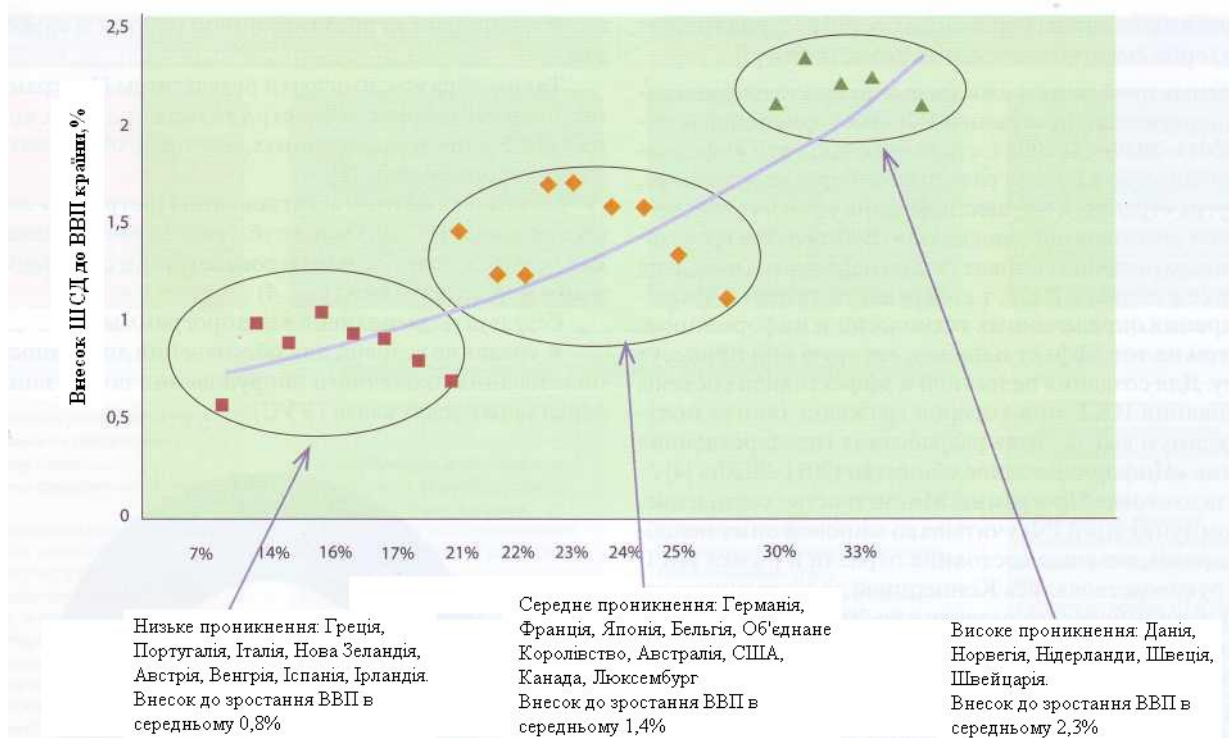


Рис. 1.1 Результати досліджень світового ринку ІКТ провідними аналітиками

Головною стратегією на сьогоднішній день у операторів стільникового зв'язку є збільшення темпів зростання доходу за рахунок надання послуг з доданою вартістю, які у свою чергу вимагають збільшення пропускної спроможності каналу зв'язку.

На даний момент, мобільний доступ, використовуваний в основному як доповнення до фіксованого доступу до глобальної мережі, знаходить все більший попит, а зниження цін на мобільний Інтернет робить використання мобільного доступу все більш привабливим для користувача. Процес повністю аналогічний тому, як якийсь час назад мобільний зв'язок доповнив стаціонарну і з часом зайняв свою ринкову нішу.

Однією з послуг, що найстрімкіше розвиваються, є мобільний Інтернет і частка доходів від мобільного Інтернету в структурі доходів послуг неухильно росте. Основним джерелом зростання доходів від мобільного Інтернету є розвиток мереж третього покоління (3G) і продажу смартфонів, планшетів, USB-модемів та інших пристроїв, що дозволяють отримати доступ до мобільного Інтернету (рис.1.2).

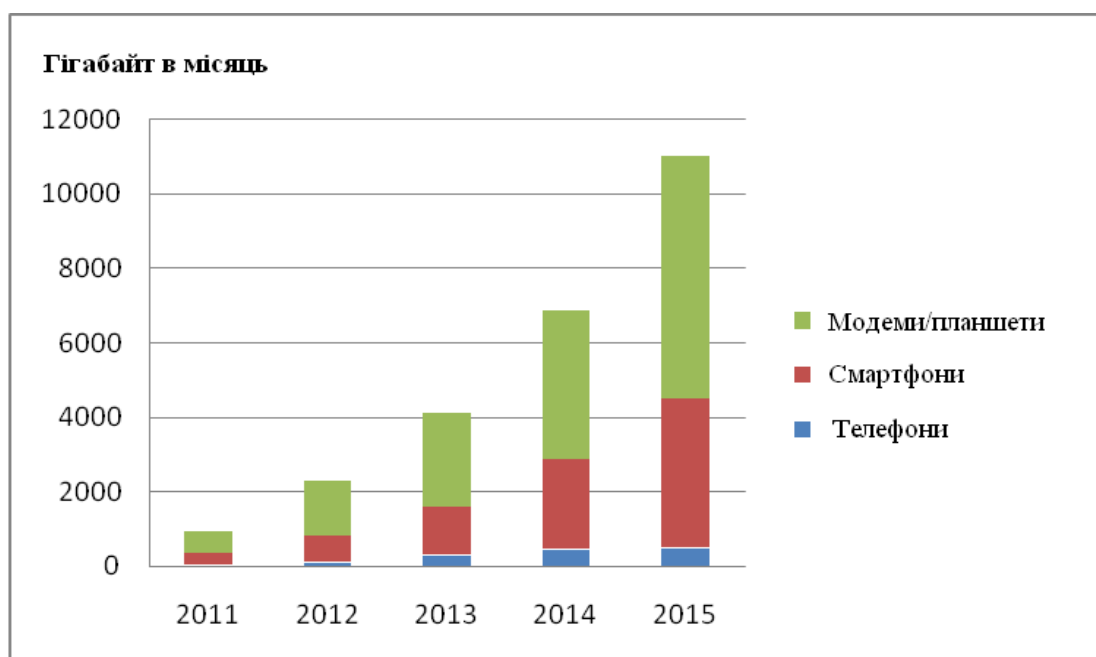


Рис.1.2 Зростання об'єму трафіку даних в мережах мобільного зв'язку

На сьогоднішній день оператори мобільного зв'язку по всьому світу фіксують різке зростання об'ємів передаваних даних, який багато в чому обумовлений популярністю, що набирає обороти, смартфонів і планшетних комп'ютерів, що забезпечують зручний доступ до всіх нових додатків і сервісів, (рис.1.3).

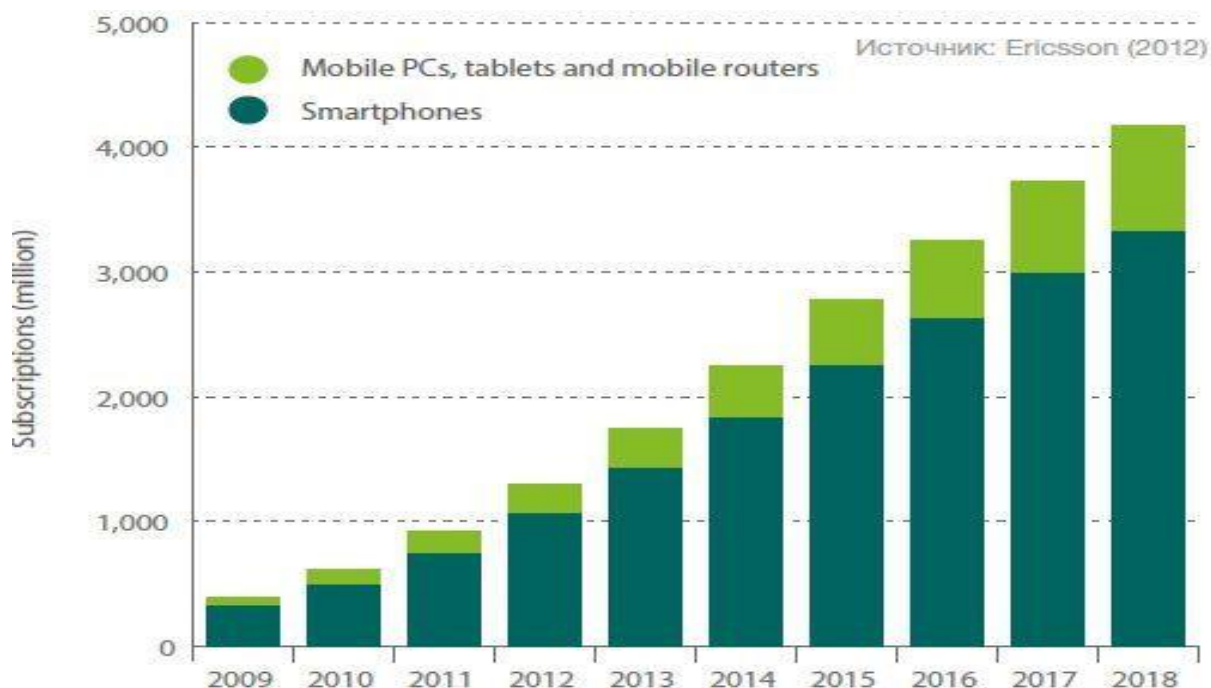


Рис. 1.3 Динаміка підключення через смартфони, ПК, мобільні роутери і планшети, прогноз на 2009—2018 рр.

За прогнозом Bell Labs, трафік даних в мобільних мережах за п'ять років - з 2010 по 2015 р. - зросте в 30 разів. У багатьох країнах світу число абонентів мобільного доступу вже перевищило кількість абонентів фіксованого доступу. Динаміку розвитку мобільного і фіксованого широкосмугового доступу, а також мобільних підключень в цілому і за допомогою планшетів і роутерів представлено на рис.1.4.

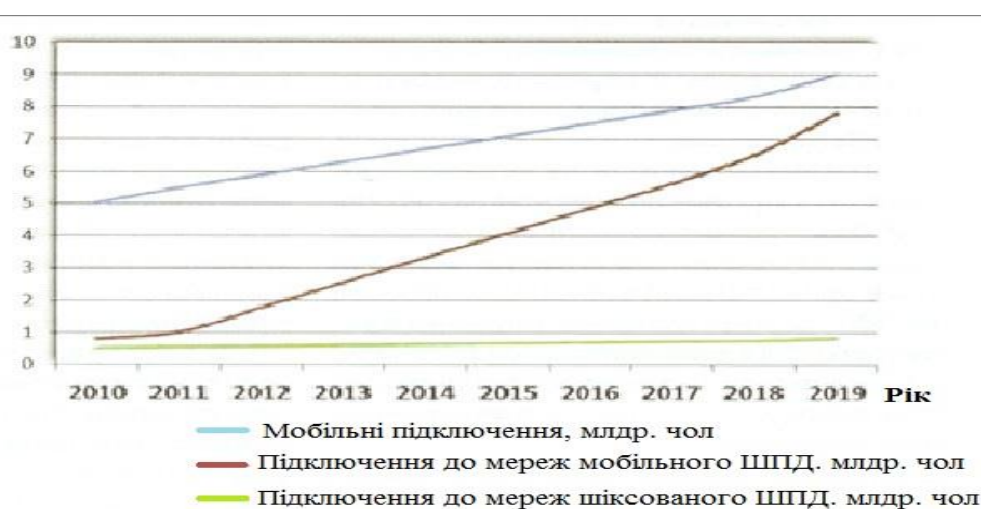


Рис.1.4 Динаміка підключення до мереж фіксованого і мобільного широкосмугового доступу, прогноз на 2010-2020 рр.

Така динаміка пояснюється кількома чинниками:

По-перше, зростанням мобілізації абонентів за рахунок розвитку ринку

смартфонів, планшетів.

По-друге, зміною підходу постачальників послуг Інтернет до розробки онлайн-додатків для абонентів.

На рисунку 1.5 представлено темпи продажів настільних і портативних комп'ютерів порівняно з продажами смартфонів і планшетів.



Рис.1.5 Темпи продажів настільних і портативних комп'ютерів порівняно з продажами смартфонів і планшетів

При цьому на рис.1.6 представлено дані, що демонструють стійку тенденцію зростання трафіку даних при практично незмінному об'ємі голосового трафіку. При цьому простежується тенденція зниження вартості передачі 1 Мбайт даних в мобільних мережах. За прогнозами, в період з 2013 по 2019 рр. середньорічні темпи приросту мобільного трафіку складуть приблизно 45%, в результаті до кінця 2019 р. його об'єм збільшиться в 10 разів. Згідно тим же прогнозам, об'єм трафіку в мережах фіксованого зв'язку росте значно повільніше, ніж в мережах мобільного зв'язку. Його середньорічні темпи приросту в період з 2013 по 2019 рр. складуть приблизно 25%. Проте, в абсолютному вираженні через мережі фіксованого зв'язку передається більше трафіку, чим через стільникового зв'язку.

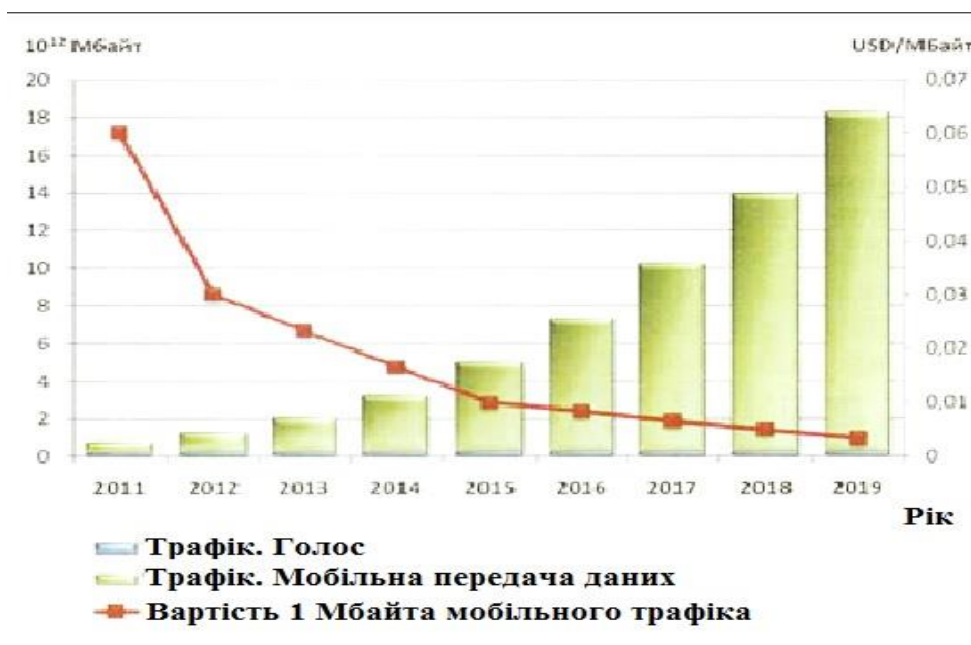


Рис. 1.6 Світові тенденції зростання трафіку даних

У 2013 р. на мобільний трафік даних припадала лише 5% загального об'єму трафіку, передаваного по дротових і бездротових мережах, і навіть до 2019 р. цей показник зростає лише до 12%.

Крім того, в результаті розвитку технічно великих сенсорних екранів і технологій побудови мобільних сайтів оператори фіксованого широкопasmового доступу втратили другу перевагу – зручну і швидку роботу Web-додатків на настільних комп'ютерах. Ще однією важливою особливістю мобільного Інтернету стала активна поява мобільних додатків – спеціальних програмних продуктів для планшетів і інших інтелектуальних пристроїв, які дозволили мати зручніший доступ до інформації, в порівнянні з Web-додатками.

Впровадження широкопasmових мереж бездротового доступу робить одночасно істотний вплив на економічний розвиток країни таким чином:

- збільшення користувачів на одну тисячу – створення нових 80 робочих місць;
- збільшення на 10% проникнень широкопasmових мереж бездротового доступу – збільшення ВВП на 1%;
- збільшення в два рази швидкості передачі даних в широкопasmових мереж бездротового доступу – збільшення ВВП на 0,3%;
- збільшення на 1% проникнень широкопasmових мереж бездротового

доступу

– збільшення на 3,5% реєстрацій нового бізнесу.

Крім того, серед економічних аспектів впливу розвитку бездротових широкосмугових систем зв'язку необхідно відзначити наступне:

- за оцінками експертів, внесок мобільного зв'язку у світову економіку досяг **3,6%** загального світового ВВП, вкладення в галузь склали минулого року **336** млрд. доларів, було створено **10,5** млн. робочих місць;

- згідно оцінці американських економістів, надання додаткових смуг частот для розвитку мобільних систем зв'язку в США дозволить створити **150 тис. робочих місць** і до 2021 р. за рахунок додаткових податків принесе в казну **\$ 4,5 млрд.**

В даний час ринок мобільної реклами характеризується зростанням числа успішних рекламних кампаній, високою активністю компаній, що полягає у великому числі злиття, поглинань, придбань і розробці нових проектів. Згідно прогнозам аналітиків компанії, доходи від мобільної реклами в 2015 році досягнуть **24 млрд. дол.**

1.1.2 Дані стану розвитку світового ринку мобільних телекомунікацій

1. Загальне число абонентів мобільного зв'язку на початок 2015 р. оцінювалося в 3,9 млрд. чоловік, що створюють 6,9 млрд. з'єднань. Кількість широкосмугових мобільних з'єднань – 2,4 млрд.

2. До 2020 р., за прогнозами, загальне число абонентів в світі досягне 6,1 млрд., з них 3,1 млрд. – абоненти мереж LTE і 2,3 млрд. – абоненти мереж HSPA.

3. Загальний об'єм відеотрафіку, який буде передано по мережах 3G/4G за п'ять років, з 2015 по 2020 р., зросте до 440 Екзабайт.

1.1.3 Особливості розвитку ринку мобільних послуг технології M2M

Дослідницька компанія Machina Research опублікувала прогноз розвитку ринку послуг M2M, згідно якому в світі в 2020 році в сегменті комунальних послуг число пристроїв, підключених за технологією M2M, збільшиться до 1,5 млрд. штук, а доходи складуть **24 млрд. Євро.**

У зв'язку з цим, на думку аналітиків компанії, оператори мереж рухомого зв'язку повинні направляти всі свої зусилля на встановлення прямих відносин з комунальними компаніями, виступаючи в ролі системних інтеграторів або сторонніх постачальників послуг, пропонуючи їм різні послуги, наприклад, контроль над пристроями і їх обслуговування, а не тільки надавати послуги з пропуску трафіку. Це дозволить операторам мереж рухомого зв'язку надавати послуги комунальним компаніям з кінця в кінець.

Згідно прогнозам аналітиків компанії, в 2020 році доходи від послуг з пропуску трафіку складуть всього 5% від загальних доходів комунальних послуг або **1,2 млрд. Євро.** На даний момент часу в світі в сегменті комунальних послуг налічується 100 млн. пристроїв, підключених за технологією M2M, які приносять дохід у розмірі 4 млрд. Євро, з яких, у свою чергу, 1% або 50 млн. Євро припадає на послуги з пропуску трафіку, що генерується в мережах рухомого зв'язку.

Прогнози, зроблені компанією Machina Research, показують, що щорічні доходи від надання послуг M2M в сегменті комунальних послуг досягнуть свого піку в 2017 році – **28 млрд. Євро.** Потім спостерігатиметься тенденція щодо зниження доходів. Динаміка доходів від надання послуг M2M в сегменті комунальних послуг з регіонів світу представлена на рис.1.7.

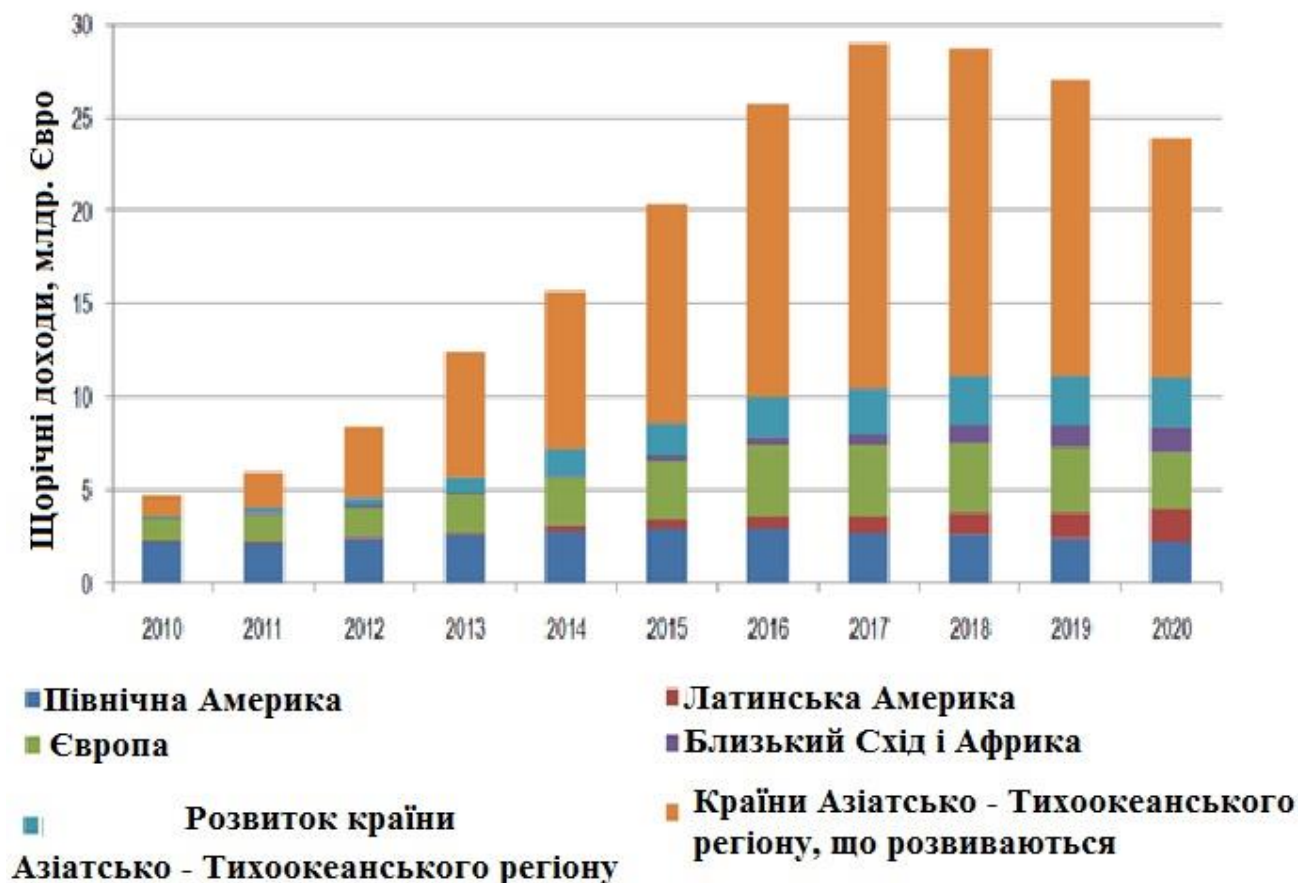


Рис.1.7 Динаміка доходів від надання послуг M2M в сегменті комунальних послуг з регіонів світу на період з 2010 по 2020 рр.

1.1.4 Мобільні широкопasmові мережі 4-го і 5-го поколінь

Проблема підвищення пропускної спроможності систем стільникового радіозв'язку призвела до створення, так званих стільникових систем четвертого покоління (4G). На відміну від стільникових систем попереднього третього покоління (3G), спочатку орієнтованих тільки на передачу голосових даних, тобто на мобільну телефонію, системи зв'язку 4G орієнтовані на універсальну (пакетну) передачу даних будь-якого типу [8-10]. Також, для підвищення швидкості і надійності передачі інформації одночасно великому числу абонентів, в системах 4G застосовується технологія множинного доступу з ортогональним частотним розділенням OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) [5] і просторово-часова обробка сигналів на багатоелементних приймально-передавальних адаптивних антенних решітках (MIMO, від англ. Multiple Input —

Multiple Output, що означає систему зв'язку з багатьма антенами на передавачі, тобто на вході каналу зв'язку, і багатьма антенами на приймачі, тобто на виході каналу зв'язку) [9,10]. Таким чином, принциповою відмінністю систем стільникового радіозв'язку четвертого покоління є застосування MIMO-OFDMA технології. В якості прикладу MIMO-OFDMA системи зв'язку можна привести розгорнену універсальну систему наземного радіодоступу E-UTRA (Evolved Universal Terrestrial Radio Access) Release-10/11 [11], відому під назвою Long Term Evolution — Advanced (LTE-A), а також стільникову систему радіозв'язку Wireless MAN-Advanced (стандарт IEEE 802.16m, відомий як WiMAX-Advanced) [8,9].

Стандарт LTE ґрунтується на застосуванні технології ортогонального частотного розділення каналів (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Ключовими характеристиками стандарту є: можливість передачі даних на великих швидкостях (цільове значення 1 Гбіт/с для низхідного напрямку), можливість роботи з абонентами, що пересуваються на швидкості до 350 км/ч, можливість масштабування смуги сигналу (1.4, 3, 5, 15, 15, 20 МГц), з 10 реліза підтримується агрегація до 5 несучих, що надає можливість створення системи зі смугою сигналу в 100 МГц і так далі[10] Ці особливості роблять стандарт LTE перспективним напрямом розвитку систем мобільного зв'язку, а дослідження даної області актуальними і затребуваними.

При розробці систем 4-го покоління переслідувалися наступні цілі (рис.1.8):

1. Максимально ефективне використання обмеженого радіочастотного ресурсу.
2. Плоска all-IP архітектура мережі, яка істотно знижує вартість передачі за мегабайт даних.
3. Новий радіоінтерфейс з новими технологіями передачі.

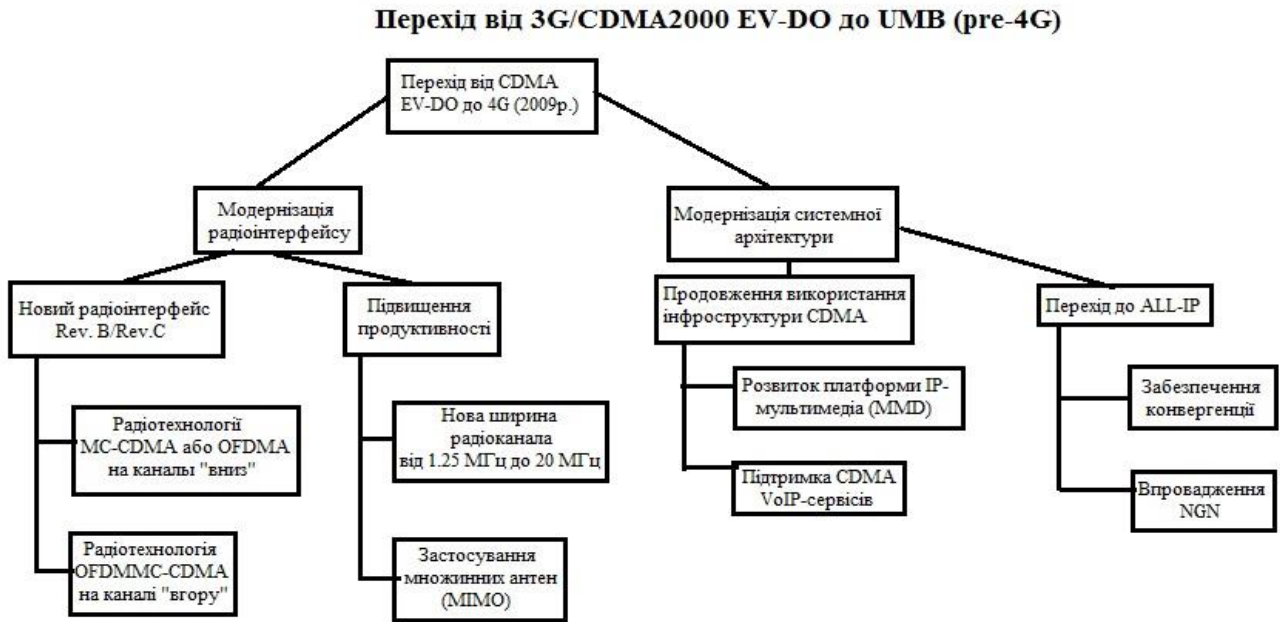


Рис.1.8 Технічні аспекти переходу від мобільних мереж 3G до мереж 4G

Базова архітектура мережі LTE складається з пакетного ядра мережі і мережі радіодоступу. Такі системи мають дуже високі показники спектральної ефективності і високошвидкісні механізми адаптації для забезпечення якості передачі відеотрафіку.

Згідно даним Всесвітнього мобільного конгресу 2015 року в світі працюють 364 комерційних мережі LTE в діапазонах 700 і 800 МГц, 1800 МГц; 2,3 і 3,5 ГГц і до теперішнього часу більше 30% абонентів LTE на території США і майже стільки ж – Китай (рис.1.9; табл.1.1).

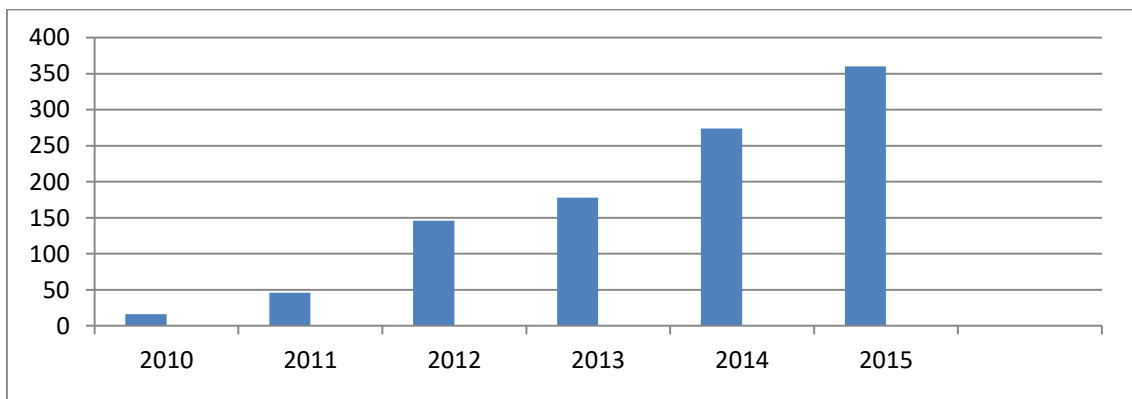


Рис. 1.9. Динаміка зростання мобільних мереж LTE

Таблиця 1.1

Число абонентів в мережах найбільших операторів LTE

Позиція	Оператор	Країна	Кількість LTE-з'єднань, млн.
1.	China Mobile	Китай	100,0
2.	Verizon Wireless	США	67,4
3.	AT&T Mobility	США	40,0
4.	NTT DoCoMo	Японія	15,9
5.	SK Telecom	Південна Корея	16,7
6.	Au (KDDI)	Японія	16,2
7.	«Велика трійка»	Росія	7,0

Зараз об'єм трафіку відеопослуг складає, за оцінками операторів, від 66 до 75% загального об'єму трафіку в мережах 4G, включаючи 33% на послуги YouTube і 34% - чисте відео, а також відеоспостереження (VideoSurveillance) в мережах M2M (рис.1.10). Крім того, до 2020 р. кількість M2M-підключень в мережах мобільних операторів буде зростати з показником CAGR = 45% і досягне 2,1 млрд. з'єднань.

З урахуванням зростаючої масовості (Massive M2M) послуги M2M теж превалюватимуть над базовими голосовими послугами в мережах 4G і 5G. Прогнози показують, що щорічні доходи від надання послуг M2M в сегменті комунальних послуг досягнуть свого піку в 2017 році – **28 млрд. Євро**. Підвищення спектральної ефективності в мережах 5G в 2-3 рази в порівнянні з мережами 4G може бути досягнуте за рахунок застосування не ортогональних методів доступу і не ортогональних сигналів (рис.1.11).

Паралельно з цими процесами початок XXI століття ознаменувався конверсією сенсорних мереж, створенням теорії і практичною реалізацією так званих всепроникаючих сенсорних мереж. Поява можливості взаємодії пристроїв між собою без участі людини поставила питання про необхідність розробки нової концепції розвитку мереж зв'язку загального користування.

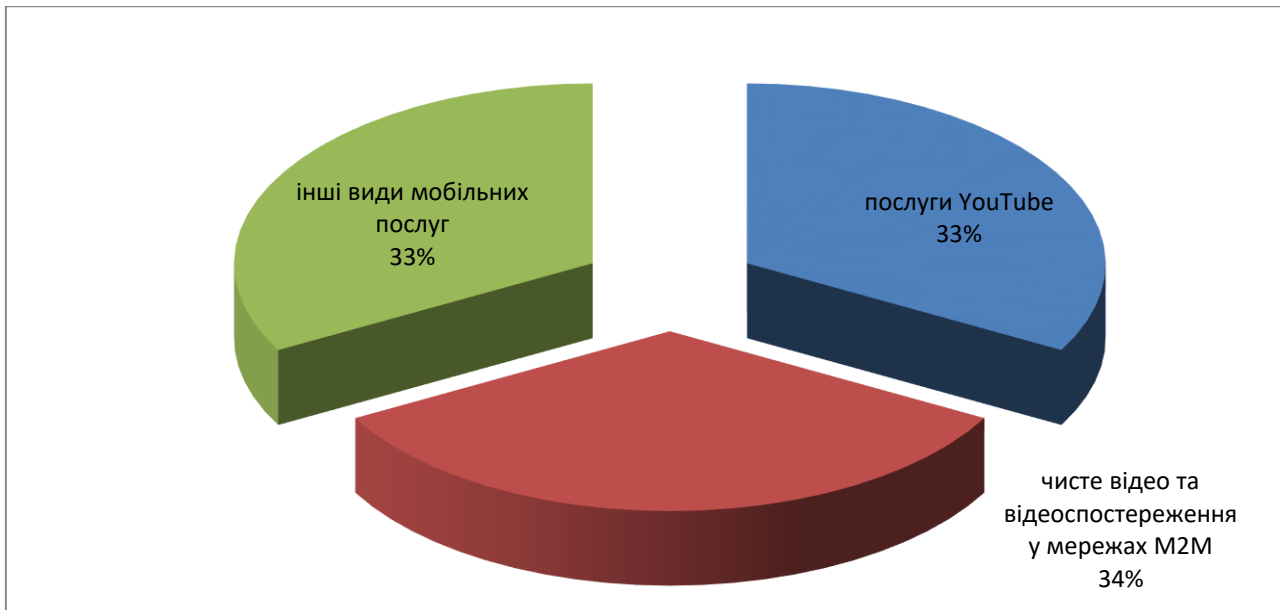


Рис.1.10 Розподіл загального трафіку в мережах 4-го покоління

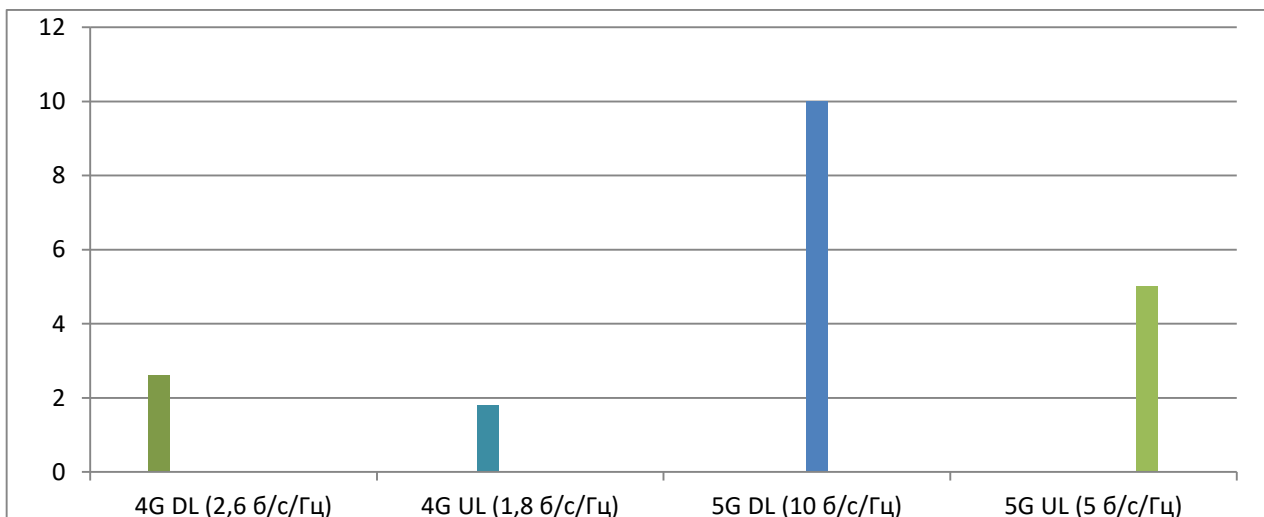


Рис. 1.11 Спектральна ефективність мереж 4-го і 5-го поколінь

Як вже наголошувалося, концепція мереж зв'язку наступного покоління, що чудово виправдала себе, разом з тим була розрахована на обслуговування кількох десятків мільярдів користувачів. Взаємодія ж пристроїв між собою примушує задуматися про побудову трильйонної мережі, тобто мережі, в якій число користувачів вимірюватиметься одиницями і десятками трильйонів. Така концепція отримала назву Інтернету **Речей**. Перш, ніж перейти до фундаментальних змін в мережах зв'язку при впровадженні концепції Інтернету Речей, зупинимося детальніше на характеристиках речей [11,12]. Подібно до дротового широкопasmового доступу, який є зараз найпоширенішим видом

підключення, 5G дає користувачеві високу швидкість доступу до Інтернету — до 10 Гбіт/с. Це дозволяє вмить викачувати великі файли (наприклад, фільми високої якості), дивитися відеоролики або телепередачі, брати участь в онлайн - іграх в мобільному режимі і так далі.

В кінці вересня 2015 року Європейський союз оголосив про досягнення важливої угоди з Китаєм, яка дозволить прискорити розробку і стандартизацію технологій для мобільних мереж п'ятого покоління. Сторони мають намір здійснювати сумісні дослідження і розробки, а також сприяти швидкому ухваленню глобальних стандартів в області 5G-связи. Аналогічні угоди Європейський союз вже уклав з Японією і Південною Кореєю. Єврокомісія в рамках ініціативи Horizon 2020 виділить **€700 млн.** на дослідження в області мобільного зв'язку п'ятого покоління. За наслідками засідання групи високого рівня Китаю також вирішила вкласти **€315 млрд. інвестицій** до Європи. Передбачається, що перші комерційні мережі 5G буде введено в експлуатацію в 2020 році. Для них вже визначена максимальна швидкість передачі даних - 20 Гбіт/с. Такі системи приведуть до появи відеопослуг нового покоління, а також інноваційних додатків, що працюють в реальному часі.

До середини періоду 2012-2020 рр. прогнозується в деяких країнах остаточне формування системи «електронного уряду» і аналогічних систем у сфері охорони здоров'я, освіти і інших сферах суспільного життя. Додатковими чинниками зростання в середньостроковій перспективі стане розповсюдження нових форм послуг в телебаченні по мірі переходу до цифрового стандарту віщання (інтерактивне телебачення) і форм видаленої роботи фахівців. Мабуть, найбільший вплив на ІТ-сектор надасть розвиток технологій з **loud computing** і їх розповсюдження у всіх сферах діяльності [12-14]. Оскільки вони позбавлять споживачів від необхідності зберігати і підтримувати локальне устаткування і програмні продукти, які можна буде отримувати дистанційно у постачальників обчислювальних ресурсів, це призведе до бурхливого розвитку ринку сервіс-провайдерів. Фактично дана технологія означає, що вся інформація зберігатиметься на декількох серверах у крупних компаніях, і ключовою її проблемою є питання збереження даних і національної безпеки. Таким чином,

розвиток вітчизняних технологій в цій сфері вельми затребуваний, оскільки він може бути могутнім імпульсом розвитку всього вітчизняного ІКК. В цілому в кінці періоду слід чекати посилення процесів формування нового технологічного ядра у сфері власного виробництва апаратних засобів, пов'язаних з переходом від елементної бази інформаційних технологій, заснованої на мікроелектроніці, до нано- та оптоелектроніки, забезпеченням доступу широкого кола користувачів до сучасних способів збору, зберігання, обробки і передачі всіх видів інформації в режимі реального часу.

1.2. Особливості побудови та функціонування бездротових самоорганізуючих мереж на основі технології SDR

1.2.1 Побудова та функціонування бездротових самоорганізуючих мереж

У традиційних мережах стільникового зв'язку другого і третього поколінь 2G/3G(2-th/3-th Generation) призначені для користувача пристрої не мають можливості взаємодіяти безпосередньо, використовуючи ліцензований спектр частот оператора бездротової мережі, оскільки всі взаємодії здійснюються через базові станції. У сучасних бездротових мережах четвертого і майбутнього, п'ятого, поколінь 4G/5G (4-th/5-th Generation) застосовується дворівнева модель стільникового зв'язку, який включає рівень макростільників (взаємодія пристрою з базовою станцією) і рівень взаємодії пристроїв (D2D, device-to-device). Оскільки пристрої можуть передавати дані безпосередньо один одному, практично не використовуючи ресурси мережі, на їх основі можна створювати однорангові мережі.

D2D взаємодії не типові для мереж попередніх 2G і 3G поколінь (мереж GSM і UMTS) і мають ряд особливостей. У дворівневих мережах, де інформація передається через призначені для користувача пристрої, особливу увагу необхідно приділяти показникам ефективності функціонування мереж. Для того, щоб скоротити до мінімуму дію, що впливає на продуктивність базових станцій,

необхідно використовувати раціональне управління інтерференцією взаємодіючих пристроїв і ефективні схеми розподілу радіоресурсів, принципи виділення яких для обслуговування запитів користувачів в мережах поколінь 4G/5G також принципово відрізняються від принципів, що використалися в мережах поколінь 2G/3G.

Стрімке зростання числа застосувань, що вимагають велику частку ресурсів мережі, наприклад, потокове відео і передача мультимедіа даних, привів до того, що існуючі стільникові мережі вже не можуть ефективно справлятися із запропонованим навантаженням. Протягом наступного десятиліття мобільним додаткам, таким як 3D-голографія або мовне телебачення високої чіткості, знадобиться швидкість передачі даних, яка принципово не може бути забезпечена мережами 4-го покоління. D2D-взаємодія є новим класом технологій бездротової взаємодії, в якій вузли мережі беруть участь в передачі даних один одному, що дозволяє скористатися перевагами децентралізованої архітектури однорангової мережі. Ця нова парадигма передачі даних дозволить підвищити продуктивність мереж шляхом підвищення ефективності розподілу ресурсів мережі і збільшення її пропускної спроможності.

Використання мережевих ретрансляторів дозволяє досягти деяких переваг, але повною мірою розвинути потенціал дворівневих мереж можливо тільки з використанням в якості ретрансляторів самих мобільних пристроїв. Під пристроєм в даному контексті розуміється мобільний телефон або який-небудь інший портативний (переносний) пристрій, наприклад, ноутбук або планшет, здатний взаємодіяти з бездротовою мережею передачі даних. З появою нових напрямів у сфері телекомунікаційних послуг, наприклад, що використовують визначення місцеположення, D2D-технології викликають все більший інтерес серед стільникових операторів. В найближчому майбутньому такі технології можуть бути використані для розвантаження локальної ділянки мережі, наприклад, стадіону або крупного торгово-розважального центру. Також вони можуть грати найважливішу роль у разі природних катаклізмів, коли основна мережа виведена з ладу, тоді як D2D-пристрої можуть підтримувати зв'язок

протягом невеликого проміжку часу, достатнього для проведення ремонтно-відновних робіт.

Сучасні бездротові технології, такі як WiFi або Bluetooth, дозволяють реалізувати деякі функціональні можливості D2D взаємодії. Але вони призначені для не ліцензованого спектру частот і інтерференція, що виникає при їх застосуванні, неприйнятна. До того ж вони не забезпечують того рівня якості обслуговування і безпеки, який надається в мережах стільникового зв'язку на базі технології LTE (Long Term Evolution). На етапі проектування рівня пристроїв застосовуються різні типи управління розподілом ресурсів між джерелом, ретрансляторами і приймачами даних в залежності від вибраної бізнес-моделі. Управління може бути повним, частковим або його може не бути зовсім. Виділяють наступні чотири типи управління.

Ретрансляція зі встановленням з'єднання під управлінням оператора (DR-OC, Device relaying with operator controlled link establishment). Пристрій, що знаходиться на межі стільника або в зоні з поганим покриттям, може взаємодіяти з базовою станцією за допомогою ретрансляції даних через інші пристрої в стільнику. Оператор взаємодіє з ретранслюючими пристроями для встановлення з'єднання з частковим або повним управлінням.

Пряма D2D-взаємодія з установленим з'єднанням під управлінням оператора (DC-OC, Direct D2 Dcommunication with operator controlled link establishment). Джерело і приймач обмінюються даними без участі базової станції, але оператор при цьому управляє процесом встановлення з'єднання.

Ретрансляція зі встановленням з'єднання під управлінням пристроїв (DR-DC, Device relaying with device controlled link establishment). Оператор не бере участь в процесі встановлення з'єднання, тому відповідальність за його підтримку лежить на самих пристроях.

Пряма d2d-взаємодія зі встановленням з'єднання під управлінням пристроїв (DC-DC, Direct D2D communication with device controlled link establishment). Джерело і приймач встановлюють пряме з'єднання, оператор при цьому не здійснює ніякого контролю. Тому ці пристрої повинні використовувати

ресурси мережі так, щоб гарантувати допустимий рівень інтерференції, що виникає при функціонуванні інших пристроїв в тому же макростільнику.

Одним з найважливіших завдань при розробці дворівневої архітектури є управління інтерференцією. У випадках управління типу DR-OC і DC-OC розподіл ресурсів і встановлення з'єднання здійснюються базовою станцією, яка в процесі управління інтерференцією може використовувати стандартні методи, використовувані в бездротових мережах. З іншого боку, у випадках управління DR-DC і DC-DC відсутній центральний елемент для управління D2D-взаємодією. Оскільки пристрої використовують загальний діапазон частот з користувачами рівня макростільника, то завдання управління інтерференцією є вельми актуальним.

З вище викладеного витікає, що актуальними є наступні завдання аналізу основних показників якості функціонування однорангових бездротових мереж взаємодіючих пристроїв на базі технології LTE:

1) Виділення радіоресурсів базової станції користувачам в об'ємах випадкового розміру, розрахунок вірогідності блокування запиту користувачів через брак ресурсу і розрахунок характеристик об'єму ресурсу, наданого для з'єднання.

2) Розрахунок характеристик інтерференції взаємодіючих пристроїв в бездротовій мережі, зокрема математичного очікування відношення сигнал-інтерференція пари взаємодіючих пристроїв.

В цьому розділі приведемо приклади постановок завдань, а в розділі 3 викладемо основні результати, отримані в дисертації в області побудови відповідних математичних моделей і аналізу їх ймовірнісних характеристик.

Розглянемо постановку завдання виділення ресурсів базової станції в об'ємах випадкового розміру. Розглядатимемо один стільник мережі у формі кола з центром в точці, де знаходиться базова станція, причому в більш загальному випадку можна розглядати стільник довільної форми. При цьому передбачається, що користувачі розподілені впродовж стільника рівномірно відповідно до деякого ізоморфного точкового процесу, наприклад, пуассонівським точковим процесом (PPP, Poisson Point Process). Можна

розглядати і нерівномірний розподіл користувачів в стільнику, наприклад, коли вони кластеризовані за деяким принципом.

Для обслуговування абонентів в стільнику бездротової мережі LTE застосовується автоматична система модуляційно-кодових схем з кінцевим безліччю можливих станів. Дані схеми визначають, яким чином дані кодуються і передаються від пристрою до базової станції і назад, дозволяючи динамічно змінювати швидкість ефективної передачі залежно від поточного значення відношення сигнал-шум. Залежно від потужності сигналу, що приймається, і наявності перешкод застосування певних схем може привести до неприпустимої кількості помилок, тоді необхідне застосування іншої схеми, що дозволяє передавати дані в цих же умовах, але з меншою підсумковою швидкістю і тим же споживанням радіоресурсів. Таким чином, користувачі бездротової мережі, передаючи дані на однаковій швидкості, споживають різні, взагалі кажучи, випадкові об'єми радіоресурсів. При цьому с.в. необхідного об'єму ресурсу може мати як дискретний, так і безперервний розподіл залежно від конкретних технічних аспектів, умов розповсюдження радіосигналу і інших умов. Схемний функціональна схема даного процесу для окремої базової станції бездротової мережі показана на рис. 1.12.

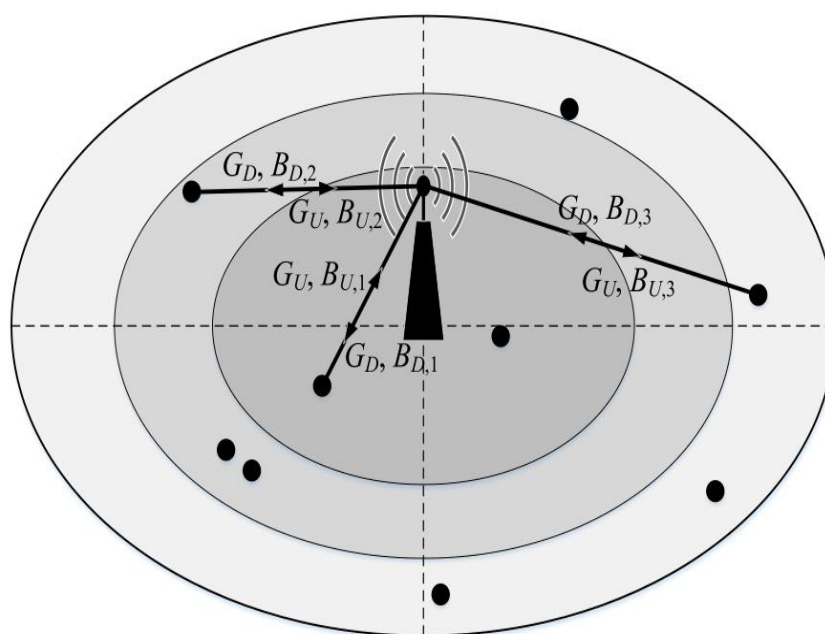


Рис. 1.12 Приклад виділення користувачам бездротової мережі радіоресурсів випадкового об'єму

G_U, G_D – постійна швидкість у висхідному (Uplink) і низхідному (Downlink) каналах

$B_{D,i}, B_{U,i}$ – кількість ресурсних блоків, необхідних для передачі даних i -го користувача

$$\begin{aligned} B_{D,3} > B_{D,2} > B_{D,1} \\ B_{U,3} > B_{U,2} > B_{U,1} \end{aligned}$$

Потужність сигналу, що приймається пристроєм користувача, в першу чергу залежить від відстані між передавачем і приймачем і умов поширення сигналу. У специфікаціях міжнародної стандартизації організації 3GPP (3-d Generation Partnership Project) і в рекомендаціях Міжнародного союзу електрозв'язку (МСЕ), що стандартизують технологію LTE, наведено ряд моделей загасання сигналу для різних ситуацій. Відповідно, вибір тієї чи іншої модуляційно-кової схеми для користувача можна визначити, ґрунтуючись на його просторовому розташуванні в стільнику. Припустимо, що всі абоненти вимагають для забезпечення своїх потреб G_U та G_D (Мбіт/с) постійної швидкості (constant bitrate) передачі у висхідному і низхідному каналах відповідно. Нагадаємо, що мінімальним резервним елементом для технології LTE є ресурсний блок (PRB, Physical Resource Block). Відповідно, швидкість передачі, необхідна для різних користувачів, може бути забезпечена різною кількістю ресурсних блоків в залежності від обраної модуляційно-кової схеми і для висхідного і низхідного каналів, $S_U \in MCS_U = \{S_{U,1}, \dots, S_{U,H_U}\}, S_D \in MCS_D = \{S_{D,1}, \dots, S_{D,H_D}\}$ де H_U і H_D - це число застосовуваних схем в висхідному і низхідному каналах відповідно. При цьому вибір самої схеми, як говорилося раніше, залежить від просторового розташування абонента, а це означає, що кількість ресурсних блоків B_U і B_D , необхідних для забезпечення потрібної швидкості G_U і G_D , буде випадковим чином прямо залежати від того, як розташовані користувачі.

Отже, в системі є два типи ресурсів – набір ресурсних блоків, які можна використовувати у висхідному каналі і низхідному каналі відповідно, кількість яких обмежена діапазоном частот, виділеним операторові бездротової мережі. Вимогами запитів користувачів є швидкості G_U і G_D які можуть бути

перераховані в еквівалентні ресурсні блоки залежно від розташування користувачів в стільнику. Для цієї системи шуканими показниками якості функціонування є коефіцієнт використання системи та ймовірність блокування запиту користувача через брак ресурсів. Можливим розширенням моделі є облік одного або декількох наступних аспектів: різні вимоги для різних груп абонентів; дослідження різних процесів розташування користувачів, наприклад, їх кластеризація за різними критеріями; наявність зон обслуговування з можливістю доступу до декількох бездротових мереж і ін.

Таким чином, завдання полягає в побудові і аналізі моделі стільниці бездротової мережі LTE у вигляді багатолінійної системи масового обслуговування (СМО) з втратами, викликаними браком ресурсів, необхідних для обслуговування заявок. Прийнята на обслуговування заявка займає випадковий об'єм ресурсів декількох типів із заданими функціями розподілу. Випадкові вектори, що описують вимоги заявок до ресурсів, не залежать від процесів надходження і обслуговування заявок, незалежні в сукупності і однаково розподілені.

1.2.2 Архітектура програмно-конфігурованого радіо

В результаті розвитку обчислювальної техніки та мікроелектроніки і впровадження їх в радіотехнології активного розвитку набув напрямок, названий програмно-конфігурованим радіо (SDR) [9, 116]. Вважається, що SDR є новою технологією побудови радіосистем, при якій певна частина обробки сигналу відбувається в цифровому вигляді за допомогою програмних засобів.

Перехід від аналогових сигналів до цифрових здійснюється за рахунок аналого-цифрових і цифро-аналогових перетворювачів (АЦП і ЦАП відповідно). У міру зростання швидкості роботи перетворювачів і мікропроцесорних обчислень поступово збільшувалися верхня межа частотного діапазону і смуга сигналу, доступна для цифрової обробки. Якщо в перших SDR системах прийнятий сигнал оцифровувався на проміжній частоті, яка складала сотні кілогерц, то в сучасних SDR системах повністю цифрова обробка здійснюється

для частот до 50 МГц. В результаті в цьому частотному діапазоні на одній апаратній платформі може бути створено безліч радіосистем, що виконують різні функції, такі як: зв'язок, локація, зондування та інше. Отже, на сьогоднішній день для радіосистем є можливість виконання над сигналом всіх операцій (синтез, модуляція, демодуляція і фільтрація) тільки в цифровому вигляді.

SDR технологія передбачає перетворення комплексних (квадратурних) сигналів. У загальному випадку смуговий комплексний сигнал можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned}\hat{u}(t) &= u(t) * \exp[j2\pi f_c t] = u_0(t) * \exp[j\theta(t)] * \exp[j2\pi f_c t] \\ &= \operatorname{Re}\hat{u}(t) + j\operatorname{Im}\hat{u}(t),\end{aligned}$$

де, $\hat{u}(t)$ – комплексний сигнал, $u(t)$ – його комплексна амплітуда (огинача), $u_0(t)$ модуль, і $\theta(t)$ фаза сигналу, f_c – несуча частота (або частота підставки).

Для комплексної амплітуди вводять поняття синфазної ($Iu(t)$) і квадратурної ($Qu(t)$) компонент:

$$Iu(t) = u_0(t) * \cos[\theta(t)]$$

$$Qu(t) = u_0(t) * \sin[\theta(t)] \quad \text{або} \quad u(t) = Iu(t) + jQu(t)$$

При модуляції комплексна огинача множиться на $\exp[j2\pi f_c t]$, в результаті її спектр переноситься на несучу, а при демодуляції комплексний сигнал множиться $\exp[-j2\pi f_c t]$ і його спектр переноситься в область низьких частот. У теорії зв'язку [9] комплексну огиначу прийнято називати низькочастотною моделлю сигналу.

Для використання комплексних сигналів на практиці необхідно мати два канали його перетворення: один для дійсної частини, а інший для уявної. Апаратно це досягається в системах з квадратурною обробкою. Найбільш ефективно з погляду точності перетворення це вдається реалізувати при цифровій обробці. При цьому радіоканал надає можливість для передачі тільки однієї складової комплексного сигналу (забезпечується тільки один канал перетворення). Вважається, що в радіоканалі поширюється дійсна складова комплексного сигналу $\operatorname{Re}\hat{u}(t) = u_0(t) * \cos[j2\pi f_c t + \theta(t)]$.

Тому алгоритм модуляції і демодуляції будують з урахуванням даної обставини. З математичної точки зору в цьому випадку необхідно вирішити наступні два завдання [117].

Завдання 1. Дано квадратурні компоненти комплексної амплітуди сигналу, а також функції $\cos[2\pi fct]$ і $\sin[2\pi fct]$. Потрібно знайти функцію $Re\hat{u}(t) = u_0(t) * \cos[j2\pi fct + \theta(t)]$

Завдання 2. Дана функція $Re\hat{u}(t) = u_0(t) * \cos[j2\pi fct + \theta(t)]$, а також функції $\cos[2\pi fct]$ і $\sin[2\pi fct]$. Потрібно знайти квадратурні компоненти комплексної амплітуди $Iu(t) = u_0(t) * \cos[\theta(t)]$ $Qu(t) = u_0(t) * \sin[\theta(t)]$.

Перше завдання вирішується шляхом застосування формули:

$$Re\hat{u}(t) = Iu(t) * \cos\omega_c t + Qu(t) * (-\sin\omega_c t)$$

Таку формулу в апаратурі реалізує квадратурний підвищувальний перетворювач (рис. 1.13).

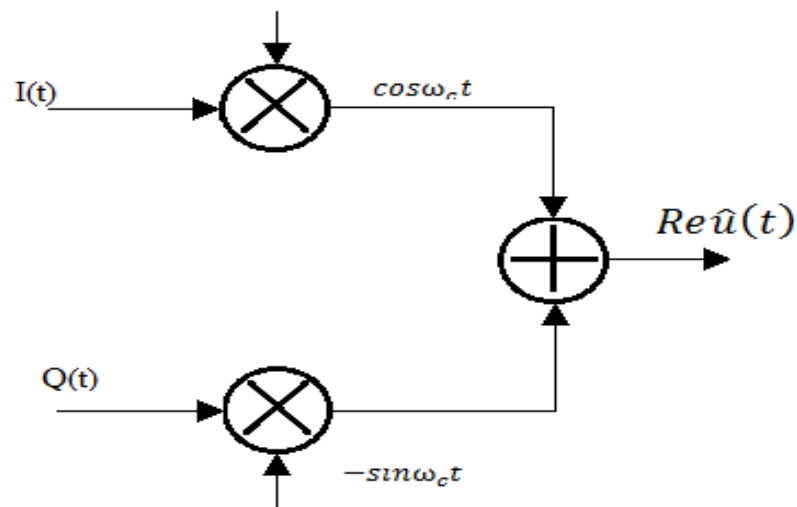


Рис. 1.13. Квадратурний підвищувальний перетворювач

Друге завдання вирішується шляхом таких тригонометричних перетворень:

$$u_0(t) \cos[\omega_c t + \theta(t)] \cos \omega_c t = \frac{u_0(t)}{2} [\cos \theta(t) + \cos(2\omega_c t + \theta(t))] = \frac{1}{2} [I_u(t) + \cos(2\omega_c t + \theta(t))];$$

$$u_0(t) \cos[\omega_c t + \theta(t)] (-\sin \omega_c t) = \frac{u_0(t)}{2} [\sin \theta(t) - \sin(2\omega_c t + \theta(t))] = \frac{1}{2} [Q_u(t) - \sin(2\omega_c t + \theta(t))].$$

Сигнали з подвійною несучою можна придушити за допомогою ФНЧ,

розташованого у синфазний та квадратурний канали. У результаті фільтрації функцій матимемо квадратурні компоненти комплексної огибаючої (рис. 1.14)

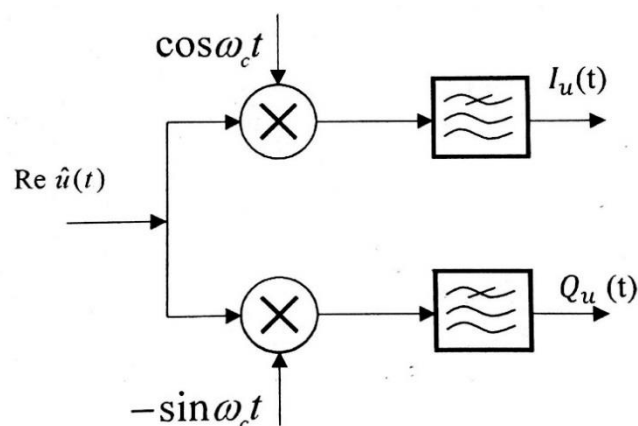


Рис. 1.14 – Квадратурний понижуючий перетворювач

В результаті проведеного аналізу видно, що на вході та виході радіосистеми присутні квадратурні компоненти комплексної огибаючої, тобто низькочастотна модель сигналу. Тому в теорії зв'язку [9] прийнято розглядати перетворення низькочастотної моделі сигналу, коли радіоканал заданий низькочастотною моделлю його системних характеристик.

Цьому алгоритму демодуляції повністю відповідний метод прямого перетворення частоти при прийманні. Приймач та передавач, що реалізують ці алгоритми модуляції та демодуляції (вирішення завдань 1 та 2) у SDR технології схематично представлені на рисунку 1.15.

В передавачі ПК (персональний комп'ютер) формує комплексну амплітуду, а в приймачі – реалізує обробку комплексної огибаючої ПЛІС (програмована логічна інтегральна схема) в першому випадку виконує перенесення спектру комплексної огибаючої на частоту підставлення, а у другому – перенос спектру сигналу в область низьких частот. АЦП та ЦАП дозволяють перетворити цифровий сигнал в аналоговий – для передавання та навпаки при прийманні. Метод прямого перетворення дозволяє використати режим «АЦП до антени». Вхідний та прикінцевий ФНЧ необхідні при цифровій (дискретній) обробці.

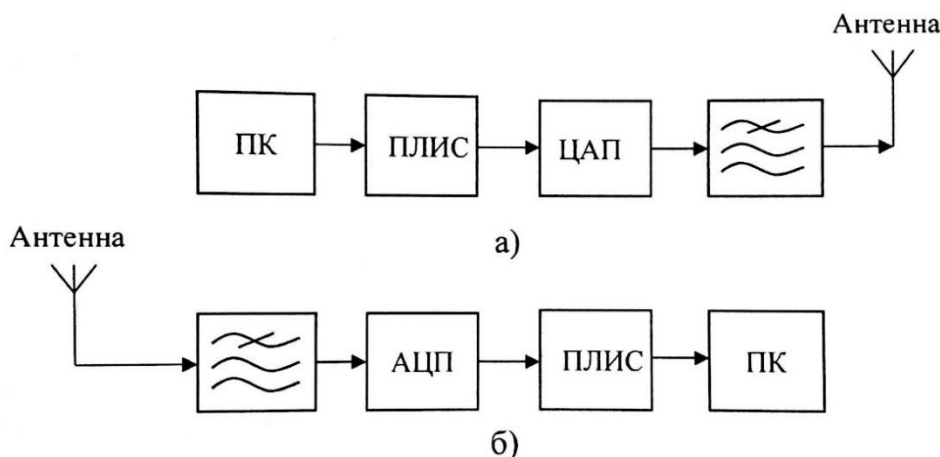


Рисунок 1.15 Типова структурна схема повністю цифрової SDR:

а) радіопередавач; б) радіоприймач [25]

Представлений вище алгоритм володіє універсальністю, тобто може використовуватися в радіосистемах різного призначення (зв'язку, локації, зондування). Розглянемо найбільш відомі апаратні SDR системи з повністю цифровою обробкою сигналу [106]:

- універсальна апаратна платформа USRP N210 компанії Ettus Research;
 - цифровий приймач WR-G33DDC 'EXCALIBUR Pro' компанії Winradio;
 - радіоаматорський трансивер FLEX-3700 компанії FlexRadio Systems.
- Основні параметри цих систем вказані в таблиці 1.2.

Перевага платформи USRP перед іншими полягає в більш широкій смузі приймального каналу, більш гнучкій апаратній платформі, побудованій по модульному принципу, більш широкій підтримці програмного забезпечення для керування апаратурою та обробки сигналу, в тому числі з відкритим початковим кодом. Для підсилення сигналу передавача можна використати зовнішній підсилювач потужності. Завдяки змінним дочірнім платам, система може працювати в різноманітних діапазонах до 6 ГГц. Для КХ діапазону підходять плати LRFX та LTFX для приймання та передавання відповідно. На цих платах реалізовані ФНЧ.

Основні характеристики SDR систем

Параметр	USRP N210	WR-G33DDC 'EXCALIBUR Pro'	FLEX-6700
Частота дискретизації АЦП, МГц	100	100	245,76
Розрядність АЦП, бит	14	16	16
Смуга приймального каналу, МГц	до 25	до 2	до 0,192
Рівень вихідної потужності передавача, Вт	до 0,01	ні	до 100
Синхронізація опорної частоти та часу по GPS	так	ні	так
Програмне забезпечення	GNU Radio, LabVIEW, Matlab	WinRADIo Advanced Digital Suite	SmartSDR

На рисунку 1.16 представлена структурна схема платформи USRP N210.



Рис 1.16 – Структурна схема платформи USRP в конфігурації для КХ діапазону

Материнська плата USRP N210 забезпечує перетворення аналогового сигналу в цифровий та навпаки, та цифрове перетворення частоти вгору та вниз (DUC та DDC) у заданій смузі частот, та синхронізацію дискретних відліків сигналу з часовою шкалою через вбудований GPS модуль.

На рисунку 1.17 приведена фотографія пристрою, яка засвідчує його невеликі габарити, що важливо для створення мобільної системи діагностики КХ радіоканалу.

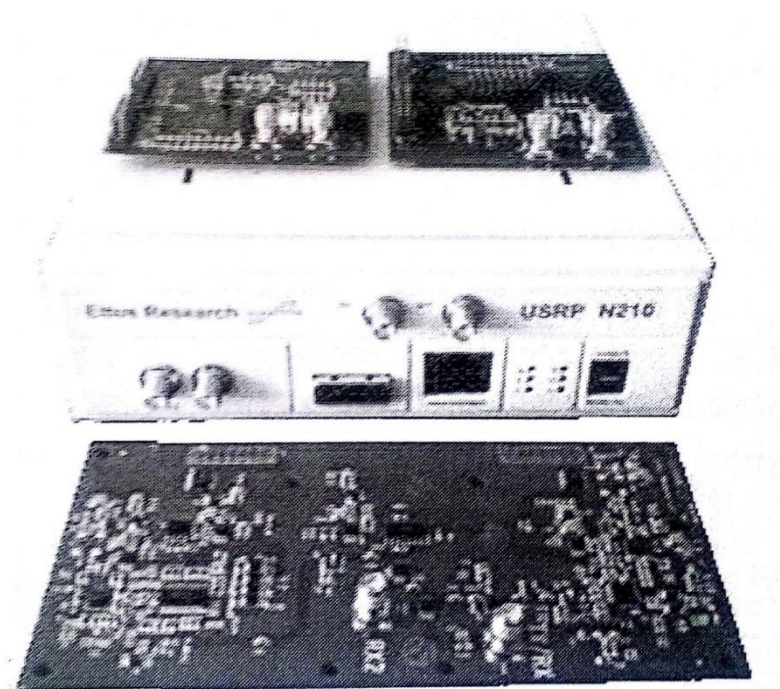


Рис 1.17 – Пристрій USRP з материнською та дочірніми платами

Функціональні можливості деяких систем зв'язку та радіолокації, реалізовані на платформі USRP, були досліджені та довели свою перспективність. Невирішеним актуальним науковим завданням є завдання створення на базі USRP і відкритого програмного забезпечення GNU Radio самоорганізуючої мережі. Однак для цього потрібне рішення ряду науково-технічних завдань, таких як: удосконалення моделі радіоканалу, методу діагностики на випадок запропонованого радіосигналу, алгоритму його оптимальної обробки у радіосистемі.

1.3 Математична модель розрахунку мобільності децентралізованої бездротової мережі

1.3.1 Постановка задачі

Різноманітність технологій радіо доступу та збільшення числа мультистандартних абонентських пристроїв дозволяють сьогодні інтегрувати різні технології доступу в єдину мережу для створення гетерогенної (неоднорідної) бездротової мережі. Така мережа складається з сегментів різних технологій радіодоступу, зони покриття яких накладаються. Це дозволяє збільшити пропускну здатність мережі і розширити зону її покриття, а для мобільних терміналів надавати зв'язок з необхідною якістю. На відміну від традиційної клієнт-серверної архітектури накладені мережі, що самоорганізуються, як правило, утворені безліччю рівноправних вузлів, кожен з яких може виражатись як в ролі клієнта, так і в ролі сервера. Яскравим прикладом такої архітектури є P2P-мережі (peer-to-peer) [15,16]. Будь-який вузол даної мережі не гарантує своєї присутності на постійній основі, довільно підключаючись / відключаючись від мережі. Реалізація такого підходу дозволяє значно підвищити відмовостійкість, пропускну здатність і теоретично зберігати працездатність мережі при будь-якій кількості і поєднанні доступних вузлів.

Adhoc або децентралізовані мережі (ДМ) - це зазвичай бездротові локальні (міські або персональні) мережі, в яких вузли (мобільні абоненти) мають однаковий статус (однорангові) і мають можливість вільно обмінюватися повідомленнями з іншими абонентами мережі в межах зони радіопрозорості. Оскільки при переміщенні такі вузли можуть виходити за межі радіопрозорості, в мережах використовується можливість ретрансляції пакетів до одержувача через інших абонентів мережі (багатострибкова передача). Згідно з таким підходом кожен мобільний термінал (МТ) епізодичної мережі діє як передавач, приймач і ретранслятор повідомлень. Функція ретранслятора передбачає прийом радіосигналу, посилення його і передачу далі, в епізодичній мережі до цих функцій МТ додається ще і функція маршрутизації. Локальний характер мережі

обумовлений тільки обмеженнями на поширення сигналу в межах прямої видимості та енергетичними обмеженнями на ретрансляцію.

Велика потреба в таких мережах знайшла відображення в стандартах бездротових мереж, наприклад в стандарті IEEE 802.11, відомому під комерційною маркою Wi-Fi. У цьому стандарті мережі adhoc створюються з однотипних пристроїв і використовують розподілене управління, при цьому кожна станція знаходиться в зоні безпосереднього радіоприймання всіх інших станцій. З моменту публікації першої версії стандарту в 1997 р. з'явилося безліч нових завдань, які вимагали забезпечення безперебійної роботи рухомих станцій і розширення зони покриття мережі. Розширення зони покриття мережі означає, що деякі станції зв'язкової мережі знаходяться поза зоною радіоприймання один одного, тому для доставки пакетів між ними потрібно ретрансляція пакетів через проміжні станції. Таким чином, розширення зони покриття мережі призводить до переходу від однокрокової мережі до багатокрокової. Технологіями, що забезпечують роботу рухомих станцій в багатокрокової мережі, стали, оформлена у вигляді специфікацій організації IETF технологія мобільних adhoc мереж (мереж MANET) і технологія mesh-мереж стандарту IEEE 802.11s (мереж Wi-FiMesh).

Основною проблемою такої мережі з рухомими абонентами є підтримання «зв'язності», «доступності» абонентів в єдиному мережевому просторі. Через рухливість абонентів маршрут передачі інформації постійно змінюється і важко передбачуваний. Проблема вибору адекватного алгоритму маршрутизації - одна з найважливіших для побудови ефективних епізодичних мереж [17]. Також, важливе питання при проектуванні подібної мережі полягає в можливості організувати роботу мережі таким чином, щоб в умовах непередбачуваного переміщення вузлів гарантувати доставку повідомлення адресату в будь-якому напрямку, тобто забезпечити зв'язність мережі з урахуванням ретрансляції. Це завдання вирішується шляхом моделювання і оцінювання радіопрозорості вузлів при трансформації мережі, вироблення рекомендацій з управління мережею для забезпечення якості обслуговування (QoS, Quality of Service).

У таких системах передбачається прийом сигналів абонентами, які знаходяться в різноманітних транспортних засобах. Однією із проблем, що виникають при розробці цих систем, є оцінка впливу швидкості руху транспортного засобу на якість прийому сигналів. Такому аналізу присвячений ряд робіт [18,19]. Отримані в цих роботах результати засновані на методі математичного моделювання пристроїв прийому сигналів. Крім того, аналіз публікацій з даної тематики, включаючи нормативні документи, дає вельми суперечливі відомості щодо величини максимально допустимої швидкості переміщення МТ, що часто пов'язано з неоднозначністю визначення умов експлуатації, тобто середовища поширення радіохвиль.

У [19,20] для оцінки можливостей функціонування таких типів радіосистем в умовах мобільного прийому було запропоновано в якості системного критерію мобільності вибрати показник $[f_{d3dB} \cdot T_s]$, де f_{d3dB} - доплерівська частота, за якої необхідне для забезпечення нормативної якості послуг зв'язку, відношення С/Ш в каналі перевищує своє номінальне значення на 3 дБ; T_s - тривалість символу. Але треба зазначити, що такий критерій являє собою цілком емпіричну оцінку, одержувану шляхом імітаційного моделювання або польових випробувань в умовах радіозв'язку, максимально наближених до реальних. При всіх своїх перевагах цей підхід не дозволяє оцінити динаміку змін пропускної здатності й об'єму переданих даних, який реально може обслужити децентралізована мережа за період зміни своєї структури.

Таким чином, в даний час залишається актуальною задача розробки методів аналізу ефективності механізмів доставки даних, використовуваних в мережах Wi-FiMesh при передачі потокових даних, що дозволяють зробити оцінку ефективності цих механізмів і налаштувати їх для виконання вимог до якості обслуговування трафіку.

1.3.2. Модель розрахунку мобільності самоорганізованої бездротової мережі

В результаті проведеного аналізу для кількісної оцінки ступеня мобільності пропонується використовувати відношення $[Q_r / Q_{\max}]$,

Q_r - об'єм повідомлень, який реально може обслужити децентралізована мережа за період зміни своєї структури;

Q_{\max} - потенційно можливий об'єм повідомлень, який здатна обслужити децентралізована мережа за той же час в стаціонарному режимі.

$$\text{При цьому} \quad Q_{\max} = Q_{\max} \cdot T_o; \quad (1.1)$$

$$Q_r = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (1.2)$$

де T_o - період часу зміни структури ДМ;

n - кількість станів, в яких може знаходитись ДМ за середній час T_o ;

C_i - пропускна здатність ДМ в i -му стані;

t_i - середній час знаходження ДМ в i -му стані.

Радіозасоби ДМ можуть пересуватися в довільні моменти часу, а час пересування і час їх роботи мають випадкову тривалість. Отже, зміни структури ДМ в ході її функціонування можна описати випадковим процесом. Так як для будь-якого розглянутого моменту часу ймовірнісні характеристики цього процесу в майбутньому залежатимуть тільки від того, коли і як система перейшла в цей стан, то такий процес можна вважати марковським.

Ймовірність переходу P_{ij} (ймовірність того, що процес у момент часу $t + \Delta t$ буде перебувати в стані S_j , за умови, що в момент часу t він знаходиться в стані S_i), визначатиметься з виразу:

$$P_{ij} = P \left\{ \begin{matrix} t + \Delta t \\ S_j \end{matrix} \middle| \begin{matrix} t \\ S_i \end{matrix} \right\} = \lambda_{ij} \Delta t + O(\Delta t), \quad (1.3)$$

де λ_{ij} - інтенсивність переходів (середнє число переходів за одиницю часу)

Δt - проміжок часу, протягом якого ми спостерігаємо за ДМ в очікуванні переходу з одного стану в інший

$O(t)$ - величина, нескінченно мала в порівнянні з Δt .

Таким чином, процес зміни структури ДМ, що полягає в переміщенні радіозасобів ДМ до нових місць, можна уявити однорідним марковським процесом з безперервним часом і кінцевою безліччю станів.

Для ймовірностей $P_i(t)$ знаходження ДМ в i -х станах будуть справедливі рівняння Колмогорова – Чепмена[21]:

$$\begin{aligned}
 \frac{dP_1(t)}{dt} &= -(\lambda_{1,2} + \lambda_{1,3})P_1(t) + \lambda_{14,1}P_{14}(t) \\
 \frac{dP_2(t)}{dt} &= -\lambda_{2,4}P_2(t) + \lambda_{1,2}P_1(t) \\
 \frac{dP_3(t)}{dt} &= -(\lambda_{3,4} + \lambda_{3,6})P_3(t) + \lambda_{1,3}P_1(t) \\
 \frac{dP_4(t)}{dt} &= -(\lambda_{4,5} + \lambda_{4,7})P_4(t) + \lambda_{2,4}P_2(t) + \lambda_{3,4}P_3(t) \\
 \frac{dP_5(t)}{dt} &= -\lambda_{5,8}P_5(t) + \lambda_{4,5}P_4(t) \\
 \frac{dP_6(t)}{dt} &= -(\lambda_{6,7} + \lambda_{6,10})P_6(t) + \lambda_{3,6}P_3(t) \\
 \frac{dP_7(t)}{dt} &= -(\lambda_{7,8} + \lambda_{7,11})P_7(t) + \lambda_{4,7}P_4(t) + \lambda_{6,7}P_6(t) \\
 \frac{dP_8(t)}{dt} &= -(\lambda_{8,9} + \lambda_{8,12})P_8(t) + \lambda_{5,8}P_5(t) + \lambda_{7,8}P_7(t) \\
 \frac{dP_9(t)}{dt} &= -\lambda_{9,13}P_9(t) + \lambda_{8,9}P_8(t) \\
 \frac{dP_{10}(t)}{dt} &= -\lambda_{10,11}P_{10}(t) + \lambda_{6,10}P_6(t) \\
 \frac{dP_{11}(t)}{dt} &= -\lambda_{11,12}P_{11}(t) + \lambda_{10,11}P_{10}(t) + \lambda_{7,11}P_7(t) \\
 \frac{dP_{12}(t)}{dt} &= -\lambda_{12,13}P_{12}(t) + \lambda_{8,12}P_8(t) + \lambda_{11,12}P_{11}(t) \\
 \frac{dP_{13}(t)}{dt} &= -\lambda_{13,14}P_{13}(t) + \lambda_{9,13}P_9(t) + \lambda_{12,13}P_{12}(t) \\
 \frac{dP_{14}(t)}{dt} &= -\lambda_{14,1}P_{14}(t) + \lambda_{13,14}P_{13}(t)
 \end{aligned} \tag{1.4}$$

Рівняння для ймовірностей станів $P_i(t)$ складаються, використовуючи граф станів ДМ. Усі вхідні інтенсивності враховуються зі знаком плюс, вихідні - зі

знаком мінус. Крім цього, для ймовірностей станів $P_i(t)$ повинна виконуватися умова нормування:

$$P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_5(t) + P_6(t) + P_7(t) + P_8(t) + P_9(t) + P_{10}(t) + P_{11}(t) + P_{12}(t) + P_{13}(t) + P_{14}(t) = 1 \quad (1.5)$$

Якщо припустити, що процес функціонування ДМ стаціонарний в часі, то система диференціальних рівнянь перетвориться в систему лінійних алгебраїчних рівнянь.

Після відповідних перетворень система рівнянь буде мати вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_{14,1}P_{14} - (\lambda_{1,2} + \lambda_{1,3})P_1 = 0 \\ \lambda_{1,2}P_1 - \lambda_{2,4}P_2 = 0 \\ \lambda_{1,3}P_1 - (\lambda_{3,4} + \lambda_{3,6})P_3 = 0 \\ \lambda_{3,4}P_3 + \lambda_{2,4}P_2 - (\lambda_{4,5} + \lambda_{4,7})P_4 = 0 \\ \lambda_{4,5}P_4 - \lambda_{5,8}P_5 = 0 \\ \lambda_{3,6}P_3 - (\lambda_{6,7} + \lambda_{6,10})P_6 = 0 \\ \lambda_{6,7}P_6 + \lambda_{4,7}P_4 - (\lambda_{7,8} + \lambda_{7,11})P_7 = 0 \\ \lambda_{7,8}P_7 + \lambda_{5,8}P_5 - (\lambda_{8,9} + \lambda_{8,12})P_8 = 0 \\ \lambda_{8,9}P_8 - \lambda_{9,13}P_9 = 0 \\ \lambda_{6,10}P_6 - \lambda_{10,11}P_{10} = 0 \\ \lambda_{7,11}P_7 + \lambda_{10,11}P_{10} + \lambda_{11,12}P_{11} = 0 \\ \lambda_{11,12}P_{11} + \lambda_{8,12}P_8 - \lambda_{12,13}P_{12} = 0 \\ \lambda_{12,13}P_{12} + \lambda_{9,13}P_9 - \lambda_{13,14}P_{13} = 0 \\ \lambda_{13,14}P_{13} - \lambda_{14,1}P_{14} = 0 \end{array} \right. \quad (1.6)$$

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 + P_9 + P_{10} + P_{11} + P_{12} + P_{13} + P_{14} = 1$$

Вирішуючи дану систему рівняння методом Гауса, можна визначити шукані ймовірності P_i знаходження ДМ в довільному стані.

Згідно посиленому закону великих чисел, час знаходження ДМ в i -ому стані обчислюється з виразу: $t_i = P_i T_0$

Пропускні здатності C_i ДМ i -х станах і інтенсивності переходів λ_{ij} , задаються відповідно в реальних умовах функціонування ДМ.

Як відомо, в широкосмугових OFDM системах радіозв'язку висока швидкість досягається шляхом паралельної передачі даних по N частотним підканалам (піднесучих). Тоді, використовуючи залежності [22], знайдемо пропускну здатність OFDM системи C :

$$\begin{aligned}
 C &= \int_{\Delta f} \log_2 \left(1 + \frac{S(f)}{N(f)} \right) df = \sum_{j=1}^N \int_{\Delta f} \log_2 \left(1 + \frac{S_j(f)}{N_j(f)} \right) df = \\
 &= \sum_{j=1}^N \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{P_j^R}{\sigma_{nj}^2} \right) = \Delta f \sum_{j=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{\lambda_j P_j}{\sigma_{nj}^2} \right) = \\
 &= \Delta f \sum_{j=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{\lambda_j^2 P_j}{\sigma_{nj}^2} \right) \left[\frac{\text{біт}}{\text{с}} \right],
 \end{aligned} \tag{1.7}$$

де P_j^R - потужність сигналу на вході приймача;

σ_{nj}^2 - потужність адитивного шуму;

P_j - вихідна потужність сигналу;

λ_j - коефіцієнт посилення каналу по потужності, μ_j - амплітуда комплексного коефіцієнта передачі каналу на j -й піднесучій;

$S(f)$ - спектральна щільність сигналу;

$N(f)$ - спектральна щільність адитивного гаусовських шуму,

Δf - ширина смуги сигналу на піднесучій.

Отже, пропускну здатність OFDM системи може бути представлена як сума пропускну здатностей частотних підканалів (піднесучих), для кожного з яких справедлива формула Шеннона [22-25].

Оскільки пропускну здатність каналу зв'язку залежить від амплітуди комплексних коефіцієнтів передачі на кожній піднесучій, то сама пропускну здатність є випадковою величиною, розподіл якої визначається розподілом сукупності значень.

У [23-25] досліджується вплив одночасно швидких і повільних завмирань на пропускну здатність каналу OFDM систем, що дозволяє оцінити ефективність застосовуваних способів боротьби з ними і вибрати параметри приймально-передавальних пристроїв при проектуванні радіосистем.

При дослідженні пропускну здатності радіоканалу зв'язку OFDM системи була використана статистична модель каналу, основана на наступних припущеннях:

- канал зв'язку є випадковим квазістаціонарним широкосмуговим частотно-селективним;

- значення амплітуди комплексних коефіцієнтів передачі каналу на всіх піднесучих є статистично незалежними, однаково розподіленими випадковими величинами;

- амплітуди комплексних коефіцієнтів передачі каналу на всіх піднесучих розподілені за такою залежністю, яка враховує швидкі і повільні завмирання [25]:

$$W(x) = \frac{4}{\Gamma(m)\Gamma(m_1)} \left(\frac{mm_1}{\Omega}\right)^{\frac{m+m_1}{2}} \times x^{m+m_1-1} K_{m-m_1}\left(2x^2 \frac{mm_1}{\Omega}\right), \quad (1.8)$$

де $K_\nu(z) = K_{m-m_1}\left(2x^2 \frac{mm_1}{\Omega}\right)$ - модифікована функція Бесселя;

$\Gamma(m) = (m-1)! = \int_0^\infty t^{m-1} e^{-t} dt$ - гамма функція;

Ω - середнє значення потужності сигналу;

$m = \frac{M^2[\mu^2]}{D[\mu^2]}$, - параметр, що виражає відношення квадрата початкового

моменту другого порядку величини μ (середньої потужності прийнятого сигналу) до дисперсії квадрата цього коефіцієнта передачі (дисперсії миттєвої потужності сигналу).

Для амплітуд комплексних коефіцієнтів передачі каналу на всіх піднесучих виконується така умова нормування:

$$\langle \mu^2 \rangle = \langle \lambda \rangle = \Omega = 1. \quad (1.9)$$

В [9-11] також були отримані статистичні характеристики пропускну здатності багатопробеневого каналу радіозв'язку з рухомими об'єктами.

Таким чином, використовуючи формули (1-8) та результати [22-24], можна визначити ступінь мобільності ДМ. Даний підхід дозволяє децентралізовані мережі, побудовані на різних організаційно - технічних принципах, порівняти по новому системному критерію мобільності, і який, на відміну від відомих, враховує необхідну пропускну здатність і об'єм переданих повідомлень.

Висновки до розділу 1

1. Хмарно-орієнтовані платформи мереж радіодоступу 4-го і 5-го поколінь на основі програмно-орієнтованих пристроїв SDR і базових програмно-орієнтованих мереж на основі SDN, уможливають перенесення обчислювальних потужностей абонентських пристроїв в хмарні технології і використання інтелектуальних абонентських пристроїв. В області технологій керування машинами найбільш інтенсивно інновації впроваджуються в сферу Інтернет речей і послуг M2M. Одним з напрямків розвитку мереж 5-го покоління стануть алгоритми класифікації трафіку, що забезпечить підтримку викликів ринку по динаміці зміни попиту на послуги і потреби абонентів. Незважаючи на велику кількість різних рішень для мереж мобільного зв'язку 4-го і 5-го поколінь, невирішеними досі залишаються завдання ефективної передачі сигналів в радіоканалах за наявності великої кількості інтерферуючих сигналів в гетерогенних мережах, конвергенції різних технологій радіодоступу для ефективного надання сервісів у гетерогенних мережах, а також завдання моделювання складних багаторівневих стільникових структур для оптимізації планування і балансування навантаження, з урахуванням інтерференції в гетерогенних мережах.

2. Гетерогенні мережі мобільного зв'язку розглядаються в якості основної концепції для розроблення та впровадження мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління. Принципи побудови таких самоорганізуючих радіомереж на основі програмно-конфігурованих радіозасобів (SDR) визначаються показниками

зв'язності, пропускної здатності і живучості радіозасобів. Але, в умовах недостатнього спектрального ресурсу, просторове ущільнення мережі обмежується зростаючим рівнем інтерференції, що не дає змогу необмежено підвищувати пропускну здатність самоорганізуючої мережі. Тому, для задоволення вимог до пропускної здатності самоорганізуючих мереж 5-го покоління необхідно вирішити ряд задач, а саме:

- систематизація питань функціонування самоорганізованої радіомережі та розробка принципів функціонування радіозасобів на основі технології SDR із адаптивними режимами роботи;

- розробка нової методики оцінки зв'язності радіозасобів SDR самоорганізованої радіомережі;

- розробка нової методики оцінки пропускної здатності радіозасобів SDR самоорганізованої радіомережі;

- проведення системного комп'ютерного моделювання основних характеристик, параметрів функціональних блоків та самоорганізованої системи в цілому.

РОЗДІЛ 2

ВДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЗВ'ЯЗАНОСТІ САМООРГАНІЗОВАНОЇ РАДІОМЕРЕЖІ

2.1 Ймовірнісна модель функціонування пристроїв на основі технології SDR в самоорганізованій радіомережі

Як показано в розділі 1, для сучасних бездротових мереж, побудованих на базі технології LTE, оцінка інтерференції між взаємодіючими пристроями є одним з основних завдань аналізу показників якості їх функціонування [9,11,17]. У сучасних мережах концепція бездротової взаємодії кінцевих пристроїв D2D (device-to-device) [17] є найбільш залежною від інтерференції, що пояснюється високою щільністю інтерферуючих об'єктів, наприклад, сенсорів, датчиків і ін. Під час аналізу бездротових взаємодій пристроїв зазвичай розглядаються декілька передавачів, розподілених на площині згідно з деяким стаціонарним ізотропним точковим процесом [17]. Спрощення завдання полягає в тому, що, розглянувши одну випадкову точку, і оцінивши характеристики інтерференції відповідного їй пристрою, можна припустити, що всі основні показники будуть ідентичні і для решти точок. У даному підрозділі дисертаційної роботи вирішується саме таке завдання знаходження числових характеристик сигнал-інтерференція пари взаємодіючих пристроїв в достатньо загальних припущеннях про розподіл початкових випадкових величин.

Відношення сигналу до інтерференції плюс шум (SINR, Signal to Interference plus Noise Ratio) є однією з основних характеристик якості каналу в бездротових мережах зв'язку [11,17]. Передбачається, що формула для обчислення величини SINR має вигляд

$$SINR = \frac{gl^{-\alpha}}{\sigma^2 + I}, \quad (2.1)$$

де g - базова потужність сигналу даного передавача, l - відстань між передавачем і приймачем, α - коефіцієнт втрат (path loss exponent), що приймає значення від 2 (за умови прямої видимості) до 6 (у гіршому разі), I - потужність

інтерферуючого сигналу від інших передавачів, σ^2 - потужність шуму. Зазначимо, що принцип повторного використання частот (Frequency Reuse) в бездротових мережах зв'язку покоління 4G/5G (4- th/5-th Generation) дозволять призначати одну і ту ж одиницю ресурсу мережі (наприклад, один і той же ресурсний блок LTE) кільком парам взаємодіючих терміналів, якщо інтерференція не перевершує визначеного стандартами рівня [9,17].

Розглянемо випадок, коли кілька приймаючих терміналів (приймачів) і один передавальний термінал (передавач), утворюючи так званий кластер, розташовано на площині всередині кола радіусом r_0 , причому передавальний термінал розташовано в центрі кола. Такий кластер утворюється, наприклад, при проведенні інтерактивного заняття викладача з учнями, коли можна припустити, що передавальний термінал розташовується в центрі кола, а приймаючий термінал розташовується в межах цього кола. Для передачі даних на кожну пару взаємодіючих терміналів усередині кластера планувальником розподілу радіо ресурсів в бездротовій мережі призначається по одному ресурсному блоку LTE, і тоді сигнали взаємодіючих пар не інтерферуватимуть один з одним. Але якщо в сусідньому приміщенні також проходить інтерактивне заняття, і там використані ті ж ресурсні блоки, то пари з сусідніх кластерів, що використовують один і той же ресурсний блок, створюватимуть завади один одному. Зведемо завдання до аналізу взаємодії двох пар терміналів в двох кластерах, як показано на рис 2.1.

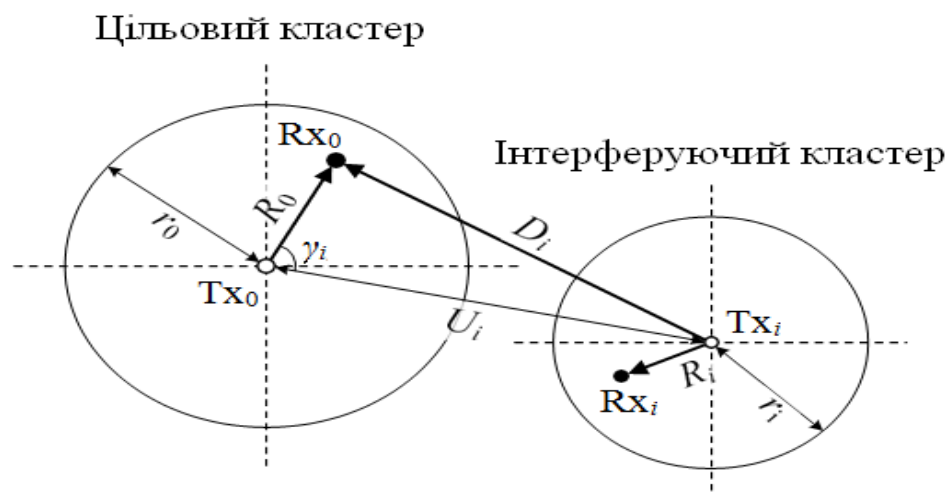


Рис. 2.1 Схема взаємодії пристроїв, що інтерферують

Пару взаємодіючих терміналів, для якої будемо розраховувати показники ефективності, назвемо цільовою, відповідну їй пару терміналів позначимо $TR_0 = \langle Tx_0, Rx_0 \rangle$. Решту пар, які створюють завади цільовій парі TR_0 , позначимо $TR_i = \langle Tx_i, Rx_i \rangle$ і будемо називати їх інтерферуючими. Відстань між Rx_i та Tx_i позначимо R_i , а відстань між Tx_0 та Tx_i позначимо U_i . Потужність інтерферуючого сигналу від пари TR_i є функцією від відстані між приймачем Rx_i з цільової пари і інтерферируючим передавачем Tx_i , таким чином, вона буде залежати від відстані Tx_i та Rx_0 , яку позначимо через D_i .

Розглянемо систему, показану на рис. 2.2, з одним джерелом інтерференції ($i=1$). Тоді в умовах відсутності шуму шуканою характеристикою є відношення сигнал-інтерференція SIR , обчислюване за формулою

$$SIR = \left(\frac{D_1}{R_0} \right)^\alpha \quad (2.2)$$

Будемо вважати, що R_0 , U_i та γ є с.в. з заданими ФР. Тоді задача складається зі знаходження числових характеристик с.в. SIR . Для розв'язання задачі нижче пропонується метод знаходження сумісної щільності розподілу с.в. R_0 и D_i , що свою чергу дозволяє обчислювати, наприклад, початкові моменти $E[SIR]^n$ с.в. SIR .

Як видно з формули (2.2), с.в. SIR прямо пропорційна с.в. D_1 яка у свою чергу залежить від с.в. R_0 . В цьому випадку для знаходження характеристик с.в. SIR необхідно знайти сумісний розподіл с.в. R_0 і D_1 . Введемо позначення: $\xi_1 := R_0$, $\xi_2 := U_1$ - сумісна щільність розподілу с.в. R_0 , U_1 и γ_1 а $w_{\xi_1, \eta_1}(x_1, y_1) := f_{R_0, D_1}(x_1, y_1)$ - шуканий сумісний розподіл с.в. R_0 і D_1 . За теоремою косинусів с.в. η_1 є функцією с.в. ξ_1, ξ_2, ξ_3 :

$$\eta_1 = \sqrt{\xi_1^2 + \xi_2^2 - 2\xi_1\xi_2 \cos(\xi_3)}. \quad (2.3)$$

Слідуючи [9,17], ввівши допоміжну змінну $\eta_2 = \xi_3$ шуканий розподіл можна знайти за наступною формулою:

$$W_{\xi_1, \eta_1}(y_1, y_2) = \sum_{i=1}^2 \int_{Y_{3,i}} w_{\xi_1, \xi_2, \xi_3}(y_1, \varphi_i(y_1, y_2, y_3), y_3) \cdot \left| \frac{\partial \varphi_i(y_1, y_2, y_3)}{\partial y_2} \right| dy_3, \quad (2.4)$$

де φ_i - зворотне перетворення правої частини формули (2.3):

$$\varphi_1(y_1, y_2, y_3) = y_2 \cos(y_3) + \sqrt{y_1^2 - y_2^2 + y_2^2 \cos^2(y_3)},$$

$$\varphi_2(y_1, y_2, y_3) = y_2 \cos(y_3) + \sqrt{y_1^2 - y_2^2 + y_2^2 \cos^2(y_3)}.$$

У формулі (2.4) області значень $Y_{3,i}$ змінної y_3 для i - гілки зворотного перетворення визначаються системою нерівностей:

$$\begin{cases} \varphi(y_1, y_2, y_3) \geq 0, \\ y_1 \geq 0, \\ y_2 \geq 0, \\ 0 \leq y_3 \leq 2\pi. \end{cases} \quad (2.5)$$

Вирішуючи систему (2.5) неважко переконається, що для першої гілки зворотного перетворення $Y_{3,1} = Y_{3,1}^1 \cup Y_{3,1}^2 \cup Y_{3,1}^3$, де

$$\begin{aligned} Y_{3,1}^1 &= \begin{cases} 0 \leq y_2 \leq y_1, \\ 0 \leq y_3 \leq 2\pi, \end{cases} \\ Y_{3,1}^2 &= \begin{cases} y_2 \geq y_1, \\ 0 \leq y_3 \leq \frac{1}{2} a \cos\left(\frac{-2y_1^2 + y_2^2}{y_2^2}\right), \end{cases} \\ Y_{3,1}^3 &= \begin{cases} y_2 \geq y_1, \\ 2\pi - \frac{1}{2} a \cos\left(\frac{-2y_1^2 + y_2^2}{y_2^2}\right) \leq y_3 \leq 2\pi, \end{cases} \end{aligned} \quad (2.6)$$

а для другої гілки $Y_{3,2} = Y_{3,2}^1 \cup Y_{3,2}^2$, де

$$\begin{aligned} Y_{3,2}^1 &= \begin{cases} y_2 \geq y_1, \\ 0 \leq y_3 \leq \frac{1}{2} a \cos\left(\frac{-2y_1^2 + y_2^2}{y_2^2}\right), \end{cases} \\ Y_{3,2}^2 &= \begin{cases} y_2 \geq y_1, \\ 2\pi - \frac{1}{2} a \cos\left(\frac{-2y_1^2 + y_2^2}{y_2^2}\right) \leq y_3 \leq 2\pi, \end{cases} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Таким чином, отримана формула для обчислення сумісної щільності с.в.

$$R_0 \text{ і } D_1: W_{\xi_1, \eta_1}(y_1, y_2) = \sum_{i=1}^2 \int_{Y_{3,i}} \frac{w_{\xi_1, \xi_2, \xi_3}(y_1, \varphi_i(y_1, y_2, y_3), y_3) \cdot y_2}{\sqrt{y_2^2 - y_1^2 + y_1^2 \cos^2(y_3)}} dy_3, \quad (2.8)$$

2.2 Використання терагерцового діапазону для передачі інформаційного трафіку в радіосистемах

В даному розділі приводиться аналіз ефективності використання організації бездротового середовища траси розповсюдження інформації в цифровому форматі.

Наводяться позитивні та негативні якості використання терагерцового діапазону для організації каналу зв'язку та каналу передачі даних [25-46].

Показано основні досягнення наукових фірм (головним чином зарубіжних) в сфері передачі варіантів трафіку, в довжині каналу зв'язку, та якості передачі (отримані значення бітової помилки).

Показано досягнення в довжині лінка при використанні діапазону 120 ГГц та приведено структурна схема приймально-передавальної станції (ППС), працюючої в діапазоні 42,5-43,5 ГГц і призначеної для організації однопролітних цифрових радіорелейних ліній протяжністю до 5 км із швидкістю передачі інформації 8,448 Мбіт/с (129 телефонних каналів).

Виконано попередній розрахунок довжини лінії зв'язку в діапазоні 130...134 ГГц, який розглядається в роботі. Розрахунок виконано для смуги 2 ГГц, яка дозволяє передачу потоків надшвидкісного телебачення та телебачення надвисокої чіткості. Швидкість передачі досягає більше 1,5 Гбіт/с в одному потоці.

Також приведена оцінка передачі, в першу чергу адресної інформації (доступ до служб Інтернет) та інформаційних потоків меншої швидкості (біля 150 Мбіт/с) по одному частотному каналу. При цьому використовується формувач в конфігурації восьми таких частотних каналів (сумарна швидкість досягає 1,2 Гбіт/с). Результуюча смуга складе біля 400 МГц. Даний формувач розроблений та запатентований в рамках цієї роботи.

2.2.1 Загальні положення

Терагерцовий (ТГц) діапазон займає проміжне положення між оптичним і мікрохвильовим діапазонами (рис. 2.2). До природних джерел терагерцового випромінювання відноситься, наприклад, космічне реліктове випромінювання. На високочастотну область терагерцового діапазону доводиться теплове випромінювання предметів кімнатної температури (рис. 2.3). Проте випромінювання природних терагерцових джерел не є когерентним, тому його не можна застосувати для таких завдань, як зв'язок, локація, спектроскопія і тому подібне.

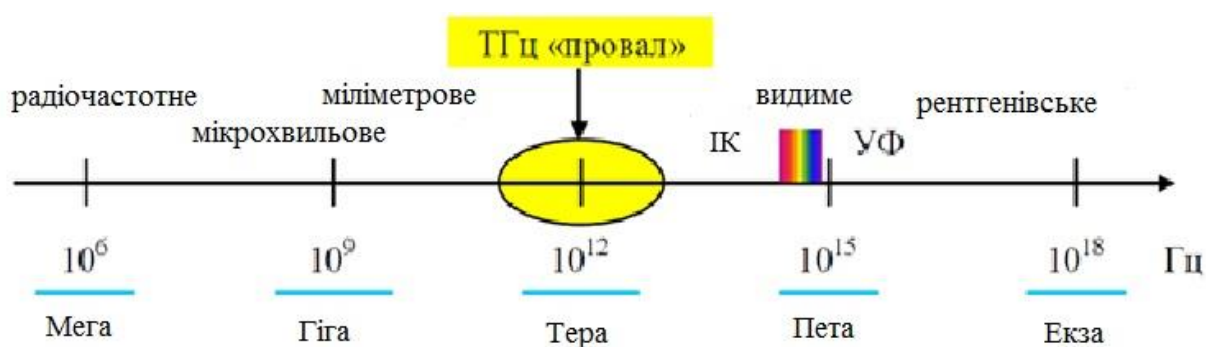


Рис.2.2 Спектр електромагнітних хвиль і терагерцовий «провал»

До недавнього часу велика частина терагерцового спектру не використовувалась у зв'язку з тим, що були відсутні як джерела, так і приймачі когерентного випромінювання цього діапазону. Тому терагерцову ділянку електромагнітного спектру назвали "терагерцовим провалом". Докладалися значні зусилля, щоб заповнити цей провал. На рис. 2.3, показана нижня частотна межа лазерних методів генерації випромінювання і верхня частотна межа роботи електронних приладів. Видно, що терагерцовий провал зімкнувся у кінці 90-х років. Проте ефективність лазерних і електронних приладів, що досягають (з протилежних сторін) рекордних частот в центрі терагерцового провалу, залишається невисокою.

Складність створення ефективних терагерцових джерел пов'язана з тим, що в терагерцовому діапазоні погано застосовні добре розроблені методи генерації випромінювань сусідніх оптичного і мікрохвильового діапазонів.

Оптичні генератори когерентного випромінювання (лазери), що базуються на вимушених переходах електронів між рівнями. Оскільки квант терагерцового випромінювання незначний (еквівалентна температура випромінювання частотою 1 ТГц складає всього 47,6 К), тепла релаксація лазерних рівнів при кімнатній температурі призводить до вирівнювання і швидкому знищенню інверсії. Тому, наприклад, квантово-каскадні лазери, що є одним з перспективних джерел (рис. 3), генерувати на терагерцових частотах поки що здатні тільки в умовах криогенного охолодження.

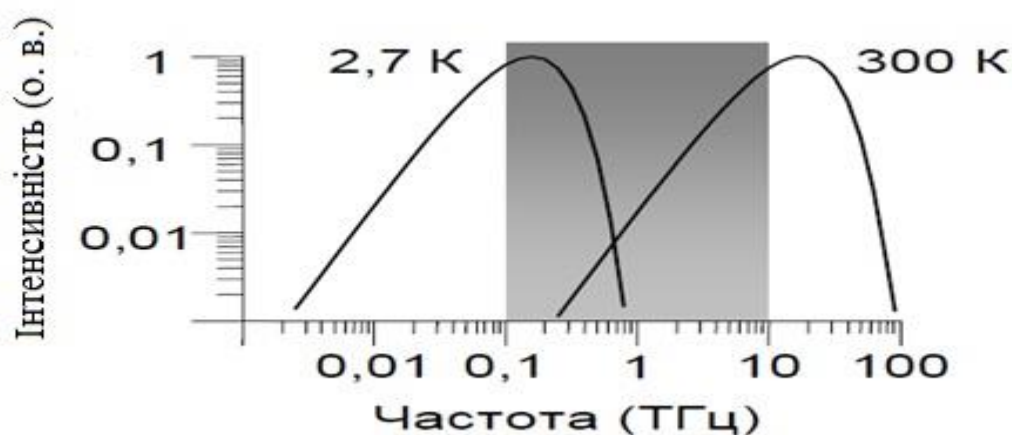


Рис.2.3 Терагерцовий діапазон порівняно із спектрами випромінювання абсолютно чорного тіла при температурі 2,7 К (реліктове випромінювання) і 300 К

У мікрохвильовому і НВЧ діапазонах, розташованих по іншу сторону від терагерцового провалу, генерація електромагнітного випромінювання пов'язана з транспортом(рухом) носіїв заряду. Верхня межа частоти випромінювання визначається характерним часом прольоту носія в приладі. Простими словами, якщо треба отримати осциляції носіїв на терагерцових частотах, необхідно прикласти сильне електричне поле до малої області простору, що і нашоухується на технічні складнощі. Потужними джерелами терагерцового випромінювання, що базуються на перенесенні носіїв заряду, є синхротрони і лазери на вільних електронах, проте їх дорожнеча і розміри перешкоджають їх широкому використанню навіть для чисто наукових застосувань.

Область частот від сотень гігагерц до декількох терагерц (рис. 2.4) стала доступною для дослідження завдяки створенню терагерцових джерел на основі дії лазерним випромінюванням на речовину (оптико-терагерцового перетворення). Існують як вузькосмугові (квазібезперервні) джерела, що генерують вузький спектр терагерцових частот, так і широкосмугові імпульсні джерела, спектр яких перекриває істотну частину або навіть увесь терагерцовий діапазон. Можливість " адресного" налаштування на певну терагерцову частоту, перебудови в широкому спектрі, або налаштування на широкий спектр частот, а також робота при кімнатній температурі робить лазерні методи генерації порівняно ефективними і простими в реалізації. Крім того, збуджені лазерним імпульсом терагерцові хвилі мають дуже важливу властивість, унікальну для цієї групи методів: такі імпульси "прив'язані" по фазі до народившого їх лазерного імпульсу.

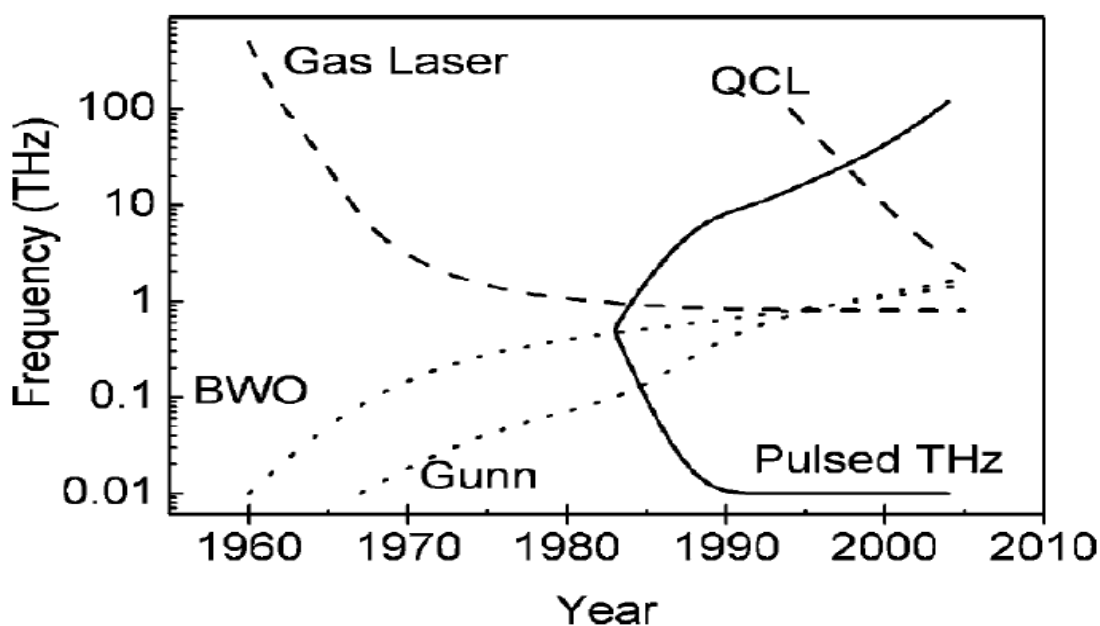


Рис.2.4 Розвиток джерел когерентного терагерцового випромінювання

Суцільна лінія обмежує робочий діапазон імпульсних джерел на основі лазерів оптичного діапазону, пунктирні лінії - нижні межі для газових і квантово-каскадних (QCL) лазерів, точки - верхні межі для ламп зворотної хвилі (BWO) і діодів Ганна.

В результаті один і той же лазерний імпульс (розділений на два) може бути використаний і для генерації терагерцового імпульсу, і для його детектування

електрооптичними методами. При цьому можна виміряти електричне поле швидко осцилюючого терагерцового випромінювання дуже високим дозволянням - порядку тривалості фемтосекундного лазерного імпульсу. Ґрунтований на цій властивості метод терагерцової генерації і детектування дістав назву терагерцової спектроскопії в часовій області.

Незважаючи на складнощі генерації терагерцового випромінювання, його унікальні властивості стимулюють освоєння терагерцового діапазону. Перерахуємо деякі відмітні особливості терагерцового випромінювання і застосування, що витікають з них:

- Терагерцове випромінювання є неіонізуючим, на відміну від рентгенівського випромінювання, що використовується в медичній діагностиці. В той же час, різні біологічні тканини мають істотно різне поглинання в цьому діапазоні, що дозволяє забезпечити контрастність знімків. Проте, надзвичайно високе поглинання водою не дозволяє терагерцовому випромінюванню проникати глибоко в тканини, що обмежує сферу його застосування поверхнею тканин.

- В порівнянні з видимим і інфрачервоним випромінюванням, терагерцове випромінювання є довгохвильовим, тобто що воно менш схильне до розсіювання. В результаті, в цьому діапазоні прозорі багато сухих діелектричних матеріалів, такі як тканини, дерево, папір, пластмаси. Тому терагерцове випромінювання можна використати для неруйнівного контролю матеріалів, сканування в аеропортах, і ін. В той же час довжина хвилі випромінювання досить мала, щоб забезпечити субмікронний просторовий дозвіл при використанні випромінювання, що вільно поширюється. При використанні методів ближнього поля може бути досягнутий просторовий дозвіл близько нанометрів.

- У терагерцовому діапазоні лежать резонанси обертальних і коливальних переходів багатьох молекул. Це дозволяє проводити ідентифікацію молекул по їх спектральних "відбитках пальців". У поєднанні з отриманням зображення (іміджингом) в терагерцовому діапазоні це дозволяє визначити не лише форму, але і склад досліджуваного об'єкту.

- Терагерцове випромінювання може бути продетектоване в часовій області, тобто може бути виміряна як амплітуда, так і фаза поля. Це дозволяє безпосередньо вимірювати зрушення фаз, що вноситься досліджуваним об'єктом, тобто дозволяє досліджувати швидкоплинні процеси і навіть управляти ними.

Когерентна терагерцова спектроскопія в часовій області, що забезпечує надшироку частотну смугу і високе розділення за часом, дозволяє досліджувати склад, електронні і коливальні властивості твердих тіл, рідин і газів, плазми і плазмоподібних середовищ, потоків. Багато біологічних і хімічних агентів мають спектральні "відбитки пальців" в терагерцовому діапазоні, пов'язані з унікальними коливальними і обертальними рівнями молекул, що дозволяє досліджувати їх хімічний склад за допомогою терагерцового випромінювання. Цю властивість можна застосувати для діагностики захворювань, виявлення біологічних і хімічних агентів, забруднень, контролю якості продуктів харчування і медикаментів. Одним з важливих можливих застосувань є виявлення замаскованої пластикової вибухівки. Детектування зв'язаних станів генетичного матеріалу (ДНК і РНК) шляхом прямого використання терагерцового випромінювання, без застосування спеціальних маркерів, дозволить в майбутньому проводити безмаркерний генетичний аналіз біочіпів.

Терагерцовий іміджинг (фотографія) дозволяє отримати зображення зразків з контрастом по складових їх компонентах, досліджувати вміст води у біологічних зразках, їх склад. Завдяки меншому (в порівнянні з ІК випромінюванням) розсіянню біологічними тканинами терагерцові зображення можуть забезпечувати кращий контраст при медичній діагностиці.

Незважаючи на успішне застосування лазерної генерації імпульсного терагерцового випромінювання цілому ряду додатків, існує ряд чинників, що обмежують розвиток цього напрямку:

- сучасні терагерцові випромінювачі мають досить низьку ефективність перетворення енергії оптичного імпульсу в енергію терагерцової хвилі. Для реєстрації доводиться використати синхронний детектор, а час накопичення сигналу в одиничному вимірі складає біля мс;

- високе поглинання параами води істотно послабляє терагерцовий сигнал при його поширенні в атмосфері, що істотно ускладнює завдання видаленої терагерцової діагностики;

- товсті зразки або зразки з високим коефіцієнтом поглинання в терагерцовому діапазоні не дозволяють зареєструвати терагерцовий сигнал, що пройшов, можна досліджувати тільки слабкий розсіяний або відбитий сигнал.

Ці проблеми мають загальне рішення - збільшення відношення "сигнал-шум" системи, тобто, фактично, збільшення потужності терагерцового випромінювача або збільшення чутливості детектора.

Різке підвищення інформації, яка передається втому числі по каналах зв'язку і вичерпаність частотного ресурсу потребують як використання технологій, що забезпечують високу спектральну ефективність каналу зв'язку, так і освоєння нових частотних діапазонів. Значну увагу для використання в каналах зв'язку із бездротовими трасами розповсюдження притягають діапазони в безпосередній близькості до терагерцового (60...140ГГц) і які не потребують жорсткого ліцензування.

Подальший аналіз спрямований на використання вказаного частотного ресурсу саме для цих потреб.

2.2.2. Особливості терагерцового діапазону при використанні в мобільних телекомунікаціях

До числа безперечних переваг застосування міліметрових хвиль (ММХ) в системах зв'язку слід віднести передусім такі чинники як збільшення об'єму і швидкості передачі інформації, високе посилення антен при малій їх апертурі і підвищена завадозахищеність каналу зв'язку.

Особливість використання ММХ для радіозв'язку (наземною, супутниковою, а також для зв'язку літальних апаратів) полягає в тому, що при їх поширенні радіовипромінювання затухає в атмосферних газах і гідрометеорах. При взаємодії випромінювання з середовищем виникають процеси розсіяння, послаблення і деполаризації випромінювання, а також амплітудні і фазові

спотворення сигналів. Послаблення радіовипромінювання в атмосфері має загальну тенденцію зростати із зростанням частоти і залежати від погодних умов. Проте на ММХ інтенсивність поглинання радіохвиль не така велика як в субміліметровому діапазоні хвиль і обумовлена наявністю молекул кисню і водяної пари на частотах 22,2 (H₂O), 60 (O₂), 118,8 (O₂) і 180 (H₂O) ГГц.

В цілому ММХ відносяться до хвиль зі змінною дальністю дії через порівняно велике молекулярне поглинання в парах води і кисні повітря, а також через послаблення в різних гідрометеорах атмосфери.

З урахуванням статистики різних гідрометеорів, вологості повітря в атмосфері можна показати, що повне питома послаблення ММХ а в 99,98 %% часу у вказаних лініях поглинання не перевершуватиме значень, вказаних в таблиці 2.1. При цьому робилося допущення про те, що молекулярне поглинання і послаблення в дощі і мокрому снігу впливає на випромінювання, що поширюється, одночасно, хоча це рідко має місце.

Таблиця 2.1

Показники щодо послаблення випромінювання

Повне ослаблення в атмосфері	Довжина хвилі, мм			
	1,64	2,5	5,0	12,5
H ₂ O + O ₂ + дощ (10 мм/г)+ мокрий сніг (1 мм/г),	55,6	52,0	31,7	12,0
дБ/км а, км ⁻¹	12,8	5,5	7,3	2,76

З даних таблиці слідує, що на лініях молекулярного поглинання в діапазоні міліметрових радіохвиль можливе забезпечення роботи ліній широкосмугового зв'язку в наземних умовах на відстанях в декілька кілометрів.

Слід також підкреслити, що на хвилях 5 і 2,5 мм при помірній вологості атмосфери (~7,5 г/м³) у земної поверхні повне послаблення випромінювання при вертикальному поширенні радіохвиль в атмосфері в центрах ліній поглинання кисню може перевищувати 200 дБ. Це у свою чергу повністю унеможливорює несанкціонований прийом інформації з комічних носіїв.

На дальність зв'язку в міліметровому діапазоні значний вплив створюють загасання на молекулах води, кисню, а також погодні чинники (рис.4). У НВЧ-діапазонах до 38 ГГц атмосферне загасання не перевищує 0,3 дБ/км. За підйомом в районі 23 ГГц слідує сильне затухання на 60 ГГц, обумовлене поглинанням радіохвиль молекулами кисню. На частоті 60 ГГц послаблення досягає 14 дБ/км, що істотно обмежує дальність передачі радіохвиль. На частотах вище 100 ГГц починають проявлятися інші ефекти молекулярного поглинання (у тому числі на молекулах води), що обмежують ефективність поширення сигналів.

Вікно відносної прозорості лежить в діапазоні 70-100 ГГц. Тут атмосферне затухання складає близько 1,5 дБ/км, що близько до загасання в традиційних НВЧ-діапазонах. В результаті стає можливим передавати радіосигнали на значні відстані 5-10 км. Відмітимо, що у разі сильного дощу (інтенсивність 25 мм/г) загасання сигналу в Е-діапазоні досягає 10 дБ/км (рис. 2.5, рис. 2.6). Міжнародним союзом по телекомунікаціях ІТУ основані на багаторічних спостереженнях складені карти однотипних зон випадання опадів в різних районах світу. Ці карти допомагають проектувальникам при установці систем зв'язку в різних регіонах світу враховувати інтенсивність і річну норму опадів.

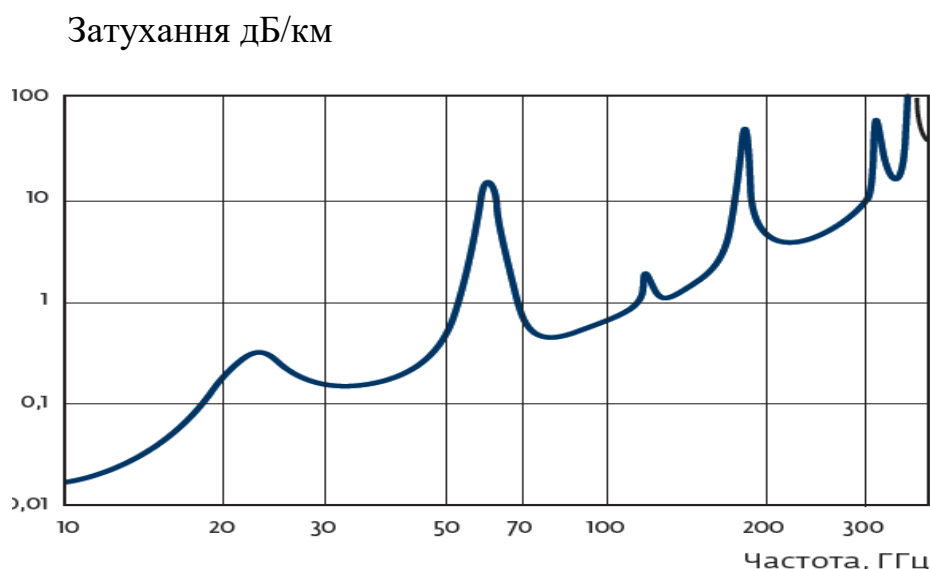


Рис.2.5 Характеристики поглинання радіохвиль в атмосфері (на рівні моря)

Нині для ліній зв'язку більшої протяжності представляють інтерес "вікна прозорості" атмосфери на частотах 35, 94, 140 і 220 ГГц, де спостерігається

мінімальне загасання в порівнянні з сусідніми ділянками ММХ. На середніх широтах при помірній вологості і температурі повітря в ясну погоду влітку у земної поверхні повне послаблення невелике і при вертикальному поширенні через атмосферу на частоті 94 ГГц не перевищує 1,3 дБ.

Проведені дослідження показують, що при переході від 94 ГГц до 180 ГГц втрати в антенно-хвильоводному тракті збільшуються майже в два рази, а коефіцієнт шуму зростає приблизно в 1,2 рази, проте за рахунок укорочення довжини хвилі підвищується відношення сигнал/шум приблизно в 8 разів і у результаті сумарний виграш у величині сигнал/шум досягає майже чотирьох разів.

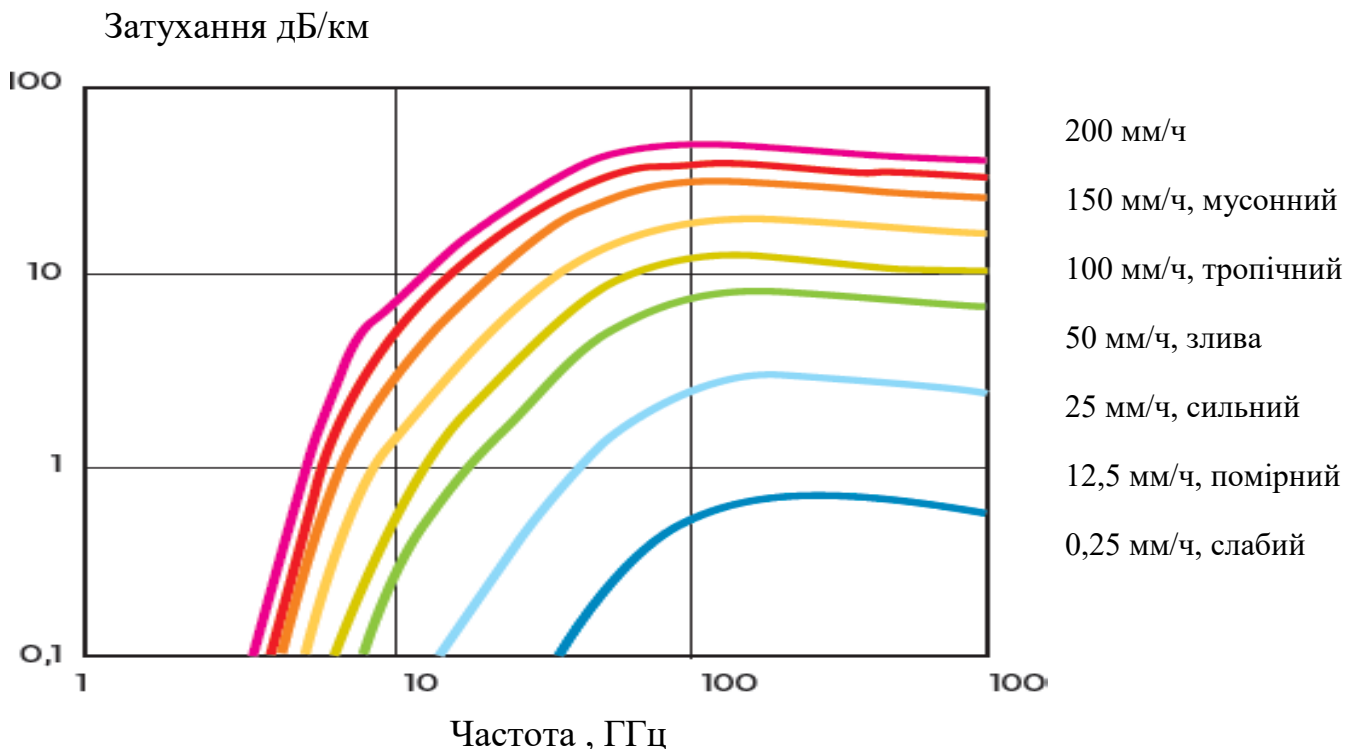


Рис.2.6 Затухання радіохвиль, що викликається дощем різної інтенсивності

В останні роки в найбільш розвинених країнах світу спостерігається величезний прогрес і конкурентна боротьба фірм в розробці нових систем зв'язку в міських умовах і сільській місцевості між рухомими і стаціонарними об'єктами. Це стало можливим завдяки успіхам в твердотільній електроніці, мікроелектроніці, фотоніці, акустoeлектроніці, а також в розробці систем зв'язку на УКВ із застосуванням синхронних і низькоорбітальних штучних супутників

Землі. Тут необхідно вказати на прогрес в технології створення малогабаритних кишенькових ПК і кишенькових терміналів для забезпечення зв'язку з рухомими об'єктами, що робить серйозний вплив на вдосконалення радіозв'язку з рухливими об'єктами і розширення її зон дії аж до створення всеосяжного зв'язку в масштабі усієї планети.

Слід зокрема відмітити, що технологія Bluetooth така універсальна, що дозволяє передавати текстову і відеоінформацію, а також забезпечувати дистанційне управління побутовими приладами (холодильниками, пральними машинами, системою опалювання, телевізорами і ін.).

Виробники портативних ПК поспішають застопити за собою стандарти по системах радіозв'язку, розрахованого на корпорації, мандрівників і школярів [36]. Тут йдеться про портативні ПК, призначені для радіозв'язку усередині великих установ, розташованих у будівлях на великих площах. Цей ПК використовувався в одній з штаб-квартир на великій площі при значній чисельності персоналу, при цьому використовується бездротовий зв'язок за допомогою плат Lucent і Aironet. Фірма Dell починає комплектувати ноутбуки мережевими сімействами Latitude і платами Aironet Wireless Communication 4800, що забезпечують підключення до вузлів зв'язку з відстані до 100 м. Аналогічний дешевий ПК випустила фірма Apple з дальністю дії удвічі меншої, ніж Dell. Помітимо, що фірма Dell розвиває технологію локальних мереж зв'язку на частоті 2,4 ГГц між пристроями на відстані 10-13 м. Такі мережі дістали назву персональних зонних, що забезпечує зв'язок ноутбуків із стільниковими телефонами або електронними органайзерами. Кампанія Intel розробляє радіомодулі і програмні драйвери. Важливою перевагою технології зв'язку ПК Bluetooth - простота встановлення зв'язку між кишеньковими пристроями. Перші ноутбуки з радіомодулями з'явилися на ринку вже на початку 2000 р.

Уже отримані результати досліджень використання ділянок спектру ММХ, що відповідають лініям поглинання пари води і кисню, для стільникових систем зв'язку невеликої протяжності. Вказані можливості їх застосування при проектуванні міських ліній радіозв'язку, у тому числі систем зв'язку між рухливими і стаціонарними об'єктами, а також оцінки перспектив подальших

досліджень. Тут можна вказати на два напрями. Перше пов'язане з вивченням впливу метеорологічних умов на поширення радіохвиль в місті і ефективність роботи рухомих систем зв'язку; друге - з організацією радіозв'язку на УКВ усередині виробничих приміщень (підостільникові системи зв'язку).

Систематизація і аналіз результатів досліджень поширення радіохвиль УКХ - діапазону в умовах міста призводять до оптимістичного висновку про те, що в таких складних умовах можливий прогноз найбільш важливих характеристик електромагнітного поля на відстанях від декількох сотень метрів до десятків кілометрів від джерела випромінювання. Такий прогноз може виконуватися статистичними методами по топографічній карті міста на основі даних про щільність забудови, висоти і горизонтальні розміри будівель, параметри будівельних матеріалів, з яких виготовлені стіни будівель, а також на основі даних про планування міських районів, включаючи відомості про рельєф місцевості і розташування антенних систем.

Запропоновані методики розрахунку характеристик поля при проектуванні ліній зв'язку в умовах міста із застосуванням комп'ютерних баз даних, які дозволяють робити розрахунки: енергетичних характеристик, поляризаційних параметрів поля, а також класифікувати статистичні характеристики радіоперешкод в каналах міського радіо рухомого зв'язку.

Результати оцінок протяжності лінії зв'язку залежно від довжини хвилі випромінювання при значеннях повного послаблення (див. дані в таблиці 2.1) в центрах ліній поглинання пари води або кисню (рис. 2.7). (Ці оцінки зроблені при досягнутих вже сьогодні параметрах приймально-передавальної апаратури і посиленні антен).

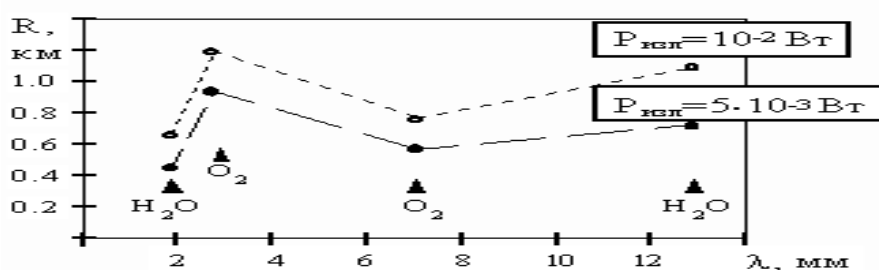


Рис.2.7 Результати оцінок протяжності лінії зв'язку залежно від довжини хвилі випромінювання при значеннях повного послаблення

На підставі цих даних можна зробити висновок про перспективність застосування ММХ для ближнього зв'язку на хвилях, що відповідають центрам резонансного поглинання в парах води і в кисні. Видно так само, що за найгірших умов поширення на хвилі 5 мм протяжність лінії зв'язку завжди більше 0,5 км, що відповідає вимогам, що пред'являються до мікростільникових і пікостільникових ліній зв'язку.

Враховуючи сучасний рівень розвитку напівпровідникової технології і стан розробок мікроелектронних схем, є реальна можливість використання різних вітчизняних приймально-передавальних систем, а також антенно-хвилеводних пристроїв для створення необхідної елементної бази в цілях застосування в лініях передачі інформації невеликої протяжності в міських умовах.

Такі лінії можуть стати надійними складовими частинами стільникових систем зв'язку з базовими станціями окремих регіонів. При масовому виробництві вартість подібних систем на ММХ могла б бути цілком порівнянною з існуючими системами на дециметрових і метрових хвилях.

Крім того, в умовах міста організація таких ліній передачі інформації може бути доцільною з ряду причин. Зокрема, це могло б повністю розв'язати проблему тісноти в ефірі і створити реальну можливість збільшення смуги повідомлень, що передаються, принаймні на порядок і більше.

З іншого боку, за результатами досліджень, використання ММХ в приймально-передавальних системах в приміщеннях з працюючим персоналом не робитиме такого шкідливого впливу на біологічні об'єкти і людину, як у разі дециметрових і метрових хвиль. Вже розглядається можливість застосування мікро- і пікостільникових систем зв'язку в міських і приміських районах.

Використання довжин хвиль, що відповідають центрам молекулярного поглинання в діапазоні ММХ привело б до масового застосування одних і тих же хвиль для багатократних ретрансляцій повідомлень.

На рис. 2.8 представлений варіант застосування ліній зв'язку в місті. Базова станція " А" здійснює зв'язок по макростільникових мережах Би, В, Г, Д, що забезпечує обмін інформацією з об'єктами рухливого зв'язку. Проте, як видно з

рис. 2.7, є в місті 3 мікростільники (одна з них "З") і пікостільники виробничої будівлі "Ж", призначені для зв'язку із стаціонарними і рухомими об'єктами.

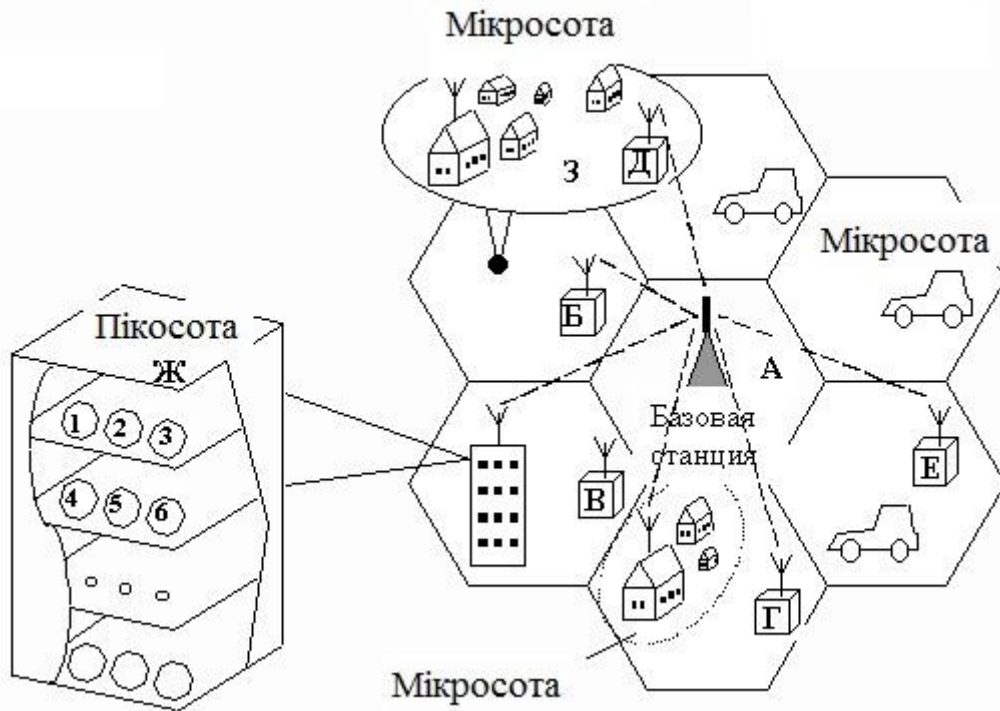


Рис.2.8 Варіант застосування ліній зв'язку в місті

На рис. 2.9 показані два варіанти (а і б) застосування ММХ з використанням слабо направлених антенних систем для зв'язку з рухомими об'єктами на магістральних вулицях міста. Відмітимо, що у відмінність систем стільникового зв'язку передача інформації на ММХ забезпечується на усіх ретрансляторах на одній і тій же довжині хвилі.

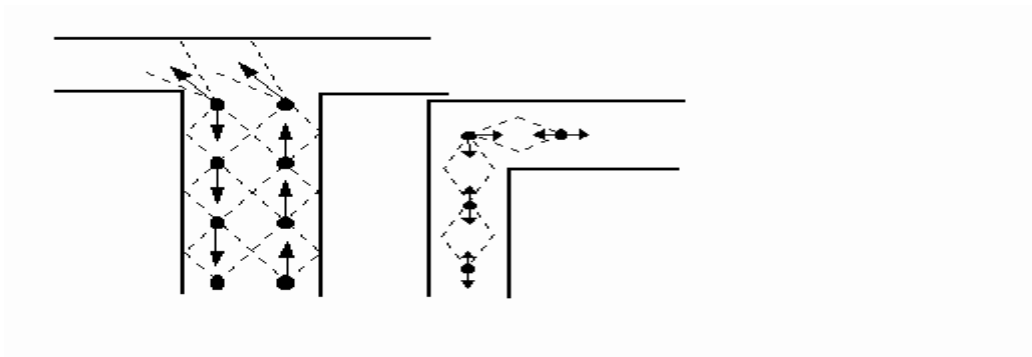


Рис. 2.9 Два варіанти застосування ММХ

Таким чином, лабораторні і промислові приймально-передавальні пристрої і стан елементної бази вселяють сьогодні упевненість в можливості практичного використання ММХ в стільникових системах передачі інформації невеликої протяжності в умовах міста.

Забезпечення пропускної спроможності радіолінії 3-5 Гбіт/с, яке потрібно в перспективі, можливе за рахунок використання міліметрових і коротших діапазонів довжин хвиль, де може бути забезпечена висока надійність роботи радіолінії 0,99998. Енергетичні показники, вимоги до апаратури такої радіолінії при сучасному стані техніки ММХ цілком реалізуються. Так, для похилої радіолінії з кутом нахилу 30° , з пропускною спроможністю 3 Гбіт/с, дальності 20 км, при розмірах параболічних антен на борту літального апарату 0,2-0,5 м і на Землі в пункті прийому 1 м, коефіцієнт шуму наземного приймача ~ 15 дБ, малій вазі і об'ємі бортової апаратури, знадобляться потужності бортового передавального пристрою в межах (0,1-20) Вт.

На сьогодні в опублікованих роботах уже викладені результати розробки дуплексної приймально-передавальної станції (ППС), працюючої в діапазоні 42,5-43,5 ГГц і призначеною для організації однопролітних цифрових радіорелейних ліній протяжністю до 5 км із швидкістю передачі інформації 8,448 Мбіт/с (129 телефонних каналів). Діапазон робочих частот ППС відповідає регламенту радіозв'язку для цього класу апаратури. Для передачі інформації вибрана частотна модуляція з індексом модуляції рівним 1. Рознесення частот між каналами прийому і передачі, а також значення проміжної частоти складають 480 МГц, що дозволяє, з одного боку, забезпечити необхідну величину розв'язки між каналами, а з іншої - організувати автоматичне підстроювання частоти відносно стабілізованого гетеродина приймача.

При загальному загасанні 170 дБ працездатність радіолінії протяжністю 5 км можуть бути забезпечені за наступних умов: коефіцієнт посилення приймально-передавальної антени не менше 40 дБ, потужність передавача 30-50 мВт, коефіцієнт шуму приймача не більше 13 дБ.

Структурна схема ППС приведена на рис. 2.10. До складу станції входять наступні функціональні вузли: параболічна двохдзеркальна антена 1 діаметром

300 мм ($f_{\text{прд}}$ і $f_{\text{пр}}$ - частоти передавальної і приймальної антен відповідно); хвилеводні смугові приймальні 2 і передавальні 4 НВЧ фільтри; роздільник поляризацій 3 (горизонтальною E і вертикальною H); змішувачі приймального каналу 5 і каналу АПЧ 6 на діодах з бар'єром Шотки, працюючі на четвертій гармоніці гетеродину; НВЧ генератор на діоді Ганна 7 з варакторною перебудовою частоти; попередній УПЧ на кремнієвих біполярних транзисторах 8; транзисторний НВЧ генератор 9, стабілізований діелектричним резонатором; частотний детектор каналу АПЧ 10; відеопідсилювач модулятора передавача 11 і модуль частотного детектора 12. Модуль частотного детектора виконаний на єдиній склотекстолітовій друкованій платі і складається з головного УПЧ з автоматичним регулюванням посилення 13, частотного детектора на засмучених контурах 14 і відеопідсилювача 15.

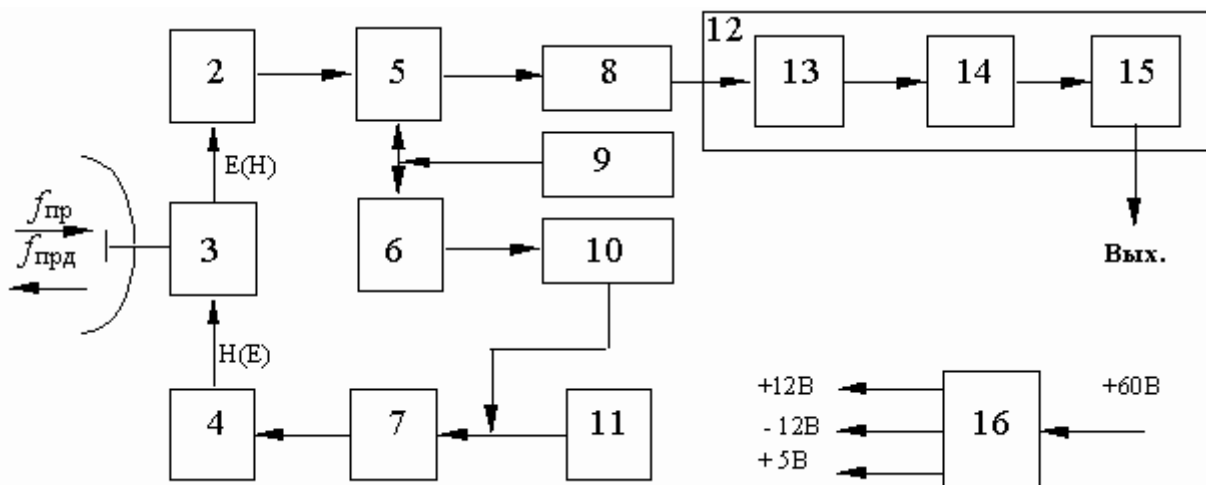


Рис.2.10 Структурна схема ППС

Джерело вторинного електроживлення 16 забезпечує перетворення постійної напруги +60 В стабілізовану напругу +12 В, - 12 В і +5 В, необхідні для живлення функціональних вузлів станції.

Параболічна антена, приймально-передавальні пристрої і джерело вторинного живлення конструктивно розміщені в герметичному циліндричному контейнері діаметром 300 мм і завдовжки 250 мм. Малі масогабаритні характеристики ППС дають можливість у більшості випадків відмовитися від спеціальних щоглових споруд.

Розглянемо більш детально останні досягнення в створенні засобів використання частотного діапазону біля 140 ГГц.

Бездротові технології, які можуть управляти оптичними комунікаціями стандарти корисні для доступу організації останньої милі радіозв'язку, встановлюючи часові з'єднання для відновлення мережі відмови або інших руйнувань.

Прийняті параметри швидкості передачі для наступних служб – високоякісного телебачення (HDTV), яке вимагає швидкість 1.5-Gb/s, трьохмірних кінофільмів (3 Gb/s) HD, 4K, цифрове кіно (6 Gb/s) і супербачення (SHV) (24 Gb/s) [25] потребують в широко смуговій мережі безпроводне устаткування, яке може передавати некомпресоване Відео HD в різних ситуаціях.

Для підтримки швидкості передачі даних високошвидкісних протоколів і відео HD, а також високошвидкісних радіо технологій, доцільно використання міліметрового діапазону хвиль (MMW) в діапазоні від 30 до 300 GHz, тому що в цьому діапазоні може бути забезпечена достатня пропускна спроможність.

Діапазон від 57 до 66 GHz, де ліцензія безкоштовна, названий діапазон 60-GHz, привертає увагу для багатогігабітних бездротових систем, що відповідають вимогам споживача створення бездротових пристроїв. Були встановлені [25] деякі бездротові стандарти, як наприклад бездротовий HD, ECMA 387, IEEE802.15.3c, IEEE802.15ad (WiGig). Бездротові системи в смугах використовуються головним чином для внутрішніх застосувань, тому що атмосферне затухання, викликане кисневим поглинанням на цих частотах велике. Для забезпечення великої дальності, передбачається використання в високошвидкісних (10Gb) радіокомунікаціях діапазонів 71-76 GHz, 81-86 GHz, 94 GHz і 120-GHz, тому що атмосферне затухання на цих частотах менше, ніж на частоті 60-GHz.

Для отримання прийнятної якості при передачі на прийнятну відстань слід реалізувати максимальну енергетику каналу зв'язку, що досягається вибором виду модуляції, підвищення рівня сигналу на виході передавача, зниження величини еквівалентної шумової температури входу приймача.

Для реалізації таких параметрів були розроблені мікрохвильові монолітні інтегральні схеми в вигляді чіпів (MMIC), що представляли собою пристрої модуляції, лінійних трактів із малими шумами та підвищеним значенням потужності сигналу на виході.

Для інтегральних схем (IC) для 60-GHz радіо технології користуються транзисторами на базі кремнію, як наприклад metal-oxide-semiconductor (CMOS) і кремнієвий германієвий (SiGe) двополосний CMOS (BiCMOS) оскільки IC повинна бути масовою, то вартість досягалася максимально низькою [26]-[31].

Починаючи з частотних діапазонів 71-76, 81-86, і 94 GHz використовують антени із високим підсиленням і ускладнені напівпровідники, як наприклад арсенід (GaAs) галію і фосфід (InP) індію щоб досягти високої вихідної потужності [32]-[35].

2.2.3. Аналіз особливостей передачі по бездротовому каналу зв'язку в діапазоні 120 ГГц

В таблиці 2.2 показано досягнуті значення вихідної потужності різних частотних діапазонах із використанням різних технологій створення чіпа мікрохвильової інтегральної схеми. На рис. 2.11 показано прогрес в відстані бездротової передачі для 120-GHz радіозв'язку [46].




Дослідження бездротового радіозв'язку в діапазоні 120-GHz в межах приміщення, користуючись технологіями photonics, оскільки photonics технології мають широкосмугову мережу характеристики і використовують високочастотні сигнали, які відповідають можливостям їх створення.

Таблиця 2.2

Результати швидкості передачі і відстані в діапазоні ММХ,
отримані зарубіжними дослідниками

Bit rate, Гбіт/с	Відстань, м	Джерело
75	0,05	[44]
60	0,12	[28]

Продовження Таблиці 2.2

7	0,1	[27]
10	0,3	[40]
5	0,5	[40]
50	0,7	[40]
20	0,5	[42]
25	0,4	[41]
20	3	[26]
7	2	[43]
2	3	[27]
80	6	[45]
100	2	[45]
80	3	[45]
6	10	[31]
7	80	[30]
2	50	[30]
7	300	[35]
10	4000	НТТ
3	5000	[32]
3	7000	[33]
4	8000	[34]
2	9000	[34]
	Частота	
	60 ГГц	
	70...100ГГц	
	більше 100ГГц	

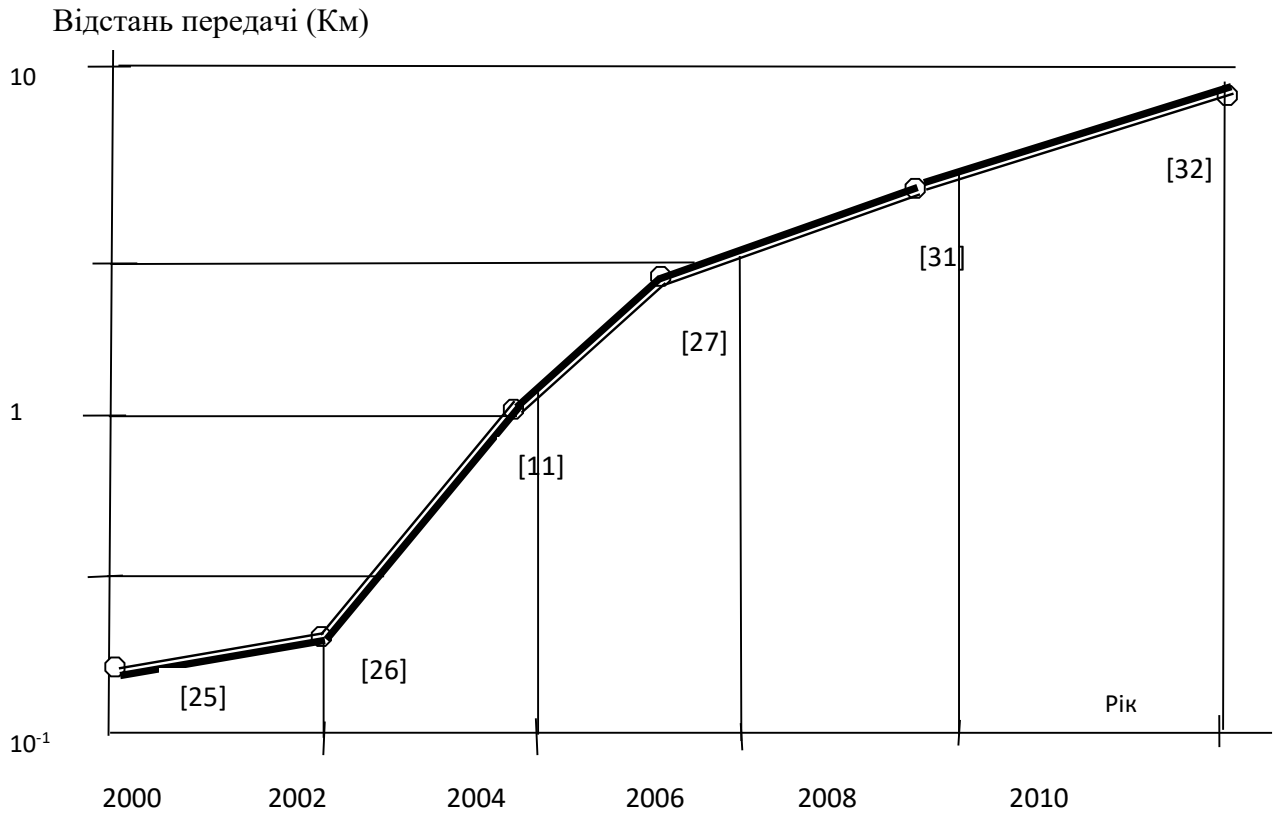


Рис. 2.11 Прогрес в відстані передачі по бездротовому каналу зв'язку в діапазоні 120 ГГц

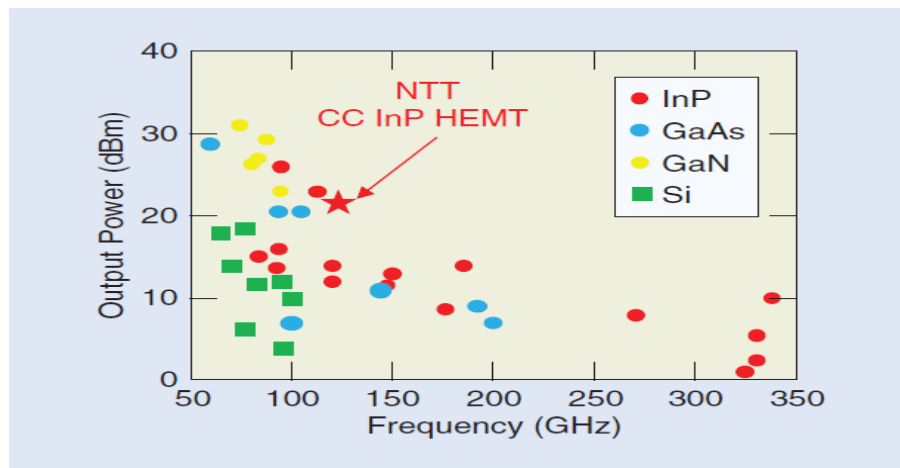


Рис.2.12 Максимальна вихідна потужність при використанні напівпровідникового чіпу

Порівняльна таблиця радіочастот у ММХ смугах

TABLE 1. Comparison of frequency bands, modulations, device technologies and antennas in experimental demonstrations of MMW wireless transmission.

Ref.	Frequency	Modulation	Technology	Antenna
[2]	60-GHz band	QPSK/16-QAM	90 nm CMOS	Liquid-crystal-polymer planar antenna
[3]	60-GHz band	BPSK/QPSK/8-PSK/ 16-QAM	65 nm CMOS	Packaged antenna (2.2 dBi)
[4]	60-GHz band	QPSK	90 nm CMOS	Horn (25 dBi)
[5]	60-GHz band	16-QAM OFDM	65 nm CMOS	HTCC and glass antennas
[6]	60-GHz band	16-QAM OFDM	65 nm CMOS	Packaged array antennas
[7]	60-GHz band	16-QAM OFDM	SiGe BiCMOS	Packaged patch-array antennas
[8]	71–76 GHz/ 81–86 GHz	QPSK	—	Cassegrain
[9]	71–76 GHz/ 81–86 GHz	BPSK	—	Cassegrain (51 dBi)
[10]	71–76 GHz/ 81–86 GHz	QPSK	—	Cassegrain (44 dBi, 51 dBi)
[11]	81–86 GHz	8 PSK	GaAs pHEMT	Conical lens horn (45 dBi)
[12]	73–93 GHz	Impluse radio	InP HEMT	Horn (23 dBi)
[13]	140-GHz band	ASK	130-nm SiGe BiCMOS	Horn
[14], [15]	120/140-GHz band	ASK	65 nm CMOS	Horn (25 dBi)
[16]	220-GHz band	OOK	50 nm mHEMT	Lens and horn
[17]	300-GHz band	ASK	Photonics-based transmitter	Dielectric lens and horn (~25 dBi)
[18]	300-GHz band	ASK	Photonics-based transmitter	Dielectric lens and horn (~25 dBi)
[19]	57.4–64.4 GHz	16-QAM OFDM	Photonics-based transmitter	Horn (23 dBi)
[20]	W band (75–110 GHz)	16-QAM	Photonics-based transmitter	Horn
[21]	W band (75–110 GHz)	16-QAM	Photonics-based transmitter	Horn (24 dBi)
NTT	120-GHz band	ASK	100-nm InP HEMT	Cassegrain (49 dBi)

2.2.4 Попередня оцінка довжини лінії зв'язку в діапазоні 130...134ГГц

Як видно із приведеного вище аналізу довжина каналу зв'язку та значення отриманої швидкості передачі може використовуватися як для обміну даними (наприклад, доступу до служб Інтернет), так і для доставки високошвидкісного телевізійного контенту. Слабка зайнятість частотного ресурсу в діапазоні дозволяє використовувати ресурс практично на безліцензійній основі. Це дозволяє використовувати його для передачі, наприклад, телевізійного потоку надвисокої чіткості.

Оскільки використання такої технології знаходиться ще на початковому етапі, вартість обладнання формування та передачі такого потоку ще висока і

його виготовлення ще не вийшло на рівень широкого масового виготовлення, то доцільно проаналізувати обмін даними із використанням запатентованого в рамках виконання роботи формувача групового сигналу.

Такий формувач створює потоки смугою 40МГц. Швидкість потоку даних в кожній смузі складає не менше 150 Мбіт/с при модуляції піднесучих 64 КАМ. Мінімальна позиційність модуляції – BPSK, що дозволяє оптимізацію потоку в залежності від параметрів приймального та передавального обладнання (потужність передавача, ЕІВП передавального тракту, ЕШТ входу приймача, добротність приймального тракту та інших).

Попередню оцінку каналу зв'язку виконуємо із урахуванням параметрів указанного формувача та очікуваних характеристик приймального та передавального трактів в смузі передачі та приймання 40МГц. Передача на прийнятну відстань потоку телебачення надвисокої чіткості потребує використання смуги частот 1...2 ГГц, тому проведемо оцінку параметру каналу зв'язку для обох випадків.

2.2.5 Оцінка довжини бездротового каналу зв'язку при модуляції 64КАМ (запропонований формувач), смуга 40МГц

Вихідні дані:

$$\lambda = 30/134 = 0,224 \text{ см} = 0,00224 \text{ м}$$

$$d = 1000 \text{ м} \quad \mathbf{(2000 \text{ м})}$$

$$d/\lambda = 446 \, 428 \quad \mathbf{(892 \, 857)}$$

$$(d/\lambda)^2 = (446 \, 428)^2 = 199 \, 298 \, 000 \, 000 = 1,99 \times 10^{11} = 2 \times 10^{11} \quad \mathbf{(787 \, 193 \, 877 \, 551 = 8 \times 10^{11})}$$

$$(4 \times \pi)^2 = 157,75$$

$$L = (4\pi d / \lambda)^2 = (4 \times \pi)^2 \times (d/\lambda)^2 = 157,75 \times 2 \times 10^{11} = 315,5 \times 10^{11} = 3,15 \times 10^{13} = 135 \text{ дБ} \quad \mathbf{(12,6 \times 10^{13} = 141 \text{ дБ})}$$

$$P_{\text{пер}} = 0,002 \text{ Вт} = 2 \times 10^{-3} \text{ Вт}$$

$$\Delta F = 40 \text{ МГц} = 4 \times 10^7 \text{ Гц}$$

$$T_{\text{ш}} = 1000 \text{ К}$$

2.2.6 Оцінка довжини бездротового каналу зв'язку при модуляції QPSK, смуга 2ГГц.

$$P_{\text{шпр}} = 1,37 \times 10^{-23} \times 1000 \times 4 \times 10^7 = 5,5 \times 10^{-13} \text{ Вт}$$

$$\text{Прийmemo } P_{\text{вхпр}} = P_{\text{шпр}} = 5,5 \times 10^{-13} \text{ Вт} = -123 \text{ дБВт}$$

$$P_{\text{пер}} / P_{\text{вхпр}} = 4 \times 10^9 = 96 \text{ дБ}$$

$$P_{\text{вхпр}} / P_{\text{пер}} = 2,75 \times 10^{-10}$$

Для варіанту 1 (дальність 1000м) вимагається забезпечити запас енергетики:

$$135 - 123 = 12 \text{ дБ}$$

Для варіанту 2 (дальність 2000м) вимагається забезпечити запас енергетики: $141 - 123 = 18 \text{ дБ}$

При модуляції 64 КАМ і кодї РС перевищення сигналу над шумом повинне досягати близько 25 дБ, тобто потрібно забезпечити біля 40...45дБ. Із урахуванням втрат і спотворень на трасі зажадає ще 10...15дБ. Облік впливу спотворень в тракті може скласти ще до 15 дБ. Разом вимагається забезпечити підвищення енергетики приблизно на 70...75 дБ. При сумарному посиленні антен 80 дБ на відстані 1км маємо запас близько 10 дБ, на відстані 2км – запас біля 4дБ.

Відмітимо, що конфігурація згаданого формувача передбачає створення восьми сорока мегагерцових каналів, в кожному із яких швидкість передачі складає біля 150 МГц/с. Тобто сумарна швидкість складе 1200 МГц/с в смузі біля 400МГц.

Розширення смуги до 2 ГГц (що дозволить передавати потоки телебачення надвисокої чіткості) приводить до збільшення $P_{\text{шпр}}$, а, значить, і $P_{\text{вхпр}}$ на 17...20 дБ і для реалізації якості передачі в межах енергетичного ресурсу, що реалізовується, знадобиться зниження позиційності модуляції, по крайній мірі, до QPSK.

2.3 Оцінка зв'язності радіозасобів самоорганізованої радіомережі

2.3.1 Поняття зв'язності

Епізодичну мережу тоді тільки можна назвати цілісною мережею, коли всі вузли можуть зв'язатися один з одним і обмінюватися даними. У даній роботі пропонується використовувати поняття "зв'язності" у вузькому сенсі (гранична зв'язність) - як геометричну радіо досяжність (в т.ч. з ретрансляцією) двох вузлів, і в широкому сенсі (інформаційна зв'язність) - як реалізацію умов і протоколів роботи мережі для (гарантованого) обміну інформацією між вузлами мережі. Перше з цих завдань вирішується шляхом передбачення (на основі моделей) таких параметрів мережі, як час зв'язності, радіус радіовидимості, ефективність ретрансляції і т.д. Реалізація інформаційної зв'язності забезпечується шляхом розробки модифікованого протоколу маршрутизації з можливістю адаптації та реконфігурації під змінні умови топології мережі.

Пропонована методика управління зв'язності епізодичній мережі включає в себе 4 етапи:

- Моделювання переміщень вузлів і оцінка кордонів областей "радіобачення";
- Розрахунок дальності зв'язку з урахуванням ретрансляції;
- Розробка методу і протоколу управління потужністю для підтримання зв'язності;
- Вдосконалення алгоритмів маршрутизації з метою реалізації самоадаптованих режимів роботи мережі з мінімальним службовим трафіком.

2.3.2 Розрахунок дальності зв'язку точка-точка з урахуванням довільного переміщення

Мобільні бездротові однорангові епізодичні мережі [11,17] будуються довільним чином і функціонують за принципом розподілу функцій управління потоками даних, між усіма вузлами мережі. В силу своєї архітектури такі мережі

не мають постійних з'єднань. Передача даних реліз на тимчасових зв'язках, які визначаються фізичними параметрами: потужністю прийнятого і переданого сигналу, розташуванням і рухливістю вузлів.

Постійний рух вузлів призводить до труднощів при побудові маршруту і передачі даних. Маршрут встановлюється в умовах певної невизначеності розташування і руху вузлів [17]. При проектуванні алгоритму маршрутизації необхідно враховувати ці особливості для забезпечення зв'язності вузлів. Епізодичні мережі, на відміну від провідних і мобільних мереж, не мають можливості управляти потоками даних через базові станції (точки доступу) через відсутність таких [17]. Для мінімізації фактору невизначеності при побудові маршруту необхідно визначити часові рамки (рис. 3, б), в яких зв'язок існує. Фактори невизначеності будуть впливати на зв'язність і стабільність організованого каналу зв'язку між вузлами, а також вибір правильного маршруту та підтримки його в робочому стані.

Час зв'язності (знаходження вузла в зоні радіобачення) можна розрахувати через відносну швидкість руху вузлів і радіусу радіобачення. Радіобачення залежить від випромінюваної потужності передавача, чутливості приймача і висоти підвісу антен. Для цього спочатку оцінимо типові розміри зони радіобачення, а потім по простій моделі оцінимо час, протягом котрого може здійснюватися побудова маршруту і передача даних.

Оцінка дальності зв'язку "точка-точка". Епізодична мережа передачі даних функціонує, як правило, в межах прямої видимості вузлів. Радіус кола прямої видимості (Р) залежить від висоти розміщення передавальної (Х) та приймаючої (х) антен [9] і обчислюється за формулою:

$$R = 3,57(\sqrt{KH} + \sqrt{Kh}), \quad (2.9)$$

де К-поправочний коефіцієнт, що враховує відображення сигналу.

На рис. 2.13 наведені радіуси дальності зв'язку для К = 0 (а) і К = 4/3 (б).

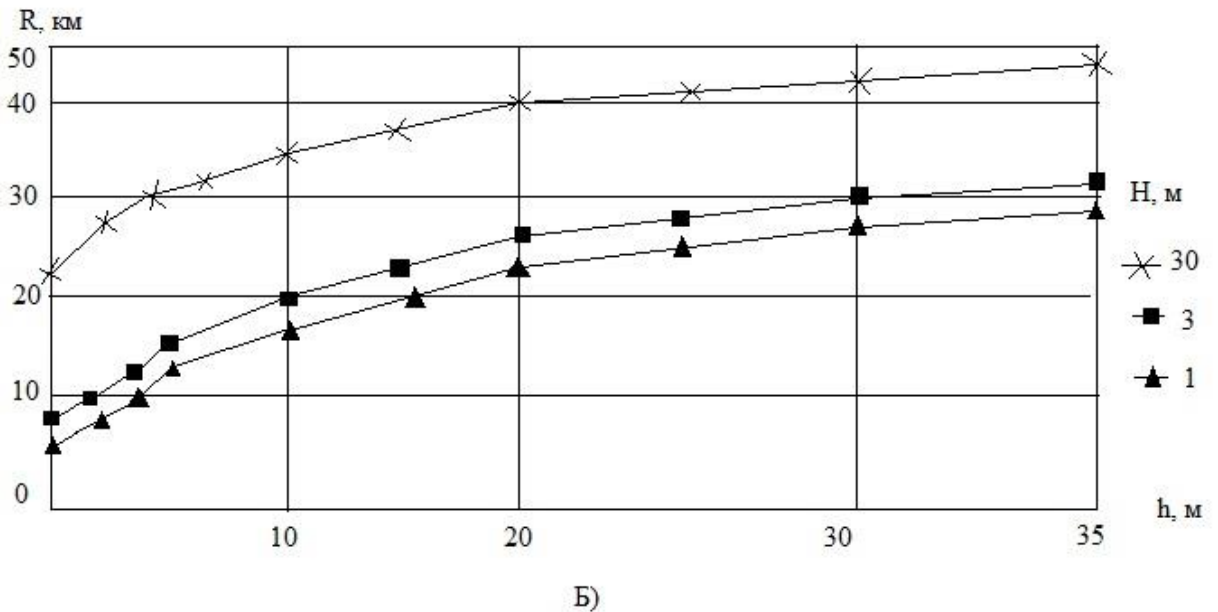
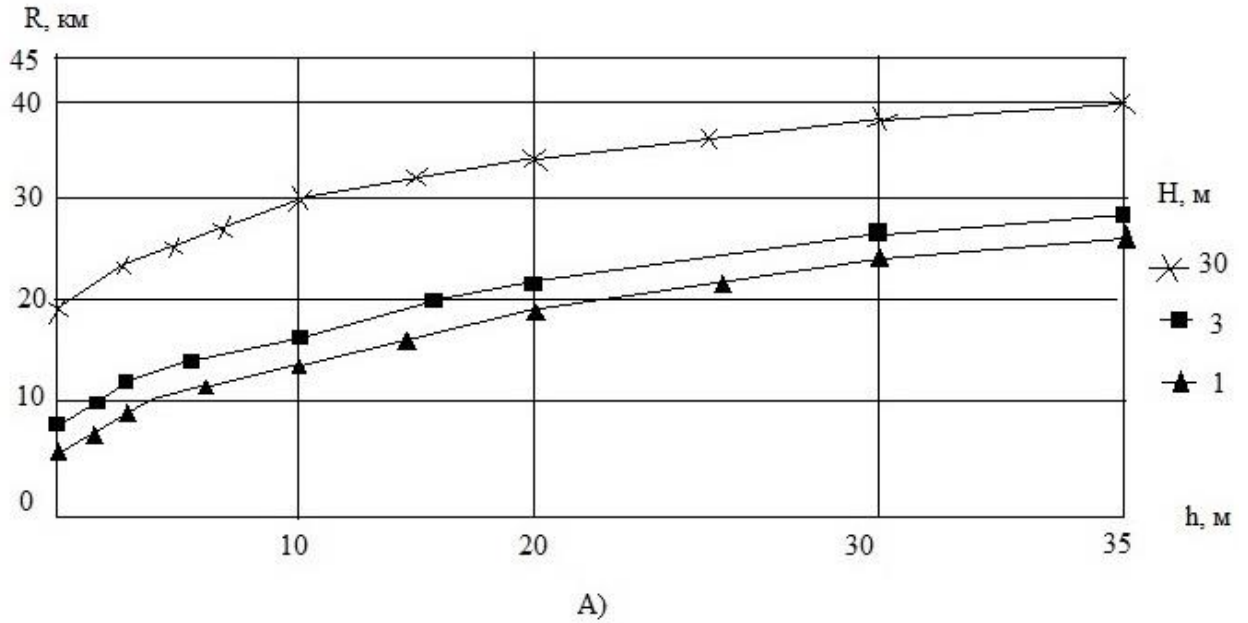


Рисунок 2.13 Дальність прямої видимості з урахуванням висоти підвісу антен

Як видно, для трас, обмежених висотою підвісу антен, типове відстань для зв'язку вузол-вузол в епізодичній мережі в ідеалі може досягати 7-10 км. У міських умовах дальність "радіовидимості" скорочується (може затиснятися, перш за все, житловими і промисловими будівлями, лесопосадковою зоною, а також обмежуватися умовами поширення на різних частотах). Для малопотужних систем дальність дії визначається загасанням сигналу (J), і для частоти 2,4 ГГц і потужності на прийомі -100дБ для вільного простору у відповідності з $J = 32,45 + 20 \lg(R, \text{км}) + 20 \lg(f, \text{МГц})$ получимо $R = 10^A$, де

$$A = \frac{100 - 32,45 - 20 \lg(2400)}{20}, \quad R = 0,9 \text{ км.}$$

За моделлю Хата [9] загасання можна виразити у вигляді

$$f = 69,5 + 26,1 \lg(f, \text{ МГц}) - 13,82 \lg(H, \text{ м}) - a(h, \text{ м}) \\ + [44,9 - 6,5 \lg(H, \text{ м})] \lg(R, \text{ км}) - k,$$

Де для великих міст $a(h, \text{ м}) = 3.2[\lg(11,75h)]^2 - 4,97$ и $k=0$.

Звідки отримуємо $R = 10^A$, де

$$A = \frac{Pt + G_{tot} - Pr - 69,55 - 26,16 \lg(f, \text{ МГц}) + 13,82 \lg(H) + a(h) + k}{44,9 - 6,55 \lg(H)}$$

Тобто, $R=0,611$ км.

Іншими словами, в міських умовах типова дальність зв'язку вузол-вузол в епізодичних мережах не перевищує 500-600 м.

Розрахунок часу зв'язку з урахуванням рухливості абонентів.

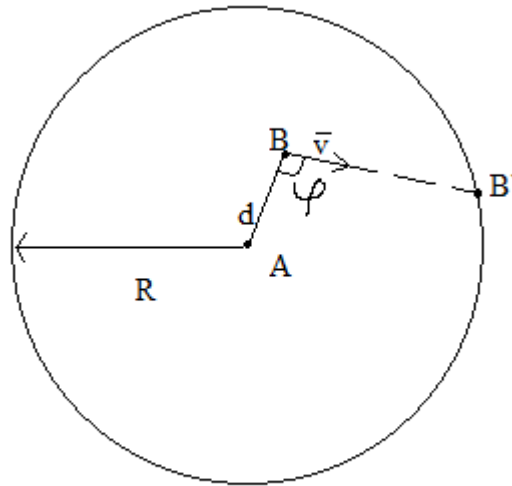
Епізодичні мережі припускають довільне (у напрямку і швидкості) переміщення вузлів. На практиці, якщо мова йде про мобільний зв'язок "пішохід-пішохід", в місті напрямок руху змінюється у відповідності з планом його забудови (найчастіше повороти 90°), а швидкість реально не перевищує 2 м / с, автомобілі з урахуванням обмежень швидкості в місті переміщаються з граничною швидкістю до 16 м / с.

Розглянемо переміщення вузла В щодо вузла А, розташованого спочатку від нього на відстані d , зі швидкістю v під кутом φ (рис 2.2, а)

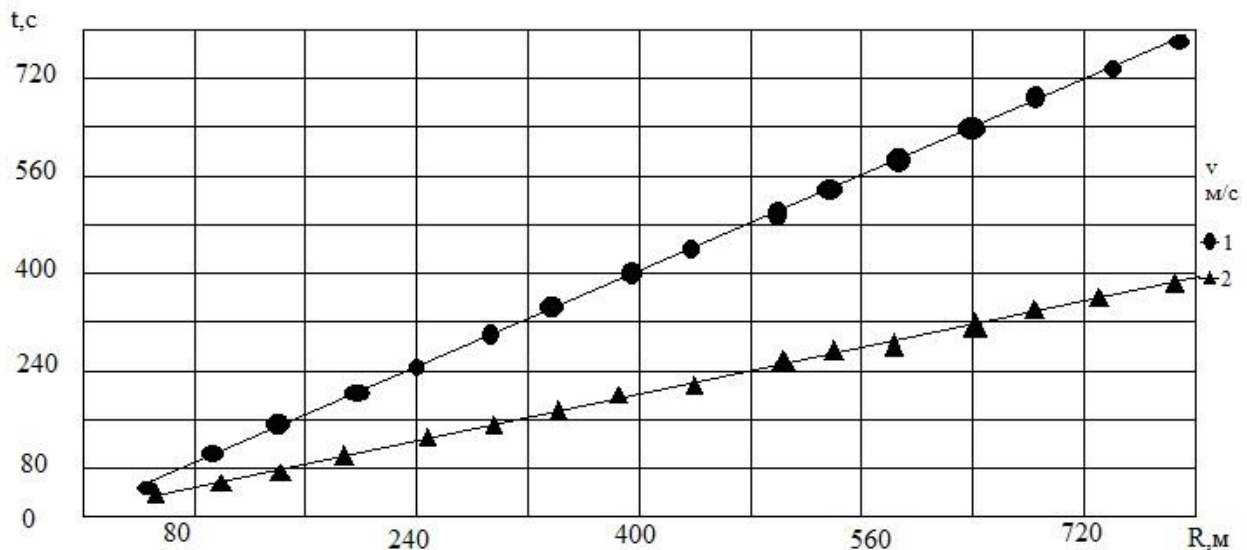
Вважаємо, що час зв'язку (t) - це проміжок часу, поки вузол В не виявиться в точці В', обмеженою радіусом радіобачення. Тоді з використанням теореми хорд отримаємо

$$t = \frac{d \cos \varphi + \sqrt{R^2 - d^2 \sin^2 \varphi}}{v} \quad (2.10)$$

За вихідними даними $d=30$ м, $v=1$ м/с и $\varphi = 90^\circ$ отримуємо результати, наведені на рис.2.14, б. З цих даних випливає, що час зв'язку вузол-вузол може становити не менше 3-7 хвилин.



A)



B)

Рисунок 2.14 Модель А) і Б) - результати розрахунку зв'язності

Розрахунок часу зв'язку при ретрансляції з рухомими вузлами. Розглянемо модель, в якій вузол А може здійснювати зв'язок з вузлом С, тільки за рахунок ретрансляції сигналу через вузол В. Вузол С знаходиться поза межами "радіобачення" вузла А. При цьому С знаходиться в зоні видимості В. Для спрощення вважаємо, що радіус "радіобачення" R для всіх вузлів однаковий.

Для здійснення зв'язку вузол А "будує маршрут" до С, і на це витрачається деякий час t . Оскільки В і С знаходяться в русі щодо один одного (і щодо А зі швидкостями, v та відповідно) (рис. 2.15, а), наприклад: розходяться, тоді існує ймовірність того, що за час t встановлення маршруту від А до С ретранслятор В

і кінцевий вузол С розійдуться настільки, що передача повідомлень від А до С виявиться неможливою. Розрахуємо цей час.

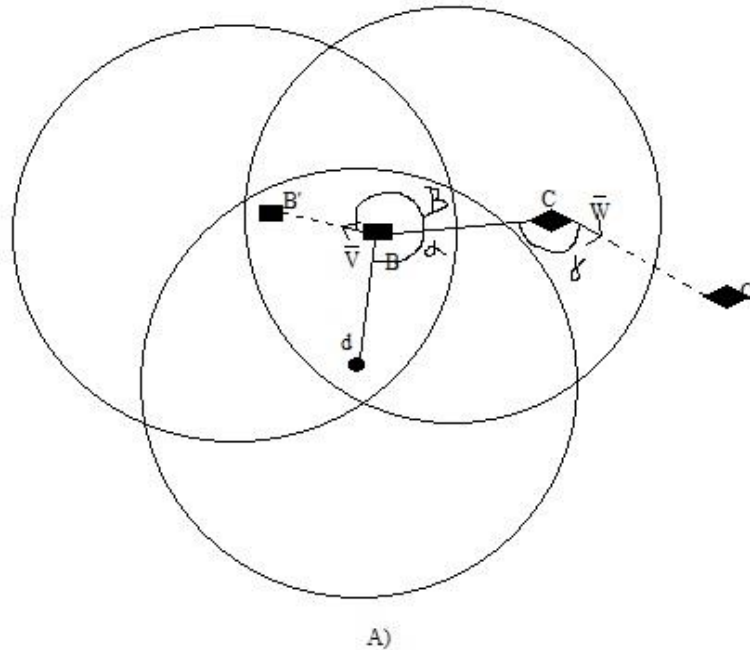


Рисунок 2.15 –Результати зв'язності

Вважаємо, що час(t) - це проміжок часу, поки вузол С не виявиться поза межами радіовидимості ретранслятора, тобто в точці С. Тоді з використанням простих формул отримаємо

$$t = \frac{\sqrt{(AB^2 + AC^2 - 2AB * AC \cos(\alpha + \beta + \gamma))}}{V}$$

Для вихідних даних $AB < R$, $BC < R$ отримаємо результати, показані на графіку на рис.2.14, Б.

2.3.3 Методика оцінки щільності радіовузлів в самоорганізованих мережах

В даний час мобільні бездротові мережі [11,12], що самоорганізуються, будуються довільним чином і функціонують за принципом розподілу функцій управління потоками даних між всіма радіовузлами мережі. Через свою архітектуру такі мережі не мають постійних з'єднань. Передача даних реалізується через тимчасові зв'язки, які визначаються фізичними параметрами:

потужністю переданого та прийнятого радіосигналів, розташуванням і рухливістю радіовузлів. Постійний рух радіовузлів призводить до труднощів при побудові маршруту і передачі даних. Маршрут встановлюється в умовах деякої невизначеності розташування і руху радіовузлів. При проектуванні алгоритму маршрутизації необхідно враховувати ці особливості для забезпечення зв'язності радіовузлів.

Мережі, що самоорганізуються, на відміну від дротових і стільникових мереж, не мають можливості управляти потоками даних через базові станції (точки доступу) внаслідок їх відсутності. Час зв'язності (знаходження радіовузла в зоні радіовидимості) можна розрахувати через відносну швидкість руху таких радіовузлів і радіус радіовидимості. В свою чергу радіовидимість залежить від випромінюваної потужності передавача, чутливості приймача і висоти підвісу антен. Для цього зазвичай оцінюють типові розміри зони радіовидимості, а потім за простою моделлю оцінюють час, протягом якого можуть здійснюватись побудова маршруту і передача даних.

Питання зв'язності таких мереж радіозв'язку досліджуються в багатьох роботах, що стосуються нескінченного числа радіовузлів, тоді як у випадку мереж з обмеженим числом радіовузлів виникають серйозні проблеми. Для відомої топології завжди можна визначити параметри, що гарантують прийнятну зв'язність в радіомережі. Велике значення для визначення зв'язності в мережах з великим числом вузлів грає вид функції загасання потужності. Для підтримки задовільної зв'язності в такій радіомережі необхідно або знижувати відношення сигнал/завада, або обмежувати число радіовузлів, які розпочинають передавати інформацію в один і той же час, в залежності від повного числа вузлів мережі. В обох випадках зв'язність можна підтримувати, але за рахунок втрати продуктивності. Тому існує оптимальне співвідношення (суперечливий вибір параметрів) між ємністю мережі (продуктивністю) і її зв'язністю.

2.3.3.1 Математична модель оцінки «необхідної» щільності радіовузлів мережі

Під «необхідною» мається на увазі така щільність радіозасобів мережі, що само організується (СОМ), яка забезпечує зв'язність радіостанцій мережі з потрібною ймовірністю P_n .

Ймовірність знаходження N сусідніх радіовузлів на площі S при Пуассонівському розподілі радіозасобів визначається наступним виразом [48]:

$$P_n = \frac{e^{-\rho_S S} (\rho_S S)^N}{N!}, \quad (2.11)$$

де $\rho_S = \frac{N}{S}$ – щільність радіозасобів мережі.

Тоді ймовірність відсутності N сусідніх радіовузлів в зоні радіопокриття окремого радіозасобу буде дорівнювати:

$$\overline{P_n} = (1 - P_n) = e^{-\rho_S S}, \quad (2.12)$$

При середніх втратах розповсюдження радіохвиль зона радіопокриття окремого радіозасобу без урахування швидких і повільних завмирань сигналу є колом площею, тобто:

$$S = \rho R_{cp}^2, \quad (2.13)$$

де R_{cp}^2 – середня дальність радіозв'язку.

З урахуванням швидких і повільних завмирань радіосигналу вираз (2.12) буде мати наступний вигляд:

$$\overline{P_n} = e^{-\rho_S \pi m [R_{cp}^2]}, \quad (2.14)$$

де $m [R_{cp}^2]$ – математичне очікування квадрата середньої дальності радіозв'язку.

Як відомо, ймовірність зв'язку залежить від $m [R_{cp}^2]$ таким чином:

$$P_c = \frac{m [R_{cp}^2]}{R_{cp}^2} \quad (2.15)$$

З іншого боку, ймовірність успішного прийому радіосигналу з урахуванням повільних і швидких завмирань визначається наступним виразом [11]:

$$P_c = \frac{2}{\alpha} \Gamma\left(\frac{2}{\alpha}\right) e^{\left(\frac{\sqrt{2}\sigma}{\alpha}\right)^2}, \quad (2.16)$$

де $\Gamma(\cdot)$ – гамма функція,

u – є середнє квадратичне відхилення потужності прийнятого сигналу

α – показник загасання потужності прийнятого сигналу.

Тоді, після відповідних перетворень і для зручності подальших досліджень, вираз (4) запишемо в наступній формі:

$$\bar{P}_n = e^{-\rho_s \pi R^2 \gamma}, \quad (2.17)$$

де γ – показник впливу завмирання сигналу на ймовірність відсутності N сусідніх радіовузлів, що дорівнює:

$$\gamma = \frac{2}{\alpha} \Gamma\left(\frac{2}{\alpha}\right) e^{\left(\frac{\sqrt{2}\sigma}{\alpha}\right)^2}, \quad (2.18)$$

Згідно з [49,50], ймовірність зв'язності визначається як:

$$P_{cb} = e^{-N\bar{P}_n}, \quad (2.19)$$

Значення ρ_s має інтерес для побудови початкового наближення СОМ, коли відома площа зони дії СОМ і визначена необхідна дальність радіозв'язку R .

Для оцінки необхідної щільності радіозасобів СОМ необхідно визначити ρ_s . Для цього перетворимо вираз (2.17) у вигляді:

$$\rho_s e^{-\rho_s \pi R^2 \gamma} = -\frac{\ln P_{cb}}{S}. \quad (2.20)$$

З точки зору шуканого параметра ρ_s вираз (2.20) є трансцендентним рівнянням, що набуває вигляду

$$y \cdot e^{by} = a, \quad (2.21)$$

де $y = \rho_s$, $b = -\pi R^2 \gamma$ та $a = -\frac{\ln P_{cb}}{S}$.

Рішенням рівняння (2.21) є вираз

$$y = \frac{W(ab)}{b}, \quad b \neq 0, \quad (2.22)$$

де $W(x)$ – W -функція Ламберта [51].

Наведемо найпростіші властивості W -функції Ламберта для дійсних значень x .

Дійсна W -функція Ламберта визначається як рішення функціонального рівняння $W(x)e^{W(x)} = x$. Розуміння того, що W -функція Ламберта є функцією, оберненою до функції $x = e^W$, дозволяє представити графік функції (рис. 2.16) і встановити її найпростіші властивості.

W -функція Ламберта визначена в інтервалі $(-1/e; \infty)$, де приймає значення від $-\infty$ до ∞ , причому для негативних x функція є двозначною. Точка A з координатами $(-1/e, -1)$ ділить графік функції на дві гілки, верхню $W_0(x)$ і нижню $W_{-1}(x)$ таким чином, щоб обидві гілки в точці A мали вертикальну дотичну. Верхня гілка $W_0(x)$, яка часто називається основною, проходить через початок координат і більше не має особливостей. Нижня ж гілка $W_{-1}(x)$ має точку перегину B з координатами $(-2/e^2; -2)$ та вертикальну асимптоту при $x=0$.

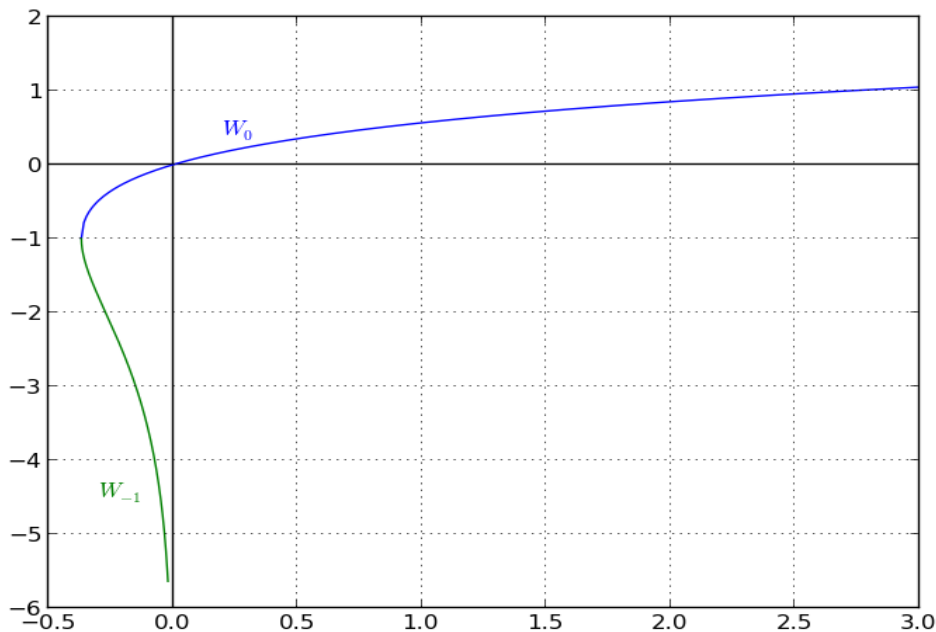


Рис. 2.16 Графік W -функції Ламберта

Для того, щоб визначити, яка з двох гілок W -функції Ламберта є рішенням рівняння (2.21) щодо щільності радіостанцій ρ_S , підставимо параметри $y = \rho_S$, $b = -\pi R^2 \gamma$ і $a = -\frac{\ln P_{cb}}{S}$ у вираз (2.22):

$$\rho_S = -\frac{1}{\pi R^2 \gamma} W\left(\frac{\ln P_{cb}}{S} \pi R^2 \gamma\right), \quad (2.23)$$

де множник $W(\cdot)$ повинен приймати негативні значення, тобто:

$$W\left(\frac{\ln P_{cb}}{S} \pi R^2 \rho_S\right) \leq 0. \quad (2.24)$$

А знаменник є площею зони радіопокриття радіостанції $S = (\pi R^2 \rho_S)$.

Оскільки число сусідів окремої радіостанції $N = \rho_S S$ не може бути менше одиниці, для щільності радіостанцій ρ_S повинна виконуватись умова:

$$\rho_S \geq \frac{1}{\pi R^2 \gamma}. \quad (2.25)$$

Для виконання умов (2.24) і (2.25) у виразі (2.23) слід використовувати нижню гілку W-функції Ламберта $W_{-1}(x)$, яка приймає значення від $-\infty$ до 1.

Таким чином, необхідну щільність радіостанцій ρ_S можна визначити за формулою:

$$\rho_S = -\frac{1}{\pi R^2 \gamma} W_{-1}\left(\frac{\ln P_{cb}}{S} \pi R^2 \gamma\right). \quad (2.26)$$

На рис. 2.17 і 2.18 представлено результати моделювання залежності ρ_S при $P_{cb} = 95\%$ і 98% відповідно.

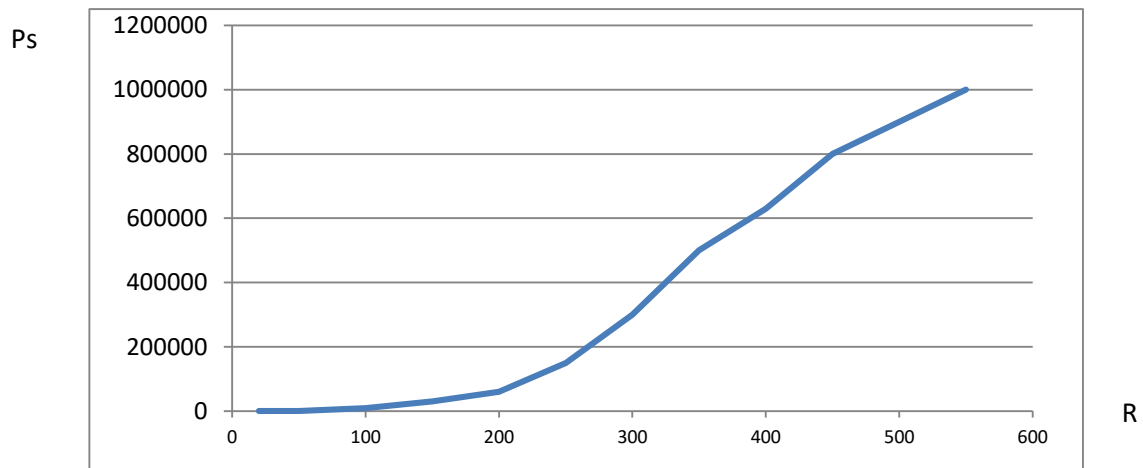


Рис.2.17 Залежність необхідної густоти радіозасобів ρ_S при $\alpha = 3$; $\sigma = 8$;

$$S = 10^7; P_{cb} = 0.95$$

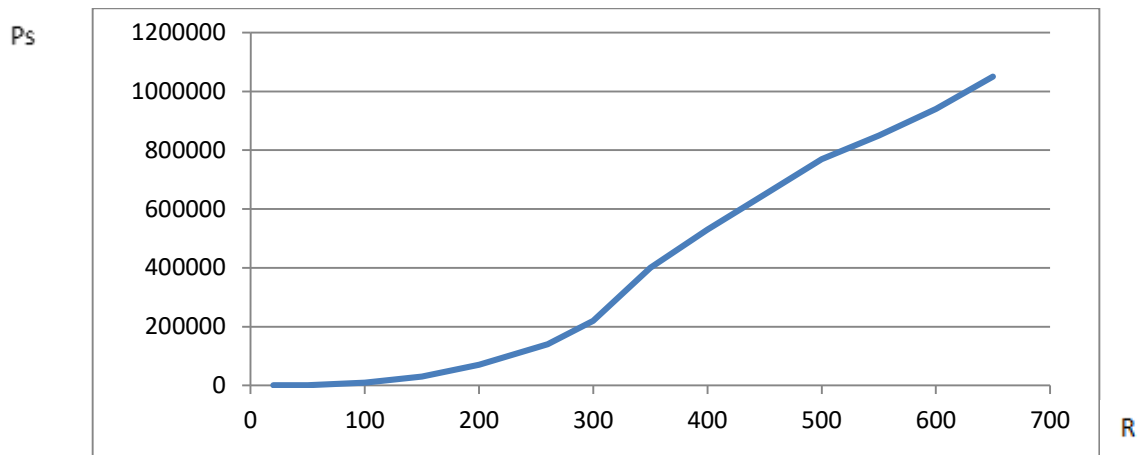


Рис.2.18 Залежність необхідної густоти радіозасобів ρ_s при $\alpha = 4$; $\sigma = 8$; $S = 10^8$; $P_{cb} = 0.98$

Підставивши $\rho_s = \frac{N}{S}$ у вираз (2.26), можна визначити число радіозасобів СОМ N , як функцію дальності радіозв'язку R і площі території СОМ S :

$$N = -\frac{S}{\pi R^2 \gamma} W_{-1} \left(\frac{\ln P_{cb}}{S} \pi R^2 \gamma \right) \quad (2.27)$$

Висновки до розділу 2

1. На базі аналізу досягнення зарубіжних фірм в області використання терагерцового діапазону проаналізовано перспективи розгортання каналу зв'язку в діапазоні 130...134 ГГц в Україні із використанням розробленого обладнання виймального та передавального трактів та формувача групового сигналу із використанням технології 802.11n.

2. Збільшення довжини каналу зв'язку вимагає в першу чергу збільшення енергетики каналу (підвищення рівня потужності передавача) та пониження шуму на вході приймального тракту (підвищення чутливості). При підвищенні вимог до якості зв'язку відповідно підвищуються вимоги до показників зв'язності радіомереж, що самоорганізуються.

3. При фіксованій дальності радіозв'язку R зі збільшенням площі території СОМ S , необхідна щільність радіостанцій СОМ збільшується. Пояснюється це тим, що для збереження зв'язності мережі з заданою

ймовірністю P_{cb} при збільшенні S число радіо засобів, розташованих навколо одного (відокремленого) з них, повинне бути збільшене.

4. В результаті виконаної оцінки виявлено вплив умов поширення радіохвиль на показники зв'язності радіозасобів на основі технології SDR, зокрема, встановлено, що повільні завмирання зменшують, а швидкі завмирання збільшують ймовірність «ізоляції» радіозасобів.

РОЗДІЛ 3

ОЦІНКА ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ ТА ЖИВУЧОСТІ САМООРГАНІЗОВАНОЇ РАДІОМЕРЕЖІ ПОБУДОВАНОЇ РАДІОЗАСОБАМИ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ SDR

3.1 Постановка задачі

Питанням оцінки пропускної спроможності СОМ присвячена достатньо велика кількість наукових робіт [52-57]. Проте, на відміну від зв'язності, особливості отримання результатів під час оцінки пропускної спроможності СОМ є істотно різноманітнішими. Пояснюється це тим, що для оцінки зв'язності самоорганізованої радіомережі, як об'єкт дослідження, можна розглядати лише з погляду двох невизначеностей: невизначеності територіального розподілу радіозасобів і невизначеності розповсюдження радіохвиль. Для оцінки пропускної спроможності радіозасобів СОМ, крім двох вищеназаних невизначеностей, потрібно враховувати активність інформаційного обміну в радіомережі. Для цього зазвичай вводиться параметр ймовірності передачі радіозасобів.

Прослідкуємо три напрямки робіт за аналітичною оцінкою пропускної спроможності СОМ на основі радіозасобів з круговою діаграмою направленості.

Перший напрямок містить ранні (класичні) роботи з пакетних радіомереж [49]. В них завдання математичного аналізу СОМ зводилося до визначення такої дальності радіозв'язку R , яка б була компромісною з точки зору умов функціонування протоколів мережевого і каналного рівнів радіостанції СОМ. З іншого боку, велика дальність радіозв'язку призводила до збільшення рівня внутрісистемних завад в загальному радіоканалі і, таким чином, до зменшення просторового ущільнення одночасних передач в СОМ, що характеризуються параметром p . При цьому як протоколи каналного рівня розглядалася АЛОНА.

Другий напрямок містить роботи з оцінки пропускної здатності на основі математичного апарата ланцюгів Маркова. В них завдання аналізу СОМ зводилось до визначення такої ймовірності передачі p , яка б була компромісною

з точки зору протоколу каналного рівня. Як протоколи каналного рівня розглядались протоколи з фізичним GSMА та віртуальним контролем зайнятості радіоканалу GSMА/СА.

Відомим недоліком двох розглянутих напрямків роботи є математична абстракція радіоприймання на фізичному рівні, згідно з якою ймовірність радіоприймання P_{SUC} вважається достовірно успішною за умови, що приймаюча радіостанція знаходиться на відстані r_0 , яка не перевищує дальність радіозв'язку R :

$$P_{SUC} = \begin{cases} 1, & r_0 \leq R \\ 0, & r_0 > R \end{cases} \quad (3.1)$$

З точки зору відношення сигнал/(шум + внутрішньо системні завади) SINR (Signal interference plus Noise Ratio) математична абстракція (3.1) не враховує залежності ймовірності успішного радіоприймання від невизначеності та територіального розподілу радіостанцій мережі і рівня утворюваних внутрішньо системних завад.

Для кількісної оцінки можливостей радіоприймання вводиться критерій ймовірності успішного радіоприймання $P_{SUC}[\text{SINR}]$.

$$P_{SUC}[\text{SINR}] = P[\text{SINR} \geq \gamma]. \quad (3.2)$$

Відношення SINR з урахуванням середніх втрат розповсюдження, повільних і швидких завмирань визначається виразом

$$\text{SINR}(r_0, \beta_0, \alpha_0, r_i, \beta_i, a_i, k_I(p, \lambda_S)) = \frac{P_0(r_0, \beta_0, \alpha_0)}{P_{No} \sum_{i=1}^{k_I(p, \lambda_S)} P_i(r_i, \beta_i, a_i)}, \quad (3.3)$$

де $P_i(r_i, \beta_i, a_i)$ - потужність внутрішньосистемних завад радіостанції T на вході приймача RX_0 з урахуванням середніх втрат розповсюдження, повільних і швидких завмирань; $k_I(p, \lambda_S)$ - кількість джерел внутрішньосистемних завад; p - ймовірності передачі радіостанції.

Згідно з (3.2) і (3.3), ймовірності успішного радіоприймання в загальному виді визначається виразом:

$$P_{SUC}[\text{SINR}(r_0, \beta_0, \alpha_0, r_i, \beta_i, a_i, k_I(p, \lambda_S)), \gamma] = P\left[\frac{P_0(r_0, \beta_0, \alpha_0)}{P_{No} \sum_{i=1}^{k_I(p, \lambda_S)} P_i(r_i, \beta_i, a_i)} \geq \gamma\right]. \quad (3.4)$$

Вплив внутрішньосистемних завад на ймовірність успішного радіоприймання було математично проаналізовано в третьому напрямку роботи [58]. В роботі [17] було виконано оцінку пропускнуої здатності радіостанції СОМ, в роботі [9] – для випадку середніх втрат розповсюдження і завмирань.

Для аналітичної оцінки пропускнуої здатності в СОМ, як для протоколів випадкового доступу, так і для протоколів доступу з контролем зайнятості радіоканалу, зазвичай використовуються допущення за дискретною часовою шкалою, в якій час обчислюється слотами в режимі насичення, в якому кожна радіостанція завжди Що стосується територіального розподілу радіостанції, зазвичай використовуються допущення щодо однорідної радіомережі, коли дальність радіозв'язку R однакова для всіх радіостанцій СОМ, а також є припущення про пуассонівський розподіл радіостанцій в зоні дії мережі. Пропускна спроможність радіостанції СОМ $C[r_0, p]$ при випадковому встановленні і введенні зв'язку за протоколом АЛОНА можна визначити як ймовірність успішної передачі за час одного слота за умови сеансу зв'язку в цьому слоті:

$$Z(r_0, p, \gamma) = (p) \cdot P_{SUC}[r_0, p, \gamma], \quad (3.5)$$

де $P_{SES}(p)$ – ймовірність сеансу зв'язку між передавальною і приймаючою радіостанціями; $P_{SUC}[SINR(r_0, p, \gamma), \gamma]$ – ймовірність успішного радіоприймання радіостанції мережі.

Формула ймовірності сеансу зв'язку між передавальною і приймаючою радіостанціями, працюючими в загальному радіоканалі, отримана в роботі [49]:

$$P_{SES}(p) = (1 - p)(1 - e^{-p}). \quad (3.6)$$

Таким чином, для оцінки пропускнуої здатності в самоорганізованій радіомережі на основі радіостанції зі спрямованими антенами необхідно вирішити наступні завдання:

- оцінити вплив невизначеності територіального розподілу радіостанцій на рівень внутрішньосистемних завад;
- оцінити вплив внутрішньосистемних завад на ймовірність успішного радіоприймання радіостанції мережі;
- оцінити вплив спрямованих антен на ймовірність успішного

радіоприймання радіостанції мережі.

3.2 Модель оцінки статистичних характеристик багатопроменевого каналу високошвидкісних широкосмугових мереж бездротового зв'язку

У даному підрозділі наводяться результати досліджень статистичних характеристик пропускної здатності системи цифрового радіозв'язку з ортогональними піднесучими, що функціонує в частотно-селективному каналі. Визначено пропускну спроможність OFDM системи радіозв'язку та запропоновано її статистична модель для випадкового частотно-селективного каналу зв'язку зі статистикою впливу одночасно швидких і повільних завмирань.

3.2.1 Загальні зауваження

Для систем мобільного зв'язку, що працюють за певними стандартами, розробниками стандартів рекомендуються свої моделі радіоканалів. При цьому практично всі розробники обладнання систем стільникового зв'язку приймають модель каналу як сукупність радіохвиль, які прийшли до приймача по ламаним маршрутам від передавача після багаторазових відбиттів від місцевих предметів і від підстилаючої поверхні. Так стандарт GSM - 900 передбачає два варіанти таких моделей:

- модель з дискретною багатопроменевою при відсутності сигналу прямої видимості;

- модель з дискретною багатопроміневою і наявністю сигналу прямої видимості, що характерно при близьких відстанях від приймача до передавача системи стільникового зв'язку.

Стандартом GSM-900 модель каналу для міста рекомендується як дванадцять променів розповсюдження, кожен з яких має яскраво виражені дисперсійні властивості - розширення затримки і доплерівське розширення спектру. У кожному промені маються незалежні від інших променів доплерівський спектр і профіль затримок.

Чисельні значення параметрів компонент багатопробеневиx сигналів, рекомендованиx стандартом GSM - 900, наведені в [58] (табл. 8.2, с. 263) для випадку сільської місцевості (6 променів поширення) і горбистій місцевості (табл. 8.3, с.263-264) .

Недолік моделей, пропонованиx стандартом GSM - 900, полягає в тому, що рекомендована спрощена релеєвська статистика завмирань. Це часто ускладнює моделювати, хоча і рідше зустрічаються на практиці, швидкі завмирання глибиною до 22,5 дБ. І якщо при побудові приймально-передавальної апаратури систем стільникового зв'язку це не є порівняно важливим, то при виборі точок розміщення базових станцій стільникового зв'язку цей факт набуває великого значення.

Без врахування реальних глибин завмирань можлива побудова мережі базових станцій, не перекривають територію повністю і, як наслідок, наявність зон радіомовчання в мережі. Подібна ситуація приводить в кінцевому результаті до необхідності побудови додаткових базових станцій, що економічно ніяк не виправдано.

3.2.2 Постановка задачі

При розробці OFDM системи радіозв'язку параметри підбираються таким чином, щоб широкопasmовий частотно-селективний канал зв'язку можна було уявити у вигляді сукупності N піднесуть (частотних підканалів) з плоскою частотною характеристикою.

Наприклад, для широкопasmової системи на основі стандарту IEEE 802.11a смуга каналу F дорівнює 16,25 МГц ($1/F = 60$ нс), ширина піднесучої $f = 0,3125$ МГц ($1/f = 320$ нс). Так як в більшості випадків середньоквадратичний час затримки не перевищує ста наносекунд [59], то в цілому канал є частотно-селективним, але в той же час можна вважати, що кожна піднесуча (підканал) має плоску частотну характеристику.

У цьому випадку можна вважати, що передавальна функція каналу визначається сукупністю значень комплексних коефіцієнтів передачі каналу на

кожній піднесучій $\{H_j\}$. При цьому значення коефіцієнтів посилення каналу на піднесучих $\{\lambda_j\}$ визначаються наступним чином:

$$\lambda_j = |H_j|^2 = \mu_j^2, \quad (3.7)$$

де μ_j - амплітуда комплексного коефіцієнта передачі каналу на j -й піднесе.

У частотно-селективному каналі значення амплітуд комплексних коефіцієнтів передачі каналу є випадковими величинами і залежать від розсіюючого середовища та умов розповсюдження.

Як відомо, в широкосмугових OFDM системах радіозв'язку висока швидкість досягається шляхом паралельної передачі даних по N частотним підканалам (піднесучих). Тоді використовуючи залежності [60], знайдемо пропускну спроможність OFDM системи С:

$$\begin{aligned} C &= \int_{\Delta f} \log_2 \left(1 + \frac{S(f)}{N(f)} \right) df = \sum_{j=1}^N \int_{\Delta f} \log_2 \left(1 + \frac{S_j(f)}{N_j(f)} \right) df = \\ &= \sum_{j=1}^N \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{P_j^R}{\sigma_{nj}^2} \right) = \Delta f \sum_{j=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{\lambda_j P_j}{\sigma_{nj}^2} \right) = \\ &= \Delta f \sum_{j=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{\lambda_j^2 P_j}{\sigma_{nj}^2} \right) \left[\frac{\text{біт}}{\text{с}} \right], \end{aligned} \quad (3.8)$$

де P_j^R - потужність сигналу на вході приймача;

σ_{nj}^2 - потужність адитивного шуму;

P_j - вихідна потужність сигналу;

λ_j - коефіцієнт посилення каналу по потужності, μ_j - амплітуда

комплексного коефіцієнта передачі каналу на j -й піднесучій;

$S(f)$ - спектральна щільність сигналу;

$N(f)$ - спектральна щільність адитивного гаусовських шуму,

Δf - ширина смуги сигналу на піднесучій.

Отже, пропускну спроможність OFDM системи може бути представлена як сума пропускну спроможностей частотних підканалів (піднесучих), для кожного з яких справедлива формула Шеннона [60].

Оскільки пропускна спроможність каналу зв'язку залежить від амплітуди комплексних коефіцієнтів передачі на кожній піднесучій, то сама пропускна спроможність є випадковою величиною, розподіл якої визначається розподілом сукупності значень.

Поширення радіосигналу в багатопроменевих каналах, до яких відносяться канали мобільного зв'язку в місті супроводжуються швидкими (інтерференційними) і повільними завмираннями, які можна розглядати як результат випадкових змін коефіцієнта передачі радіоканалу. Надалі вважаємо, що зміна сигналу на вході приймача не залежить від потужності корисного сигналу і визначається тільки параметрами радіоканалу.

В [61-63] розглядається вплив завмирань огинаючої сигналу, викликаних інтерференцією, при цьому вплив повільних завмирань на пропускну здатність OFDM і вплив одночасно швидких і повільних завмирань не розглядається.

У даному підрозділі досліджується вплив одночасно швидких і повільних завмирань на пропускну здатність каналу OFDM систем, що дозволяє оцінити ефективність застосовуваних способів боротьби з ними і вибрати параметри приймально-передавальних пристроїв при проектуванні радіосистем.

Виходячи з вищесказаного, при дослідженні пропускну спроможності радіоканалу зв'язку OFDM системи була використана статистична модель каналу, основана на наступних припущеннях:

- канал зв'язку є випадковим квазістаціонарним широкосмуговим частотно-селективним;

- значення амплітуди комплексних коефіцієнтів передачі каналу на всіх піднесучих є статистично незалежними, однаково розподіленими випадковими величинами;

- амплітуди комплексних коефіцієнтів передачі каналу на всіх піднесучих розподілені за такою залежністю, яка враховує швидкі і повільні завмирання [62]:

$$W(x) = \frac{4}{\Gamma(m)\Gamma(m_1)} \left(\frac{mm_1}{\Omega} \right)^{\frac{m+m_1}{2}} \times x^{m+m_1-1} K_{m-m_1} \left(2x^2 \frac{mm_1}{\Omega} \right), \quad (3.9)$$

де $K_\nu(z) = K_{m-m_1}\left(2x^2 \frac{mm_1}{\Omega}\right)$ - модифікована функція Бесселя;

$\Gamma(m) = (m-1)! = \int_0^\infty t^{m-1} e^{-t} dt$ - гамма функція;

Ω - середнє значення потужності сигналу;

$m = \frac{M^2[\mu^2]}{D[\mu^2]}$, - параметр, що виражає відношення квадрата початкового

моменту другого порядку величини μ (середньої потужності прийнятого сигналу) до дисперсії квадрата цього коефіцієнта передачі (дисперсії миттєвої потужності сигналу).

Для амплітуд комплексних коефіцієнтів передачі каналу на всіх піднесучих виконується така умова нормування:

$$\langle \mu^2 \rangle = \langle \lambda \rangle = \Omega = 1. \quad (3.10)$$

3.2.3 Статистичні характеристики пропускної спроможності багатопроменевого каналу радіозв'язку

Розглянемо довільну піднесучу (частотний підканал) OFDM системи радіозв'язку. Амплітуда комплексного коефіцієнта передачі каналу на цій піднесучій μ_j є випадковою величиною і описується за допомогою залежності (3.10). Знайдемо статистичні характеристики пропускної спроможності такого каналу радіозв'язку.

Функція розподілу. У разі виконання умови нормування каналу $\langle \lambda \rangle = 1$ щільність розподілення ймовірності W_μ буде залежати тільки від параметрів замирань m_1 :

$$W_\mu(x) = \frac{4}{\Gamma(m)\Gamma(m_1)} (m+m_1)^{\frac{m+m_1}{2}} \times x^{m+m_1-1} K_{m-m_1}(2x^2 mm_1). \quad (3.11)$$

За щільністю розподілення ймовірності W_μ можна знайти щільність розподілення ймовірності для коефіцієнта посилення по потужності λ :

$$W_{\lambda}(x) = \frac{2(mm_1)^{\frac{m+m_1}{2}}}{\Gamma(m)\Gamma(m_1)} \times x^{\frac{m+m_1}{2}-1} K_{m-m_1}(2xmm_1). \quad (3.12)$$

Зауважимо, що щільність ймовірності для коефіцієнта посилення по потужності λ представляє собою x^2 - розподіл з $2m$ ступенями свободи. Щільність розподілення ймовірності пропускної спроможності піднесучої легко знаходиться з виразу (2.16):

$$W_C(x) = \frac{2(mm_1)^{\frac{m+m_1}{2}} \ln 2}{\Gamma(m)\Gamma(m_1)Y_0\Delta f} Z\left(\frac{z-1}{Y_0}\right)^{\frac{m+m_1}{2}-1} K_{m-m_1}\left(mm_1 \frac{z-1}{Y_0}\right), \quad (3.13)$$

де $z = 2^{\frac{x}{\Delta f}}$.

Для частотного випадку ($m_1 = 1$) щільність розподілення ймовірності пропускної спроможності піднесучої записуються таким чином:

$$W_C(x) = \frac{(m)^m \ln 2}{\Gamma(m)y_0\Delta f} z\left(\frac{z-1}{Y_0}\right)^{m-1} \exp\left(-m \frac{z-1}{Y_0}\right), \quad (3.14)$$

де $z = 2^{\frac{x}{\Delta f}}$.

Графіки щільності розподілення ймовірності пропускної спроможності підканалу (піднесучої) при $y_0 = 10$ дБ і різних значеннях $m = 1, 4, 8, 10$ представлено на рис. 3.1.

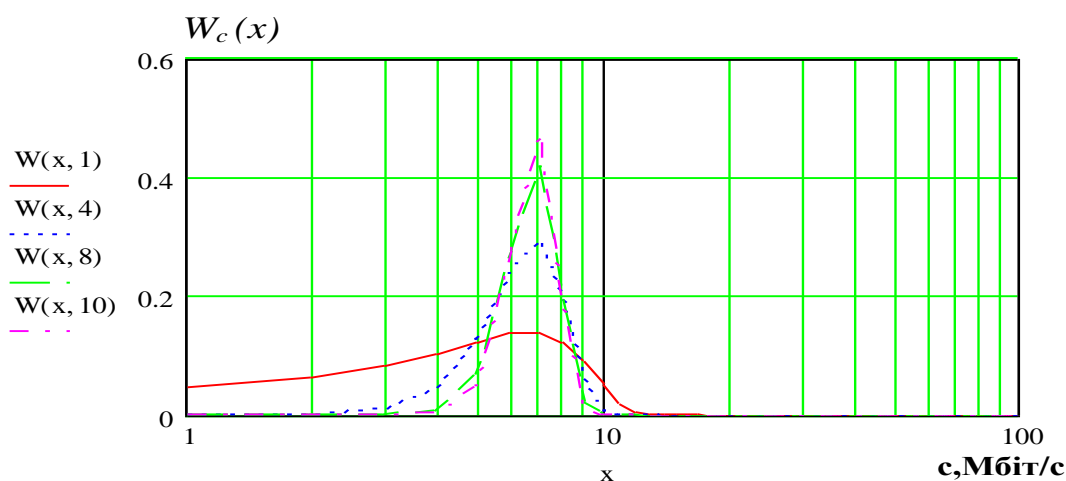


Рис. 3.1 Щільність розподілення ймовірності пропускної спроможності підканалу (піднесучої) при: $m=1$ (крива 1), $m=4$ (крива 2), $m=8$ (крива 3), $m=10$ (крива 4).

Функція розподілу пропускної здатності каналу. На підставі припущення про статистичну незалежності амплітуд комплексних коефіцієнтів передачі каналу на піднесучих $\{\mu_j\}$, можна вважати, що пропускні спроможності c , всіх частотних підканалів (піднесучих) є статистично незалежними, однаково розподіленими випадковими величинами. Тоді щільність розподілення ймовірності пропускної спроможності C_{pp} каналу, що дорівнює сумі N статистично незалежних, однаково розподілених випадкових величин C_j , знаходиться як згортка N вихідних щільностей ймовірності.

На рис. 3.2 а,б наведено графіки, які відображають залежності щільності розподілення ймовірності пропускної спроможності підканалу (піднесучої) від значення y_0 відношення сигнал/шум при $m = 1$ і $m = 5$ відповідно. З рис. 3.2 б видно, що при збільшенні параметра завмирань m від 1 до 5 середня пропускна спроможність підканалу дещо зростає. Подальше збільшення m не призводить до істотного зростання середньої пропускної спроможності.

Середнє значення й дисперсія пропускної спроможності піднесучої можна знайти чисельно за допомогою наступних співвідношень:

$$c_0 = \langle c \rangle = \int_0^{\infty} x W_c(x) dx = \int_0^{\infty} dx [F_c(x)], \quad (3.15)$$

$$\sigma_c^2 = \int_0^{\infty} x^2 W_c(x) dx - \langle c \rangle^2 = \int_0^{\infty} x^2 dx [F_c(x)] - c_0^2.$$

$$c_0 = \langle c \rangle = \int_0^{\infty} x W_c(x) dx = \int_0^{\infty} dx [F_c(x)],$$

$$\sigma_c^2 = \int_0^{\infty} x^2 W_c(x) dx - \langle c \rangle^2 = \int_0^{\infty} x^2 dx [F_c(x)] - c_0^2.$$

$$W_C^{PP}(x) = W_{C_1}(x) \otimes W_{C_2}(x) \otimes \dots \otimes W_{C_N}(x), \quad (3.16)$$

де $W_C^{PP}(x)$ - щільність розподілення ймовірності пропускної спроможності C_{PP} каналу;

$W_{C_j}(x)$ - щільність розподілення ймовірності пропускної спроможності j -го частотного підканалу (піднесучої).

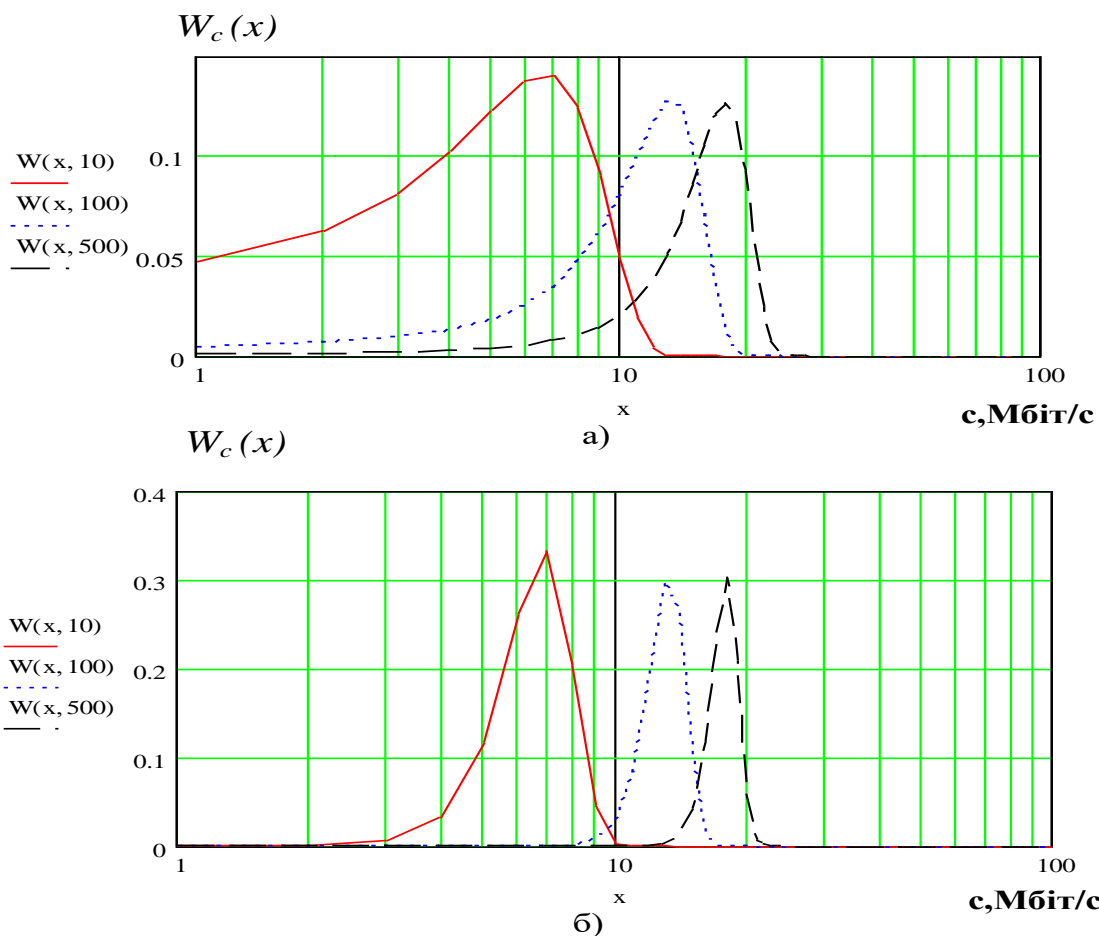


Рис. 3.2 Щільність розподілення ймовірності пропускної здатності підканалу при: $m=1$ (а) і $m=5$ (б) для значень y_0 , рівних 10 дБ (крива 1), 20 дБ (крива 2), 25 дБ (крива 3)

Знаходження щільності розподілення ймовірності за формулою (2.20) вимагає обчислення $(N-1)$ -мірного інтеграла, що досить складно. Тому при подальших міркуваннях ми скористаємося тим [64,65], що при великих N випадкова величина, що дорівнює сумі N статистично незалежних випадкових величин, розподілена по гауссівському закону з середнім значенням і дисперсією, які визначаються середніми значеннями і дисперсіями доданками.

У такому випадку щільності розподілення ймовірності пропускної спроможності випадкового частотно-селективного каналу може бути записана в наступному вигляді:

$$W_c^{PP}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_c^2}} \exp\left[-\frac{(x-C_0)^2}{2\sigma_c^2}\right], \quad (3.17)$$

де середнє значення і дисперсія пропускної спроможності каналу:

$$C_0 = Nc_0, \sigma_C^2 = N\sigma_c^2. \quad (3.18)$$

тут c_0 і σ_c^2 - середнє значення і дисперсія пропускної спроможності підканалу (піднесучої), які визначаються за допомогою (2.19).

З отриманих залежностей випливає, що при збільшенні y_0 зростає середньоквадратичне відхилення (СКО) пропускної спроможності каналу, причому, в області високих значень y_0 спостерігається насичення зростання СКО. При цьому, збільшення параметра m призводить до помітного зменшення флуктуації пропускної спроможності каналу.

3.3 Модель оцінки живучості самоорганізуючої бездротової мережі

3.3.1 Методика оцінки живучості ССЗ побудованої на основі радіозасобів технології SDR

Основне завдання самоорганізованої системи зв'язку (ССЗ) – своєчасна і якісна передача даних, отже, критерій живучості визначається оцінкою ймовірності блокування виклику E (або інтенсивністю відмов). Позначимо показник живучості системи SUR (survivability - живучість), тоді $\text{Sur} = 1 - E$. Таким чином, чим вищий показник живучості, тим менша ймовірність блокування виклику, отже, тим більша кількість запитів в одиницю часу не блокується, тим більш стійка ССЗ до динаміки змін структурної перебудови радіозасобів. Для практичних розрахунків і аналізу зручніше оперувати безпосередньо з величиною E , оскільки якість мережі радіозв'язку визначається, в першу чергу, не швидкістю надходження обслуговування викликів, а інтенсивністю втрат.

Введемо такі позначення: N - загальна кількість радіовузлів (РВ) в зоні обслуговування (кластер); n - випадкове число РВ, що зберегли працездатність; m - число каналів, що припадає на одну РВ; λ - інтенсивність абонентського навантаження на кластер; μ - інтенсивність обслуговування запиту.

Тут і далі, не зменшуючи спільності, вважаємо, що один радіоканал обслуговує один виклик. Викладки залишаються вірними при дослідженні ССЗ з тимчасовим або кодовим ущільненням, необхідно, лише, коректно вибрати, в залежності від використовуваної схеми ущільнення, кількість каналів m . Далі не будемо робити різниці між радіоканалом і каналом зв'язку.

Припустимо, що виклики надходять в систему відповідно до пуассонівського процесу. Таке припущення є стандартним у завданнях дослідження мереж зв'язку, його спроможність перевірена численними практичними додатками. Властивості пуассонівського процесу добре вивчені (наприклад, в [73]), і тут їх детальний опис опущено.

Розглянемо два таких варіанти.

Варіант А. Нехай ймовірність виходу із працездатного стану всіх РВ однакова і дорівнює p . Наприклад, дане припущення справедливе, якщо всі радіовузли кластера знаходяться в осередку ураження. Тоді, очевидно, ймовірність виживання k вузла визначається біноміальним розподілом

$$P(n = k) = C_N^k p^k (1 - p)^{N-k} . \quad (3.19)$$

Абоненти, які підключені до непрацездатних РВ, захоплюються працездатними РВ (якщо абонент знаходиться в зоні покриття працездатних РВ, то доступ до послуг мережі здійснюється одразу, якщо немає, то є можливість збільшити зону покриття решти РВ шляхом збільшення потужності їх передавачів), або абоненти самі переходять в стільники працездатних РВ. Таким чином, параметр інтенсивності сумарного навантаження λ не змінюється.

Ймовірність блокування виклику, в припущенні пуассонівського процесу надходження викликів і за наявності mk каналів, обчислюється за B -формулою Ерланга [73]:

$$P_{\text{блк}}(k) = \frac{\rho^{mk}}{(mk)!} \left(\sum_{i=0}^{mk} \frac{\rho^i}{i!} \right)^{-1} , \quad (3.20)$$

де коефіцієнт обслуговування

$$\rho = \lambda / \mu . \quad (3.21)$$

При цьому формула для втрат залишається в силі, навіть якщо розподіл ймовірностей тривалості обслуговування довільний [73]. Звідси можна розрахувати оцінку блокування виклику:

$$E = \sum_{k=0}^N P(n=k) P_{\text{блк}}(k) = \sum_{k=1}^n C_N^k p^k (1-p)^{N-k} \frac{\rho^{mk}}{(mk)!} \left(\sum_{i=0}^{mk} \frac{\rho^i}{i!} \right)^{-1} + (1-p)^N. \quad (3.22)$$

Відповідно, живучість розраховують таким чином:

$$Sur = 1 - \sum_{k=0}^N C_N^k p^k (1-p)^{N-k} \frac{\rho^{mk}}{(mk)!} \left(\sum_{i=0}^{mk} \frac{\rho^i}{i!} \right)^{-1}. \quad (3.23)$$

Таким чином, отримана формула оцінки живучості ССЗ через такі параметри системи, як щільність покриття, ємність і число каналів, навантаження. Для подальшого аналізу формулу (3.22) зручно записати у вигляді двох доданків, перший з яких характеризує ймовірність блокування виклику при наявності працездатних РВ, другий доданок - це ймовірність непрацездатних РВ. В останньому випадку всі виклики блокуються з ймовірністю 1.

Зауважимо, що інтенсивність викликів або середня тривалість сеансу може залежати від кількості непрацездатних РВ, наприклад збільшується потреба в зв'язку у абонентів непрацездатних стільників, відповідно збільшується обсяг одержуваної абонентом інформації та час сеансу. В цьому випадку формула (3.22) залишається правильною, змінюється лише ρ на $\rho(k)$, відповідно в (3.21):

$$\rho(k) = \lambda(k) / \mu(k). \quad (3.24)$$

Варіант Б. Ймовірність виживання РВ зростає зі збільшенням відстані від джерела НС. Впорядкуємо ймовірності виживання РВ по зростанню і пронумеруємо: $p_1 \geq p_2 \geq p_3 \geq \dots \geq p_N$, $p_i = p(R_i)$. Зауважимо, що ймовірність рівності $R_i = R_j$, $i \neq j$, дорівнює нулю. Введемо позначення безлічі індексів: $I = \{1, \dots, N\}$. Тоді

$$\begin{aligned}
P(n=0) &= \prod_{i=1}^N (1-p_i); \\
P(n=1) &= \sum_{j=1}^N p_j \prod_{i \in I \setminus j} (1-p_i); \\
&\dots\dots\dots \\
P(n=k) &= \sum_{j_1 \dots j_k} p_{j_1} \dots p_{j_k} \prod_{i \in I \setminus \{j_1, \dots, j_k\}} (1-p_i); \\
P(n=N) &= \prod_{i=1}^N p_i,
\end{aligned} \tag{2.25}$$

і рівність (3.22) у випадку НС-1 *варіанта Б* отримує вигляд

$$E = \sum_{k=0}^N \sum_{j_1 \dots j_k} p_{j_1} \dots p_{j_k} \prod_{i \in I \setminus \{j_1, \dots, j_k\}} (1-p_i) \frac{p^{mk}}{mk!} \left(\sum_{i=0}^{mk} \frac{p^i}{i!} \right)^{-1} + \prod_{i=1}^N (1-p_i). \tag{3.26}$$

Відповідно живучість МСЗ у випадку *варіанта Б*

$$Sur = 1 - \sum_{k=0}^N \sum_{j_1 \dots j_k} p_{j_1} \dots p_{j_k} \prod_{i \in I \setminus \{j_1, \dots, j_k\}} (1-p_i) \frac{p^{mk}}{mk!} \left(\sum_{i=0}^{mk} \frac{p^i}{i!} \right)^{-1}. \tag{3.27}$$

В цьому випадку формулу (3.26) також зручно записати у вигляді двох доданків, як і у (3.22).

Проілюструємо використання отриманих результатів для аналізу живучості мережі ССЗ. Оцінимо вплив параметрів мережі зв'язку на показник живучості.

Зауважимо, що $\lim_{m \rightarrow \infty} E(m) = (1-p)^N$, тобто при великій кількості радіоканалів показник живучості E визначається останнім доданком формули і дорівнює імовірності непрацездатності усіх станцій. Крім того, при необмеженому збільшенні швидкості обробки виклику $\mu \rightarrow \infty \Rightarrow \rho \rightarrow 0$ та $\lim_{\rho \rightarrow 0} E(\rho) = (1-p)^N$.

При $p=1$ (тобто всі вузли працездатності) формула (3.22) перетворюється у B -формулу Ерланга для непрацездатних.

Нехай в умовах варіанта A кількість РВ, які утворюють кластер, дорівнює 3. Одна РВ підтримує 20 дуплексних каналів. В нормальному стані середній час обслуговування виклику складає 1 хвилину, а навантаження на кластер – 30

викликів у хвилину. За вказаних параметрів ймовірність блокування запиту складає приблизно 10^{-6} .

В динамічних умовах функціонування навантаження зростає на порядок, крім того, частина РВ виходить з ладу. Імовірність виходу із ладу однієї БС приймемо рівною $\frac{1}{2}$. Тоді згідно з $P(n = k) = C_N^k p^k (1 - p)^{N-k}$ отримуємо, що 90% викликів будуть заблоковані.

Для забезпечення ефективного функціонування кластера, в якому буде порушена цілісність, необхідно провести спеціальні заходи, зокрема можна перерозподілити ресурси мережі ССЗ на користь даного кластера і збільшити кількість радіоканалів, що приходилися на вказаний кластер. Тут доцільно скористатися механізмом динамічного перерозподілу радіочастот, назначити, якщо це технологічно можна реалізувати і не стане причиною інтерференції, працездатним радіовузлам радіоканали непрацездатним радіовузлам перекинути в кластер, в якому буде порушена цілісність, радіоканали зі других вузлів. Крім того, збільшення числа каналів у кластері, в якому буде порушена цілісність, досягається збільшенням потужності передавачів суміжних з ним РВ, що дозволяє їм організувати радіопокриття території кластера, в якому буде порушена цілісність. При цьому також необхідно прийняти міри з уникнення інтерференції.

Залежність інтенсивності блокування від числа радіоканалів (крива 2) показана на рис. 3.3. Лінія 1 характеризує граничний результат, досяжний збільшенням каналів. В даному випадку мінімально можливі втрати становлять 12,5%.

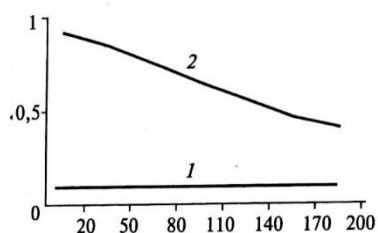


Рис. 3.3 Залежність інтенсивності блокування від кількості радіоканалів

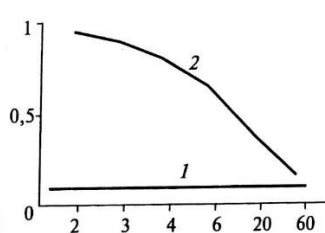


Рис. 3.4 Залежність імовірності блокування від середнього часу обслуговування виклику

Можливість збільшити інтенсивність обслуговування запитів надає інший спосіб підвищення ефективності системи. Наприклад, технічно це можна організувати примусовим обмеженням часу розмови або переходом на передачу даних (SMS).

Залежність інтенсивності втрат від середнього часу обслуговування виклику (в секундах) представлена на рис. 3.4. Тут також лінією 1 представлена гранична інтенсивність 12,5%.

Аналіз розглянутого прикладу і додаткові чисельні розрахунки показують, що другий спосіб призводить до кращих результатів. На практиці доцільно застосовувати комбіновану стратегію, але її результат буде обмежений імовірністю знищення всіх РВ.

З метою збільшення ефективності функціонування системи можна вжити заходів для підвищення живучості окремих станцій, наприклад дублювати стаціонарні РВ мобільними. Однак для даного прикладу, навіть в разі виживання всіх станцій, 80% викликів блокуються. Таким чином, дані заходи не мають самостійної цінності, їх доцільно застосовувати тільки як додаток до розглянутих вище методів.

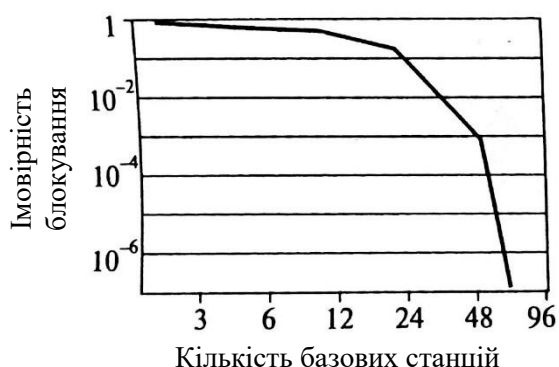


Рис. 3.5 Залежність інтенсивності втрат від кількості базових станцій

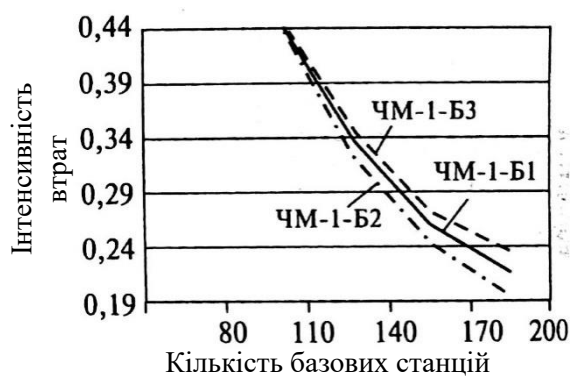


Рис. 3.6 Залежність інтенсивності втрат від кількості радіоканалів для різноманітних сценаріїв НС-1-Б

В силу мобільності абонентів, що дозволяє їм виходити із зони нестійкого прийому сигналів і підключатися до працездатних станцій, мережа з великим числом стільників має досить високу структурну живучість. На рис. 3.5 та рис. 3.6 представлена залежність інтенсивності втрат від числа РВССЗ в умовах стартових параметрів розглянутого прикладу.

Зауважимо, що тут показник живучості характеризує ефективність забезпечення зв'язку в рамках всієї системи, в той час, як в розглянутих вище випадках досліджувалися втрати в осередку НС. Для оцінки розрахунку можливості захоплення абонентів, які обслуговувалися через РВ, що вийшла з ладу, іншими РВ, можна скористатися моделями поширення радіосигналів, описаними в [9, 11].

Характер результатів аналізу живучості МСЗ в умовах варіанту Б принципово не відрізняються від результатів, отриманих для варіанту А. При невеликому m дані варіанти Б практично збігаються з варіантом А, якщо для останнього вибрати параметр, що характеризує виживаність РВ, в такий спосіб: $p = (p_1 + p_2 + \dots + p_N) / N$. В умовах розглянутого вище прикладу при зміні m від 20 до 100 відміну оцінки ймовірності блокування запитів змінюється від 10^{-6} до 10^{-4} . Хоча тут живучість в разі варіанту Б трохи вища, аніж за використання варіанта А, істотна відмінність спостерігається лише при відносно великій кількості радіоканалів, що припадають на одну БС.

В умовах раніше розглянутого прикладу для варіанта А розглянемо три сценарії руйнівного впливу, при якому імовірність виживання РВ визначають таким чином:

$$\text{НС-1-Б1: } p_1 = 0,8; p_2 = 0,5; p_3 = 0,2;$$

$$\text{НС-1-Б2: } p_1 = 0,9; p_2 = 0,5; p_3 = 0,1;$$

$$\text{НС-1-Б3: } p_1 = 0,7; p_2 = 0,5; p_3 = 0,3.$$

На рис. 3.6 показана залежність інтенсивності втрат від числа радіоканалів, що приходяться на одну РВ, у випадку різних сценаріїв НС варіанта Б.

Чим менший розкид параметрів виживаності БС, тим більш близькі результати до результатів варіанта А. Використовувати уточнену формулу (3.27) для оцінки живучості доцільно, якщо потужність винищувального впливу у зоні НС помітно знижується при віддаленні від осередку НС.

3.3.2 Приклад оцінки живучості мережі зв'язку із радіозасобами на основі технології SDR

Оскільки можливість абонентів виходити із зони відсутності радіосигналу є важливим фактором, що забезпечує живучість мобільної мережі зв'язку, доцільно ввести на розгляд параметр, що характеризує рухливість абонента за аналогією з [18, 19]. Нехай абонент потрапляє в область покриття вибулих з ладу БС або в зону створюваних радіоперешкод з інтенсивністю. Якщо у абонента, що знаходиться в області відсутності сигналу, виникає потреба в зв'язку, він виходить в область обслуговування вижили станцій і отримує можливість сеансу зв'язку, якщо в наявності є вільні канали.

Інтенсивність навантаження, створеної такими абонентами, позначимо через ν . Крім того, в цьому розділі використовуються такі позначення:

N – кількість абонентів в зоні НС;

M – загальна кількість радіоканалів, доступних в осередку НС;

λ – інтенсивність надходження викликів на з'єднання;

μ – інтенсивність обслуговування виклику.

Діаграму станів представлено на рис. 3.7. Фрагмент марківського ланцюга для стану (i, j) , где $0 < i < N$, $0 < j < M$, представлено на рис. 3.8. Система рівнянь стану марківського ланцюга має вигляд:

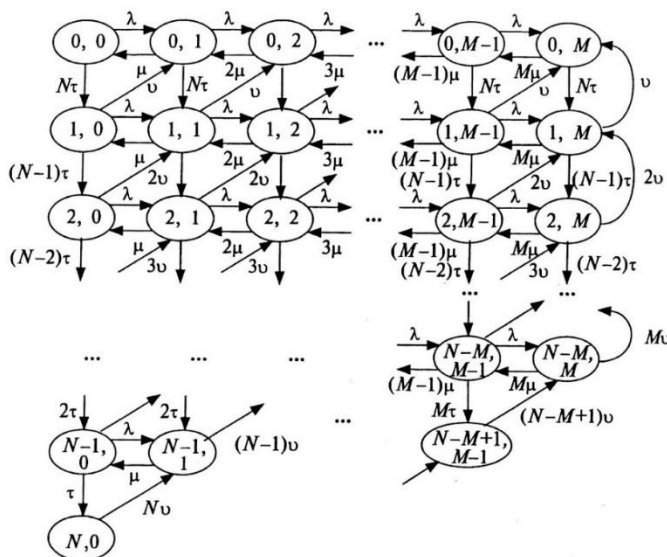


Рис. 3.7 Діаграма станів для моделі мережі із радіозасобами на основі технології SDR

$$\begin{aligned}
p_{i,M}((N-i)\tau + i\nu + M\mu) &= p_{i,M-1}\lambda + p_{i-1,M}(N-i+1)\tau + p_{i+1,M}(i+1)\nu, \\
i &= 1, \dots, N-m-1; \\
p_{N-i,j}(j\mu + (N-j)\nu) &= p_{N-j,j-1}\lambda + p_{N-j-1,j}(j+1)\tau + p_{N-j+1,j-1}(N-j+1)\nu, \\
j &= 1, \dots, M-1.
\end{aligned} \tag{3.30}$$

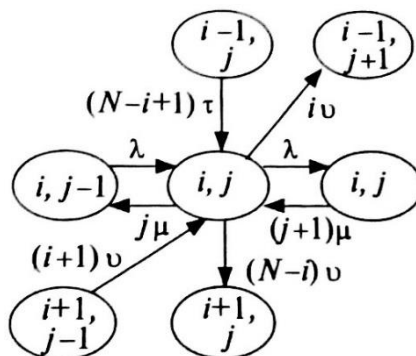


Рис. 3.8 Стан (i, j) моделі мережі із радіозасобами SDR радіозасобами на основі технології SDR

Зазначимо, що зазвичай $\nu \ll \tau$, тобто мобільні абоненти прагнуть вийти з осередку руйнування. Звідси отримуємо, що сумою $\sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^M p_{i,j}$ можна знехтувати і в практичних розрахунках обмежитися розглядом станів $(0, j)$ і $(1, j)$ ($j=1, \dots, M$), враховуючи, що $\sum_{i=0}^1 \sum_{j=1}^M p_{i,j} \approx 1$. Брати до уваги всі стани має сенс при невеликих значеннях N та M . Так, для випадку $N = 3, M = 2$ система рівнянь має вигляд

$$AP = b$$

де A – матриця.

$$\begin{aligned}
P &= (p_{0,0}, p_{0,1}, p_{0,2}, p_{1,0}, p_{1,1}, p_{1,2}, p_{2,0}, p_{2,1}, p_{3,0})^T; \\
b &= (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1)^T.
\end{aligned}$$

Вирішуючи систему методом Гауса для конкретних значень параметрів моделі, отримаємо значення ймовірностей станів. Ймовірність втрати виклику в даному прикладі визначається як $1 - p_{0,0} - p_{0,1}$. Так, у випадку $\lambda = 3, \mu = 1, \tau = 1, \nu = 3$ імовірність втрати виклику складає 87%; у випадку $\lambda = 1, \mu = 1, \tau = 1, \nu = 50$ імовірність втрати виклику складає 64%.

3.3.3 Способи підвищення живучості самоорганізуючих мереж

3.3.3.1 Оцінка якості надання послуг в мережах стільникового зв'язку

Постановка проблеми. На сучасному ринку послуг зв'язку, на якому попит на послуги зв'язку досяг насичення, основна увага операторів зв'язку спрямовано на розширення переліку послуг та підвищення їх якості. Згідно з дослідженням, проведеним компанією А. Т. Kearney, яка обстежувала 21 країну, вимоги щодо забезпечення якості послуг в більшості зарубіжних країн відносяться до послуг телефонного зв'язку, універсальних послуг, послуг рухомого зв'язку і доступу в Інтернет.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В деяких зарубіжних країнах, наприклад, Італія, Латвія, Індія та інших, встановлені мінімальні вимоги до якості послуг рухомого зв'язку і доступу в Інтернет. Згідно зі звітом «Quality of monitoring services. International practices», опублікованому МСЕ в листопаді 2011 року, постійно зростає кількість країн, що здійснюють моніторинг якості послуг зв'язку. Так, якщо в 2006 році їх кількість становила 50, то вже в 2010 році - 136 країн, включаючи країни Європи, Північної і Південної Америки, Азіатсько-тихоокеанського регіону, СНД, Африки.

Основним документом з якості є світовий стандарт якості ISO 9001: 2000, який визначає параметри за вимогами до продукції і містить основні та додаткові матеріали по пропонованим вимогам. Однак при цьому він не визначає параметри документації для даного продукту в системі менеджменту якості [67-69]. Міжнародний стандарт якості зв'язку містить основні вимоги, однак в ньому відсутній процес з підтримання стандарту якості послуг в мережах стільникового зв'язку [70].

Виділення невирішених раніше частин проблеми. Поліпшення менеджменту якості системи зв'язку є безперервним процесом з чіткими внутрішніми і зовнішніми зв'язками між споживачами і виробниками-постачальниками послуг зв'язку. Вимоги до переліку показників якості послуг зв'язку можуть встановлюватися в стандартах

міжнародних організацій, таких як МСЕ, ETSI, національних стандартах, галузевих стандартах та інших документах.

Мета підрозділу – аналіз ситуації, яка склалась на телекомунікаційних мережах операторів зв'язку стосовно контролю та організації моніторингу з якості надання послуг.

Моніторинг якості послуг зв'язку здійснюється шляхом вимірювання на мережі зв'язку, які можуть спиратися на статистичні дані або контрольні вимірювання, так і на підставі опитувань користувачів послугами зв'язку та аналізу поданих ними претензій.

Результатами моніторингу якості послуг зв'язку є:

- повідомлення регулюючого органу на Web-сайті, в прес-релізах;
- публікації в засобах масової інформації;
- накладення адміністративного штрафу;
- судові розгляди.

Умови за підтримки якості послуг зв'язку можуть встановлюватися:

- у ліцензійних умовах, наприклад, Франція, Індія, Пакистан;
- в національному законодавстві, наприклад, Малайзія, Сінгапур, Танзанія;
- у галузевих керівних документах, наприклад, Австралія.

Методики вимірювань показників якості послуг зв'язку можна розділити на:

- методики вимірювань показників, що характеризують роботу мережі зв'язку, наприклад, середній час встановлення з'єднання, кількість скинутих викликів, частка успішних викликів, швидкість з'єднання, доступність мережі за рівнем сигналу, частка успішно переданих повідомлень SMS та ін.;

- методики вимірювань показників, що впливають на задоволеність користувачів послугами зв'язку, наприклад, правильність нарахування оплати рахунку, помилки при виставленні рахунку.

Крім цього, передбачена процедура перегляду показників якості послуг зв'язку, методик вимірювань та проведення вимірювань. Як показує зарубіжний досвід, періодичність перегляду здійснюється один раз на три роки.

В світі вже давно прийшли до висновку, що для забезпечення якісної системи з надання послуг необхідно постійно проводити моніторинг телекомунікаційної мережі. Ціль створення такої повноцінної системи з моніторингу, та показників якості роботи стільникової мережі:

Створення списку загальнодоступних показників якості послуг мережі рухомого зв'язку діючих стандартів, завдяки яким споживач матиме можливість порівнювати якість аналогічних послуг зв'язку, які надаються різними операторами зв'язку;

Для цього необхідно також створення та налагодження в нормальному стані таких факторів:

- Підвищення рівня якості наданих послуг;
- Підготовка кваліфікованих спеціалістів у сфері забезпечення якості послуг зв'язку через показники, оцінені споживачами й за системами якості;
- Формування довіри до системи сертифікації засобів зв'язку, що дозволить використовувати отриманий досвід для розвитку та поліпшення роботи системи з надання послуг населенню [69-73].

Крім того, запровадження єдиної та цілісної системи з оцінки якості зв'язку дозволяє вирішити ряд питань:

- Підвищення якості наданих послуг операторами зв'язку, та як наслідок – зростання рівня довіри споживачів до операторів.
- Застосування більш дієвих моделей ведення справ та впровадження систем з управління якістю послуг зв'язку.
- Використання нових і ефективних моделей ділових процесів і систем з управління якістю зв'язку.
- Підвищення привабливості галузі для інвестицій.

Під час проведення вимірювань на телекомунікаційних мережах операторів зв'язку встановлено, що крім якості сигналу, необхідно вимірювати додатковий параметр оцінки якості мови - SQI (Speech Quality Index) [74]. При обчисленні даного параметра враховується: відсоток помилкових бітів (BER), відсоток неправильно

декодованих фреймів (FER), мовний кодек, що використовується та активація опції переривчастої передачі (DTX - Discontinuous Transmission), а також хэндовери. При здійсненні хэндоверів якість мови погіршується, так як частина мовних кадрів втрачається. Втрата мовних кадрів при здійсненні хэндоверів не відображається на свідченнях RXQUAL, так як під час хэндоверів вимірювання BER не проводяться.

На рисунку 3.9 наводиться співвідношення між показниками якості SQI і RXQUAL для кодеку EFR (enhanced full rate) в залежності від включення опції перескоків за частотою, для різних швидкостей руху абонента та умов РРХ [74]. Рисунок 3.9 показує, що параметр SQI враховує більше чинників, ніж RXQUAL і, отже, краще характеризує суб'єктивне якість передачі мовлення, сприймана абонентом СПС.

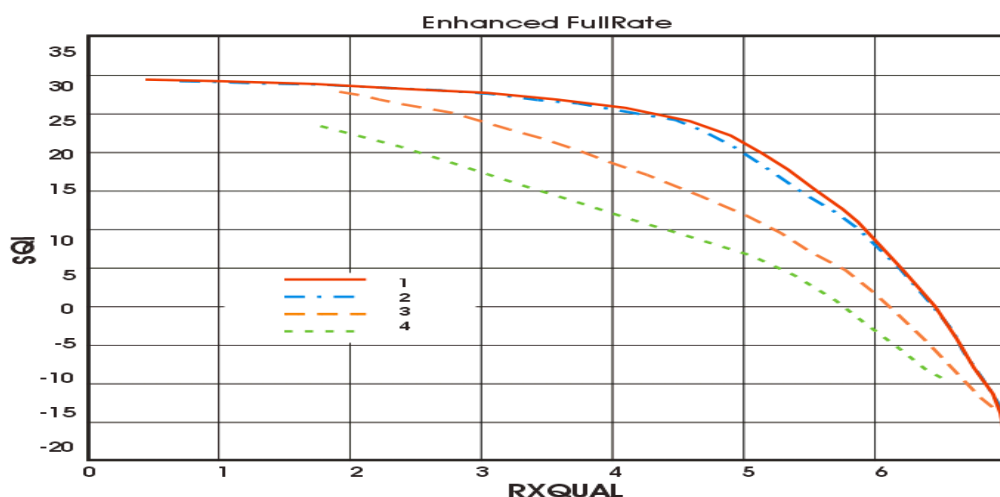


Рис 3.9. Так, профілями 1-4 на рисунку відповідають:

1 - Типова міська забудова, швидкість руху автомобіля 0 км/год, перескакування по частоті;

2 - Типова міська забудова, швидкість руху автомобіля 48 км/год, без перескоків по частоті;

3 - Амплітудне завмирання сигналу, швидкість руху автомобіля 12 км/год, без перескоків по частоті;

4 - Типова міська забудова, швидкість руху автомобіля 3 км/год, без перескоків по частоті.

Замість SQI можливе використання MOS (Mean Opinion Score) за алгоритмом PESQ [74]. У таблиці 3.1 наведено відповідності значень параметра SQI, MOS і відповідні їм суб'єктивні опису якості переданої мови.

Таблиця 3.1

Розшифровка значень параметра SQI і MOS

Якість	Діапазон SQI	Діапазон MOS
Відмінно	20 – 30	4.0-5.0
Добре	15 - 19	3.0-3.9
Задовільно	10 - 14	2.0-2.9
Погано	5 -9	1.0-1.9
Дуже погано	<5	<1

Крім того, одним з найважливіших показників якості послуг є **Quality of Service** або **QoS**. Зазначене - є системою з визначення рівня якості обслуговування.

QoS регулює і керує всіма процесами в мережі - від послуг та бізнесу до елементів робочих мереж. Отже, клієнт отримує гарантовано замовлений рівень якості надаваних послуг зв'язку, незалежно від будь-якого трафіку. З цього випливає, що високопріоритетні послуги надаються за вищими тарифами і їх кількість нижче стандартних послуг і користувачів з вищим пріоритетом, ніж користувачів з стандартними вимогами. Прикладом користувачів з вищим пріоритетом можна назвати служби мультимедіа. QoS використовується з різними протоколами, існуючими на сьогоднішній день, що включає в себе кілька видів технологій, які дозволяють максимально ефективно і доцільно використовувати існуючі ресурси[77-79].

Однією з найперших організацій, які почали розробляти і впроваджувати технології щодо забезпечення QoS у різних середовищах, можна назвати CISCO.

Використання QoS - це вирішення низки завдань щодо забезпечення якості послуг:

- Пріоритетність і диференційованість трафіку.

- Наявність мережевих ресурсів для якісних інформаційних потоків.
- Надійність передачі даних.
- Відповідно інформаційні потоки формують мережевий трафік з рівномірним навантаженням, що запобігає мережевим перевантаженням і втраті даних в подальшому.

Так, є два технічних рішення, які допомагають під час проведення вимірювання якості послуг на телекомунікаційних мережах операторів зв'язку.

Network Based Application Recognition є розробкою CISCO і дозволяє розпізнавати додатки з мережних параметрам, застосовується тільки до трафіку з переадресацією за технологією Cisco Express Forwarding.

Virtual Bridged Local Area Network - використовує маркований кадр з вмістом в мітці TPID, пріоритету користувача і CFI і ідентифікатора VLAN.

Проблема роботи QoS в системі LAN - відсутність підтримки останніми якості обслуговування, оскільки пріоритет користувача не може бути рівний пріоритету доступу.

Існує ряд протоколів, які підтримують послугу якості обслуговування: зазначені вище DiffServ і IntServ, а також RSVP і RSVP-TE, MPLS, Frame relay, ATM і X.25 з IEEE 802.1p, 1Q, 11e, 11r, HomePNA [76].

Варто відзначити, що сучасні технології що створенні, розроблені та впровадженні для QoS дозволяють застосовувати її як в мережах GSM, так і в телекомунікаційних послугах зв'язку в цілому - мобільної, аматорської, супутникової та Інтернет.

Стандарти QoS в сфері мереж рухомого та стільникового зв'язку дозволяють створювати відкриті та публічні документи, які регламентують вимоги до операторів зв'язку щодо рівня якості надаваних послуг.

Особливістю викладених нижче методів перевірки та регулювання якості роботи мереж в Європі та світі можна назвати публічне представлення інформації про роботу операторів, що надають послуги.

Окремі країни проводять щорічні порівняльні дослідження в мережах всіх операторів, з фінансуванням від самих операторів-виконавців. Завдання і цілі цих

досліджень - порівняння реального рівня наданих послуг з заявленими показниками в специфікації та офіційних документах. Також перевіряються послуги передачі даних, якщо вони надаються: sms, mms, wap, ftp-режим і відеотелефонія.

Також існує практика установки мінімальних стандартів щодо функціонування сервісів, що повинно захищати інтереси користувачів. Якщо рівень не відповідає показникам, користувач може отримати грошову компенсацію від постачальника послуги.

Звіти операторів можуть носити обов'язковий характер, або добровільний - залежить від регулятора і політики ведення справ в країні в цілому.

До основних показників QoS в мережах стільникового зв'язку відносять:

- Покриття поза будівлями і всередині будівель.
- Відсоток викликів, які закінчилися роз'єднанням встановленого з'єднання без ініціативи абонента.

- Відсоток неуспішних викликів.
- Час, витрачений на встановлення з'єднання.

Є також більш детальна класифікація показників якості послуг рухливих мереж. Крім цього, розроблені і впроваджені норми за показниками якості надаваних послуг.

Для оцінки та визначення зазначених параметрів розроблені спеціальні методики і алгоритми, що відповідають вимогам до програм, які призначені для оцінки показників якості. Нормативи за результатами випробувань діляться на дві категорії - або високий, або нормальний. Оцінка технічних показників дозволяє визначити рівень якості послуг в рухливих мережах і відповідність показників заявленим даним.

Оператори зв'язку, контролюючі органи і лабораторії з центрами сертифікації проводять цілий ряд випробувань, окреме місце серед яких займають оцінні вимірювання.

Контролюючі інстанції складають на підставі проведених вимірювань таблицю відповідності значень високого і нормального рівням якості послуг мереж стільникового зв'язку. Контроль є обов'язковим і проводиться як мінімум один раз на рік. Лабораторії, як і центри сертифікації, проводять оціночні дослідження на

добровільній основі, якщо інше не передбачено законодавством, і в їх завдання входить підтвердження рівня якості послуг, що надаються населенню. Оператори проводять оціночні випробування в рамках регулярного аудиту, який дозволяє контролювати показники якості наданих послуг зсередини. Як і контролюючі органи, внутрішні перевірки проводяться операторами не рідше одного разу на рік. Показники діляться умовно на дві групи - технічні показники та рівень задоволеності абонентів. Всі вимірювання проводяться в кліматичних умовах, відповідних технічним даними в документах до перевіряється обладнання. При проведенні контрольних викликів використовується спеціальне тестове обладнання з цифровими і аналоговими даними, і тестова абонентська станція з аналогічними даними, що наведені у табл.3.2

Таблиця 3.2

Джерело сигналу	Стандарт	Рівень прийому
Спеціальне тестове обладнання	Цифровий та аналоговий	Для цифрового -85 дБм, для аналогового -95дБм
Тестова абонентська станція	Цифровий /аналоговий	Максимальний рівень за індикатором

Для кожної організації розроблені окремі методики з проведення показників якості послуг. Вони можуть мати одну основу, але бути адаптовані для потреб кожної перевірки окремо [84].

Також деякі положення в методиках контролю державних організацій носять обов'язковий характер, в методиках внутрішнього аудиту оператора вони частіше носять рекомендаційний характер.

В свою чергу **QoS** в VoIP ділиться на чотири класи. Класифікація включає в себе мережеві та термінальні параметри та характеристики.

1. Вищий клас припускає використання широкосмугових кодеків і мереж, які відповідають європейським вимогам QoS.

2. Високий клас припускає використання мереж з бездротовими системами мобільного зв'язку, кодеків EFR і MCE-T G.726. Впровадження систем допустимо для високого відсотка користувачів - більше 85%.

3. Середній клас припускає використання кодеків FR. На момент впровадження допускалося його використання для невеликої кількості абонентів - не більше 10%.

4. Доступний клас прийнятний для використання, проте не гарантує підтримку характеристик з'єднання. Рекомендації QoS до нього незастосовні, діалогова інтерактивність низька і мовний зв'язок на низькому рівні якості. Використовувати можна тільки у виняткових ситуаціях при загальному відсотку користувачів не більш 5%.

Тривалість затримки відповідно якості QoS

1. «Вищий» затримка до 10 мс;
2. «Високий» затримка до 100мс;
3. «Середній» затримка до 150 мс;
4. «Доступний» затримка до 400мс;

Call Set-up Time Post Dial Delay відповідно якості QoS

1. - місцевий виклик <3 мс;
2. - міжміський виклик <5 мс;
3. - міжнародний виклик <8 мс;

Якщо звести всі дані в таблицю, то отримаємо наступне:

Таблиця 3. 3

Клас мережі	Клас QoS	Режим праці терміналу		
		A	B	C
I	Високий	40 мс	15 мс	x
	Середній	90 мс	65 мс	40 мс
	Доступний	340 мс	315 мс	290 мс
II	Високий	30 мс	5 мс	x
	Середній	80 мс	55 мс	30 мс
	Доступний	330 мс	305 мс	280 мс

Продовження Таблиці 3.3

Ш	Високий	10 мс	х	х
	Середній	60 мс	35 мс	10 мс
	Доступний	310 мс	285 мс	260 мс

Середній і доступний класи якості можна використовувати тільки в екстрених ситуаціях і не повинні входити в систему обслуговування абонентів при наданні базових послуг від операторів [78,79,83].

До основних методів оцінки якості послуг на мережі операторів телекомунікацій відносять:

- активний чи інтрузивний - POLQA і PESQ;
- пасивний або неінтрузивний - P.563;
- модельований - E-model [74].

З метою більш детального дослідження процесу вимірювання параметрів якості послуг, що надаються в стільникових мережах зв'язку, слід навести приклади найбільш розповсюджених вимірювальних приладів.

Устаткування для вимірювань - стаціонарні і мобільні тестові апарати і комплекси [82-87].

Як в будь-якій сфері вимірювань тестове обладнання може бути як стаціонарним, так і мобільним. Перевагою стаціонарних комплексів є їх потужність та більша кількість агентів (датчиків, індикаторів), які розташовані у різних сегментах мережі та дистанційно керуються стаціонарним комплексом моніторингу. Переносні, мобільні комплекси моніторингу мають можливість здійснювати вимірювання в тих місцях, де в цьому є критична необхідність (під час аварій, у труднодоступних сегментах мережі).

З мобільних вимірювальних комплексів найбільш розповсюдженими є:

Радіовимірювальний комплекс Aeroflex (Willtek) 2305 Stabilock - призначений для проведення тестування базових станцій. Частотний діапазон становить від 350 МГц до 475 МГц, від 800 МГц до 960 МГц. (рисунок 3.10)

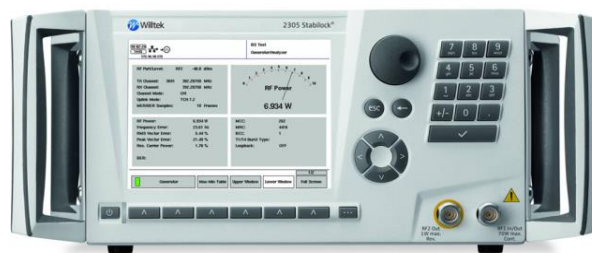


Рис. 3.10 Радіовимірювальний комплекс Aeroflex (Willtek) 2305 Stabilock

Аналізатор базових станцій JDSU Cell Advisor JD745A (рисунок 3.11) - професійний прилад японського виробництва. Призначений для роботи в польових умовах, дозволяє отримати дані по аналізах спектра, сигналів від радіочастотних сигналів і виміряти потужність хвиль.



Рис. 3.11 Аналізатор базових станцій JDSU Cell Advisor JD745A

Вимірювальний комплекс Agilent E6601A - відрізняється багатофункціональністю, використовується для оцінки параметрів бездротових пристроїв.



Рис. 3.12 Вимірювальний комплекс Agilent E6601A

Висновок: Операторам телекомунікацій слід більше уваги приділяти параметрам якості послуг. Одним з найважливіших показників, на який слід звернути увагу –**QoS**. Крім того, необхідно проводити вимірювання параметрів якості телекомунікаційних мереж на постійному рівні. Під час проведення вимірювань необхідно використовувати затверджені методики та відповідні параметри тестування. Так, для тестування голосових сервісів слід використовувати контрольні виклики наступних проміжків часу: 10 секунд - для тестування фази встановлення з'єднання; 120 секунд - для інших тестів. Під час збору даних випробувань за допомогою технічних комплексів збір даних доцільно проводити в безперервному режимі - випробувальний комплекс запускається, і сеанс випробувань закінчується або після закінчення тестового маршруту, або після закінчення строків проведення випробувань. Якщо контрольні виклики, що проводяться з тестових комплексів, фіксуються автоматично, спеціальної вимірювальної апаратурою на довготривалому носії, то всі результати і допоміжна інформація повинні зберігатися в зрозумілому вигляді, що дозволяє їх використовувати для обробки і аналізу. Результати вимірювань повинні бути по можливості відтворені, тому умови, при яких результати вимірювань були одержані, також повинні бути зафіксовані. До таких умов відносяться дата та час випробувань, маршрут, номери ISDN автовідповідачів і ір-адреси серверів.

Перспектива подальших досліджень: Доцільно розробити універсальну систему моніторингу якості послуг, яка надасть можливість гнучко та оперативно відстежувати проблеми з якістю надання послуг зв'язку. Для цього доцільно використовувати платформу на основі комплексних систем моніторингу.

3.3.3.2 Принципи побудови систем моніторингу

Роль вимірювальної техніки є новою в практиці вітчизняної зв'язку. Досі вимірювальна техніка існувала для контролю роботи мережі та відповідності її вузлів в першу чергу вітчизняним стандартам - були чіткі рекомендації з методології вимірювань на мережах зв'язку, тобто вказівки на прилад, методику вимірювань і

параметри вимірювань. У сучасній ситуації, коли процес стандартизації технології значно відстає від розвитку самих технологій, чітких рекомендацій з використання вимірювальної техніки та експлуатаційної методології немає і в найближчому майбутньому не передбачається. Вимірювальна техніка, що застосовується сучасними операторами, використовується не тільки для перевірки на відповідність стандартам (в першу чергу міжнародним), але і для вивчення процесів, що протікають в мережі. Це дозволяє операторам швидко освоювати нові технології на міжнародному рівні, що є необхідною умовою подальшої успішної роботи. З переходом до цифрових систем передачі з високою пропускнуою здатністю, складність систем зв'язку об'єктивно підвищується. У зв'язку з цим виникають завдання контролю і настройки роботи інтелектуальних систем, якими в даний час є мережі зв'язку. Цей процес йде двома шляхами: перший-розвиток систем внутрішньої діагностики інтелектуальних вузлів мереж, другий-застосування сучасної вимірювальної техніки.

Враховуючи, що розвиток засобів зв'язку йде дуже динамічно, розробка систем самодіагностики і їх відпрацювання дещо відстають від розвитку самих засобів зв'язку. Таким чином, застосування незалежних від обладнання систем контролю в ряді випадків є єдино коректним рішенням. Це призводить до того, що роль вимірювальної техніки на мережі зв'язку підвищується з розвитком нових технологій.

Вимірювальна техніка на мережах сучасних телекомунікацій відіграє важливу роль-налагодження та оптимізації мереж зв'язку, пошуку несправностей і причин конфліктів, вирішення конфліктних ситуацій.

Поширена думка про те, що цифрові системи зв'язку краще, надійніше і тому вимагають меншою мірою обслуговування на етапі експлуатації, не вірно. Вірно, що цифрові технології забезпечують кращу якість зв'язку, менші експлуатаційні витрати, кращий контроль за ресурсом мережі. Вірно також, що добре налагоджена, "доглянута" цифрова мережа вимагає меншою мірою обслуговування. Однак також вірно, що "недоглянута" цифрова мережа деградує набагато швидше аналогової і вимагає при відновленні набагато більших витрат. Це - об'єктивна плата за складність технології цифрової передачі.

На практиці часто зустрічається думка про те, що іноземні фірми, що забезпечують пуск ділянок цифрових мереж, належним чином налаштують мережу і надалі її робота не потребує кваліфікованої експлуатації. Такий підхід веде до залежності операторів мережі від інофірм, що є негативним фактором. З упевненістю можна сказати, що використання сучасної вимірювальної техніки дає операторам ключ до розуміння процесів, що відбуваються в мережі. У цьому випадку пошук конфліктних ситуацій і суперечностей, "тонка настройка" мережі допомагають добитися максимальної ефективності її роботи.

Найбільш традиційним підходом є оснащення вимірювальною технікою "в доповнення" до закупівлі лінійного обладнання, коли разом з лінійним обладнанням закуповується вимірювальне обладнання для експлуатації.

Зазвичай виникають рішення у вигляді "набору приладів", без реалізації комплексного підходу до організації вимірювань. "Набір приладів" є технічно зручним рішенням для фірми-постачальника лінійного обладнання, оскільки будь-яке комплексне рішення потребує опрацювання основ методів вимірювання, виникають вимоги інтеграції вимірювальних приладів у загальну мережу, з'єднання отриманого комплексу з системою управління і т.д. Найбільш простим варіантом є зведення цих завдань до рівня експлуатації, де "набір приладів" являє собою коректне рішення. Поширеність підходу оснащення обладнанням "в доповнення" визначається ще й низьким рівнем знань експлуатує персоналу про сучасні технології телекомунікацій, оскільки вимога комплексності рішень пов'язано з розумінням завдань вимірювальної техніки в кожній конкретній мережі.

Вже на етапі системного проектування вимірювання на мережі повинні включатися в розгляд у вигляді комплексних рішень з організації експлуатації. На рівні робочого проектування ці комплексні рішення повинні доповнюватися загальною методологією проведення вимірювань. Тільки в цьому випадку вимірювальна техніка використовуватиметься ефективно і забезпечувати ефективну експлуатацію. Таким чином, з розвитком сучасних телекомунікацій та підвищенням ролі вимірювальної техніки з'являються завдання системної інтеграції

вимірювальних рішень, тобто комплексного підходу до використання вимірювальної техніки.

Оцінюючи стан розвитку ринку вимірювальної техніки, можна визнати, що етап системної інтеграції тут тільки починається. Це пов'язано з тим, що вимірювальна техніка вимагає більш глибокого знання технологій телекомунікацій, а також знання низки додаткових дисциплін (теорії, метрології і т.д.). Не дивно, що "інкубаційний період" системної інтеграції на ринку вимірювальних технологій довше, ніж на ринку самих засобів зв'язку.

Також, особливістю розвитку цифрових систем зв'язку в СНД в останні десять років є перекид у побудові систем експлуатації, так як проблема комплексного моніторингу мережі і якості зв'язку в цей час була віднесена до низькопріоритетних. Як наслідок, побудова систем експлуатації йшла за залишковою ознакою, а діяльність і структура систем експлуатації будувалися відповідно до норм 30 - 50 -х рр., що значною мірою визначило відставання вітчизняних систем експлуатації від світового рівня. Наприклад, офіційна статистика за рівнем оснащення підприємств вимірювальними засобами дає дані від 15 до 20 % від необхідних кількостей. З цього випливає важливий висновок: системи комплексного моніторингу телекомунікаційних мереж для більшості операторів повинні будуватися фактично заново з "чистого аркуша". Питання контролю якості також фактично не наважувалися в галузі до останнього часу, коли була розроблена програма сертифікації якості надання послуг на основі вимог стандарту IS09000/9001. Відповідно до запропонованих в цьому стандарті методиками, контроль моніторингу мережі і якості в системах зв'язку виконується маркетингово - соціологічними методами, не пов'язаними безпосередньо з технічною спеціалізацією галузі зв'язок. У рамках програми з контролю якості послуг у цьому випадку в адміністративній структурі підприємств почали створюватися відділи контролю якості, основним напрямком яких стала діяльність з контролю нетехнічними методами (анкетування, соціологічні опитування, маркетингові дослідження, розробка альтернативних планів тарифікації та ін.) У той же час методи точного контролю параметрів якості виявилися виключеними з розгляду та широкого обговорення зв'язкової спільноти.

У цій ситуації доцільно орієнтуватися відразу на рішення не тільки питань побудови ефективних систем експлуатації, а й питань комплексного моніторингу, причому в основу самої системи експлуатації необхідно покласти принцип пріоритетності завдань об'єднання існуючих систем моніторингу в одну комплексну систему.

Поклавши в основу розгляду принцип об'єднаності систем моніторингу сегментів телекомунікаційної мережі, у пропонованій роботі були зроблені дослідження з сучасних методів експертного аналізу мереж і вимірювання параметрів телекомунікаційних мереж, споконвічно орієнтованої на промислове виробництво.

На сьогоднішній день основними методами технічного контролю в телекомунікаціях є:

- вбудовані засоби діагностики сучасних цифрових пристроїв зв'язку;
- незалежні засоби контролю (вимірювальні засоби і аналізатори протоколів);
- стаціонарні вимірювальні комплекси

3.3.3.3 Комплексна система моніторингу самоорганізуючих мереж із використанням аналізаторів сигналізацій телекомунікаційних систем

На теперішній час галузь телекомунікацій є напевно найбільш динамічно розвинутою. Безумовно, дане явище є позитивним з точки зору територіального поширення та доступності телекомунікаційних послуг та розширення їх спектру [88-90]. Кожен оператор, що працює на відкритому ринку, перебуває під тиском необхідності розширення спектру послуг, зростання трафіку і посилення конкуренції. Одним з недоліків цього процесу є те, що мережі стають все більш і більш складними, і при цьому, найчастіше, вони не мають адекватних засобів експлуатаційного управління. У таких мережах крім проблем керованості комутаційних пристроїв виникає необхідність гарантувати гарну якість мовлення, надійність встановлення з'єднання, виняток обривів розмови, високу швидкість передачі даних і т. п.

Однак, внаслідок постійного розширення телекомунікаційних мереж суб'єктивно збільшується кількість сегментів, з яких складаються мережі зв'язку та телекомунікацій. Виходячи з доцільності та умов експлуатації, зазначені сегменти мають різні технології передачі даних і сигналізації. Наприклад, при доставці телефонного сигналу в рамках однієї мережі можуть використовуватися ділянки, де з'єднання відбуваються як за принципом комутації каналів, так і за принципом комутації пакетів.

Для забезпечення таких умов необхідно здійснити ряд організаційно-технічних заходів, одним з базових елементів яких варто передбачити впровадження комплексної системи моніторингу телекомунікаційної мережі. Відомо, що створення і функціонування даної системи не є абстракцією або самоціллю, й повинно опиратися на техніко-економічні переваги і додаткові можливості, які повинні бути отримані при впровадженні системи.

Характерними особливостями і вимогами до архітектури комплексної системи моніторингу телекомунікаційної мережі є її відкритість, модульність і доступність [88]. **Відкритість** забезпечує можливість використання системи комплексного моніторингу в будь-якому оточенні, зокрема, на різних апаратних платформах технічних засобів. **Модульність** забезпечує широкий спектр застосувань в залежності від потреб кінцевого споживача, не рахуючись з базовою версією платформи. Стабільні інтерфейси забезпечують взаємодію декількох прикладних систем (модулів) на єдиній платформі. **Доступність** забезпечує кінцевому споживачеві можливість у відповідності з потребами розвитку мережі (тобто, збільшення кількості елементів мережі) доповнювати систему комплексного моніторингу, витрачаючи на це мінімальні кошти.

Накопичуючи статистичні дані про параметри трафіку в окремих елементах мережі, система моніторингу дає можливість *контролювати* якісні показники мережі телекомунікацій, *планувати* її обслуговування і розширення, *управляти* мережею, *оперативно змінювати* конфігурацію мережі і т.п.

Крім того, система комплексного моніторингу дозволяє оптимізувати використання ресурсів мереж, а також планувати і реконфігурувати мережі з метою оптимізації маршрутизації трафіку та мінімізації можливих перевантажень;

Високі вимоги до якості послуг, оперативне підключення нових абонентів та розширення мережі ставлять перед операторами телекомунікацій принципово нові завдання безперервної оцінки показників використання мережі для її оптимізації, реконфігурації, розширення, визначення тарифної політики. Для ефективного управління мережами необхідно мати дані по будь-якому фрагменту мережі і, бажано в режимі реального часу. Система комплексного моніторингу на мережі дозволяє підвищити якість послуг, централізувати технічне обслуговування, оперативно планувати і впроваджувати розширення мережі, ефективно використовувати наявні ресурси.

Аналізатори протоколів та процес вимірювань. Простим способом неможливо звести в єдиний центр засоби управління і спостереження за пунктами сигналізації. Крім того, перебуваючи в режимі перевантаження, комутаційне обладнання може неадекватно відображувати стан елементів мережі ОКС-7 і IP-телефонії, а адже саме такі моменти представляють найбільший практичний інтерес при експлуатації мережі.

У зв'язку з цим, представляється доцільною побудова системи комплексного моніторингу, заснованої на пасивному підключенні до ланок ОКС-7, передачі даних. Принцип роботи такої системи використовує те, що інформацію про стан мережевих елементів, коливаннях сигнального навантаження і більшості інших параметрів, які повинні бути передані від мережевих елементів в центр спостереження для подальшого аналізу, можна отримати декодуючи повідомлення, які “знімаються” системою з ланки сигналізації. Розподілена система моніторингу здатна забезпечувати ряд додаткових функцій, наприклад таких, як виявлення фактів відведення та крадіжок трафіку і формування записів про виклик (Call Detail Record – далі CDR) для звірення рахунків при взаєморозрахунках між операторами.

Досвід проведення вимірювань на телекомунікаційних мережах показує, що для вимірювань доцільно використовувати універсальні і модульні аналізатори.

Універсальність забезпечується максимально широким охопленням можливих вимірів, а наявність модульності програмного і апаратного забезпечень знижує вартість приладу. Враховуючи складність конфігурації приладів цього класу, для реалізації необхідної методології їх необхідно вибирати з особливою ретельністю, залучаючи для цього кваліфікованих фахівців.

Сам процес аналізу протоколів включає захоплення циркулюючих в мережі пакетів, що реалізують той чи інший мережевий протокол, і вивчення вмісту цих пакетів. Ґрунтуючись на результатах аналізу, можна здійснювати обґрунтовану і зважену зміну будь-якого компонента мережі, оптимізацію її продуктивності, пошук і усунення неполадок. Відомо, що для того, щоб можна було зробити якісь висновки про вплив деякої зміни на мережу, необхідно виконати аналіз протоколів і до, і після внесення змін.

Аналізатор протоколів є самостійним спеціалізованим пристроєм, або персональним комп'ютером, зазвичай переносним, класу Notebook, оснащений спеціальною мережевою картою і відповідним програмним забезпеченням. Мережева карта і використовуване програмне забезпечення повинні відповідати топології мережі (кільце, шина, зірка). Аналізатор підключається до мережі точно так же, як і звичайний вузол. Відмінність полягає в тому, що аналізатор може приймати всі пакети даних, що передаються по мережі, в той час як звичайна станція – лише адресовані їй. Програмне забезпечення аналізатора складається з ядра, що підтримує роботу мережевого адаптера і декодує одержувані дані, та додаткового програмного коду, що залежить від типу топології досліджуваної мережі. Крім того, поставляється ряд процедур декодування, орієнтованих на певний протокол, наприклад, IPX. До складу деяких аналізаторів може входити також експертна система, яка може видавати користувачеві рекомендації про те, які експерименти слід проводити в даній ситуації, що можуть означати ті чи інші результати вимірювань, як усунути деякі види несправності мережі[88, 91-94].

Незважаючи на відносне різноманіття аналізаторів протоколів, представлених на ринку, можна назвати деякі риси, в тій чи іншій мірі притаманні всім їм:

- **Інтерфейс користувача.** Більшість аналізаторів мають розвинений дружній інтерфейс, який базується, як правило, на Windows. Цей інтерфейс дозволяє користувачеві: *виводити* результати аналізу інтенсивності трафіку; *отримувати* миттєву і середню статистичну оцінку продуктивності мережі; *задавати* певні події і критичні ситуації для відстежування їх виникнення; *робити* декодування протоколів різного рівня і представляти в зрозумілій формі вміст пакетів.

- **Буфер захоплення.** Буфери різних аналізаторів відрізняються за обсягом. Буфер може розташовуватися на мережевій карті, або для нього може бути відведено місце в оперативній пам'яті одного з комп'ютерів мережі. Якщо буфер розташований на мережевій карті, то управління ним здійснюється апаратно, і за рахунок цього швидкість введення підвищується. Однак це призводить до подорожчання аналізатора. У разі недостатньої продуктивності процедури захвату, частина інформації буде губитися, і аналіз буде неможливий. Розмір буфера визначає можливості аналізу по більш або менш представницьким вибіркам даних, що захоплюються. Але яким би великим не був буфер захоплення, рано чи пізно він заповниться. У цьому випадку або припиняється захоплення, або заповнення починається з початку буфера [88, 91, 95].

- **Можливість вимірювання середньостатистичних показників** трафіку в сегменті локальної мережі, в якому встановлений мережевий адаптер аналізатора.

- **Вимірюється коефіцієнт використання** сегменту, матриці перехресного трафіку вузлів, кількість нормальних і пошкоджених кадрів, що пройшли через сегмент.

- **Можливість роботи з декількома агентами**, котрі поставляють захоплені пакети з різних сегментів локальної мережі. Ці агенти найчастіше взаємодіють з аналізатором протоколів за власним протоколом прикладного рівня.

- **Фільтри.** Фільтри дозволяють керувати процесом захоплення даних, і, тим самим, дозволяють економити простір буфера. Залежно від значення певних полів пакета, заданих у вигляді умови фільтрації, пакет або ігнорується, або записується в буфер захоплення. Використання фільтрів значно прискорює і спрощує аналіз, оскільки виключає перегляд непотрібних в даний момент пакетів.

- **Перемикачі** – це деякі умови початку і припинення процесу захоплення даних з мережі, що задаються користувачем. Такими умовами можуть бути виконання ручних команд запуску і зупинки процесу захоплення, тривалість процесу захоплення, поява певних значень в кадрах даних. Перемикачі можуть використовуватися спільно з фільтрами, дозволяючи більш детально й тонко проводити аналіз, а також продуктивніше використовувати обмежений обсяг буфера захоплення.
- **Пошук.** Деякі аналізатори протоколів дозволяють автоматизувати перегляд інформації, що знаходиться в буфері, і знаходити в ній дані по заданим критеріям. У той час, як фільтри перевіряють вхідний потік на предмет відповідності умовам фільтрації, функції пошуку застосовуються до вже накопичених в буфері даних.
- **Багатоканальність.** Деякі аналізатори протоколів дозволяють проводити одночасний запис пакетів від декількох мережевих адаптерів, що зручно для зіставлення процесів, що відбуваються в різних сегментах мережі. Можливості аналізу проблем мережі на фізичному рівні у аналізаторів протоколів мінімальні, оскільки всю інформацію вони отримують від стандартних мережевих адаптерів. Тому вони передають і узагальнюють інформацію фізичного рівня, яку повідомляє їм мережевий адаптер, а вона багато в чому залежить від типу мережного адаптера. Деякі мережні адаптери повідомляють більш детальні дані про помилки кадрів та інтенсивності колізій в сегменті, а деякі взагалі не передають таку інформацію верхнім рівням протоколів, на яких працює аналізатор протоколів [88, 91, 92, 95].

Методологія проведення аналізу. Методологія проведення аналізу може бути представлена у вигляді наступних шести етапів:

- Захоплення даних.
- Перегляд даних, що були захвачені.
- Аналіз даних.
- Пошук помилок (більшість аналізаторів полегшують цю роботу, визначаючи типи помилок і ідентифікуючи станцію, від якої прийшов пакет з помилкою).
- Дослідження продуктивності. Розраховується коефіцієнт використання пропускної здатності мережі або середній час реакції на запит.

- Докладне дослідження окремих ділянок мережі. Зміст цього етапу конкретизується в міру того, як проводиться аналіз.

Зазвичай процес аналізу протоколів займає відносно небагато часу – 1-2 робочих дні.

На сьогоднішній день оператори телекомунікацій використовують кілька систем контролю та моніторингу мережі. Розглянемо ті з них, які беруть участь безпосередньо із забезпеченням сервісів голосової телефонії:

- 1) Системи контролю й вимірювань мережі сигналізацій (н-д, «Сапсан», «Спайдер»);
- 2) Система моніторингу IP- ресурсів;
- 3) Система контролю якості сервісів, в т.ч. голосової телефонії.

Система контролю і вимірювань мережі сигналізацій може використовуватися для таких цілей: забезпечення безперервного контролю за станом мережі сигналізації; постійного спостереження в режимі реального часу за елементами мережі сигналізації; виявлення і локалізації несправностей мережі сигналізації; централізованого контролю трафіку; виявлення незареєстрованої навантаження на об'єктах мережі; виявлення випадків несанкціонованого використання мережі сигналізації.

Зазначена система володіє багатими можливостями вибірки і фільтрації даних, використовуючи які, можливо отримувати значну кількість інформації.

Прикладом такої системи є «Спайдер» і «Сапсан» [96 - 98].

Метод незалежного збору даних, що застосовується у системі «Спайдер», надає всю ключову інформацію для оптимізації цифрових мереж TDM, NGN/IMS, GSM / GPRS, CDMA. Зібрана системою сигнальна інформація далі обробляється за допомогою високоефективних додатків, таких як: моніторинг мереж зв'язку, планування та оптимізація мережі; мультипротокольне трасування викликів; збір докладних записів про телефонні виклики, (транзакції і виклики); контроль узгоджених згідно SLA рівнів якості послуг, що надаються (SLA – угода про рівень якості надання послуг); виявлення несанкціонованого доступу до ресурсів мережі і зловмисних викликів; моніторинг, аналіз і комплексна експертна оцінка роботи

мереж VoIP; кореляція по протоколу MAP с CDR по протоколу ISUP (MAP – протокол сигналізації СКС-7; ISUP – підсистема сигналізації СКС-7); моніторинг загроз інформаційної безпеки мереж зв'язку з урахуванням специфіки застосовуваної на мережі технології.

Система «Спайдер» [98] використовує архітектуру клієнт/сервер, яка добре підходить для реалізації прийнятих логічних концепцій “агентів” і “менеджерів”. Для обміну в реальному часі інформацією про стани об'єктів спостереження застосований протокол SMNP, а для обміну файлами даних – протокол HTTP.

Система «Сапсан» [96] також характеризується наявністю характеристик: великий перелік підтримуваних протоколів; відстеження викликів в масштабі реального часу; централізований контроль трафіку; виявлення незареєстрованого завантаження; оновлення конфігурації мережі та управління конфігурацією Системи з єдиного центру; централізоване відображення стану всієї мережі на одному екрані; повідомлення про аварійні ситуації в масштабі реального часу; отримання різних звітів; самоконтроль обладнання та ПЗ Системи.

Крім того, необхідно, щоб в системі моніторингу була присутня функція трасування викликів разом з функцією формування CDR-записів, яка є однією з найважливіших в системі моніторингу. Користувач системи задає телефонний номер (або частину номера), а система знаходить, групує за часом і видає всі сигнальні повідомлення, пов'язані з викликами на цей номер або з нього в межах всієї мережі. Причому трасування виклику може бути проведено як в реальному часі, так і в режимі постпроцесингу. Останнє можливо завдяки тому, що система моніторингу збирає і декодує всі сигнальні повідомлення, архівуючи і зберігаючи їх протягом декількох днів. Функції тригерів дозволяють зберігати результати трасування не для всіх викликів, а тільки для тих з них, які задовольняють заданому користувачем системи критерієм (час дня, цифри номера, причина роз'єднання, тривалість з'єднання і пр.), і тим самим на порядок підвищують інтервал безперервного спостереження [88, 92, 95].

Система моніторингу IP-ресурсів також виконує функції моніторингу IP-мережі, як правило, дозволяє здійснювати: виявлення проблем з відгуком додатків

для кінцевого користувача; ізолювання причин зниження продуктивності IT-інфраструктури до рівня: мережа, сервер, користувач, додаток; визначення користувачів і додатків, що завантажують мережеві інтерфейси; відстеження внутрішніх параметрів мережевих пристроїв (комутатори, маршрутизатори, сервери); відстеження внутрішніх і зовнішніх загроз; контроль дотримання внутрішніх або зовнішніх SLA (угода про рівень якості надання послуг); ведення багаторівневої звітності про функціонування IT-інфраструктури.

Система контролю якості сервісів, в т.ч. голосової телефонії, як правило, базується на отриманні інформації про параметри якості послуг голосової телефонії, яка передається по каналах електров'язку і по IP-мереж.

Даний напрямок є новим для телекомунікаційного ринку України і ще не зовсім поширений на мережах операторів.

Однак існують технологічні рішення, що дозволяють вимірювати показники, що характеризують доступність послуг для голосової телефонії, такі як: відсоток неуспішних викликів; рівень якості обслуговування (QoS) в VoIP мережі; коефіцієнт втрат пакетів, затримок, спотворення звуку (jitter), часу проходження сигналу, а також обчислення усередненої оцінки якості (Mean Opinion Score); встановлений час завершення з'єднання; відсоток викликів, які відповідають встановленим нормам за часом завершення з'єднання.

Опис основного елементу системи. Розглянувши основні параметри, які можуть збирати та аналізувати вищенаведені системи, можливо прийти до висновку, що сам пристрій, що збирає первинну інформацію і перенаправляє її для подальшої обробки може мати однакову апаратну складову, що має незначні відмінності. Технічно можливо встановити один пристрій типу аналізатора сигналізацій телекомунікаційних систем (ACTC) [96, 97], який можна підключити різними типами інтерфейсів одночасно до фрагментів мереж з традиційною телефонією, а так само до мереж передачі даних. ACTC забезпечує можливості декодування сигнальної інформації в мережах відповідно до національних і міжнародних рекомендацій ITU – T та ETSI [99-101]. ACTC підтримує різні фізичні інтерфейси - E1, Ethernet, SDH (STM-1/4).

Завдяки архітектурі і закладеним спочатку принципам, АСТС є не лише потужним засобом локального контролю мережі ОКС-7, але і володіє системними функціями.

В якості базового елемента для збору первинної інформації можна використовувати АСТС, який зображений на Рис. 3.13.



Рис. 3.13. Базовий елемент

Все це робить можливим використання АСТС в якості бази для створення системи контролю та вимірювань.

У такому випадку АСТС в промисловому виконанні встановлюється в 19" стійку з доукомплектуванням спеціальним обладнанням системи моніторингу [96, 97].

Такий підхід дозволяє узагальнювати інформацію з декількох АСТС для централізованого використання, передавати в центр в реальному режимі часу дані про стан контрольованих об'єктів мережі, підготовляти звіти, що характеризують цілі сегменти мережі. Таким чином, забезпечується плавний перехід від покриття мережі локальними засобами до нової якості контролю – системи моніторингу мережі. При цьому локальні пункти системи моніторингу розвиваються на базі існуючих АСТС, укомплектованих відповідним чином.

Система моніторингу здатна виявляти перевантаження і аналізувати причини їх виникнення в різних точках мережі, на різних рівнях стека протоколів, у різних підсистемах. Граничні умови видачі сповіщень про перевищення заданого порогу, що настроюються безпосередньо користувачем, дають можливість завчасно надати інформацію для своєчасного перерозподілу наявних ресурсів, запобігаючи тим самим виникнення критичних перевантажень.

Доцільно підключити декілька АСТС (залежно від розміру мережі) на різних фрагментах мережі і встановити на них програмне забезпечення, що дозволяє здійснювати захоплення і первинну обробку даних на телекомунікаційних мережах.

Такі підключення можна розглядати як ланку (ланки) першого рівня комплексної системи моніторингу.

До другого рівня архітектури зазначеної системи можна віднести сервери баз даних з встановленим спеціальним програмним забезпеченням, що дозволяє здійснювати обробку отриманих даних з розташованих в різних місцях АСТС за різними критеріями (маршрутизація, стан мережі, якість голосових сервісів).

Крім того, однією з переваг архітектури такої системи є те, що комплексна система моніторингу є пасивною системою, що не робить впливу на роботу комутаційних систем, її робота не залежить від типів комутаційного обладнання і може виступати джерелом первинних даних для інших додатків.

Зібрані системою моніторингу дані можуть зберігатися у віддалених модулях [88] або негайно пересилатися в базу даних центру спостереження. Перед передачею можлива фільтрація і попередня обробка їх в віддаленому модулі, що знижує час передачі інформації до центральної бази даних. Зібрана з усіх віддалених модулів інформація архівується в базі даних і потім може бути згрупована і статистично оброблена відповідно до запитів оператора системи (за часом спостереження, маршрутами, групам абонентів, послуг, вузлів і т. д.).

Система комплексного моніторингу має гнучку ієрархічну структуру з можливістю нарощування кожного ієрархічного рівня.

До самій системі комплексного моніторингу мають бути застосовані такі принципи:

- 1) Управління конфігурацією і роботою має здійснюватися з єдиного центру;
- 2) Дані від територіально рознесених елементів надходять в центр по виділеній підмережі передачі даних;
- 3) Система здійснює самоконтроль, тобто, візуалізацію і контроль функціонування всіх елементів.

Архітектура Системи комплексного моніторингу гнучка, дворівнева.

Розробка і впровадження комплексної системи моніторингу телекомунікаційних мереж вимагає значних витрат. Їх обґрунтування і розрахунки економічних показників системи управління можливі на етапі конкретного проектування. Однак загальну оцінку витрат можна представити, стежачи за шляхами створення і тенденціями розвитку систем моніторингу в інших країнах.

Висновок. З метою зменшення витрат на моніторинг телекомунікаційної мережі доцільно створити єдину мережу комплексного моніторингу телекомунікаційної мережі, яка дозволить об'єднати декілька (2-3 різних мережі) в одну, використавши при цьому єдиний базовий модуль збору інформації на базі АСТС з різним програмним забезпеченням і з єдиним центром обробки інформації про стан мережі. При цьому термінали обробки наявних даних можуть бути розміщені в різних службах оператора і використовуватися для вирішення різних завдань широкого спектра, як для протидії “фроду” (вид шахрайства в області інформаційних технологій) до фізичного стану елементів мережі на предмет їх цілісності та пропускної здатності.

3.3.3.4 Вдосконалення алгоритму маршрутизації самоорганізованих радіомереж

Постановка проблеми

При проектуванні та розбудові самоорганізованих мереж зв'язку виникають труднощі організації роботи мережі в умовах непередбачуваного переміщення вузлів таким чином, щоб можливо було гарантувати доставку повідомлення адресату в будь-якому напрямку, тобто забезпечити зв'язність мережі з урахуванням ретрансляції. Це завдання вирішується в роботі шляхом моделювання і оцінок радіозв'язності вузлів при трансформації мережі, розробки більш ефективного алгоритму маршрутизації.

З метою підвищення зв'язності і якості обслуговування в мобільній самоорганізованій мережі необхідно вирішити такі завдання:

- Визначити найбільш ефективні шляхи підвищення зв'язності в мобільних самоорганізованих мережах;
- Розробити ефективний алгоритм маршрутизації в самоорганізованій мережі з елементами самоадаптації і самоконфігурування в умовах непередбачуваної мобільності вузлів.

Для виконання функцій передачі повідомлень від одного вузла до іншого в самоорганізованій радіомережі необхідний режим ретрансляції - «повторне

пересилання». Маршрутизація в самоорганізованих радіомереж складається з двох важливих етапів:

- знаходження оптимального маршруту;
- підтримання маршруту протягом сеансу.

Забезпечення «зв'язності» мережі відповідає за рішення підтримання маршруту. Знаходження оптимального маршруту без гарантованої зв'язності може бути не вирішено. Але, навіть якщо зв'язність існує в мережі в початковий момент часу, через мобільності вузлів і обмеженості ресурсів приймачів імовірний «розрив» встановлених зв'язків, так що для передачі великого повідомлення в мережі доведеться кілька разів будувати маршрути.

У найповнішому варіанті для вибору алгоритму маршрутизації можна виділити наступні параметри:

1. На мережевому рівні: достатня продуктивність або залишкова ємність (біт / с), затримка з кінця в кінець, ємність буфера у вузлі, розбіжність затримок, коефіцієнт втрати пакетів, витрата енергії на пакет (Дж), час життя маршруту (с),

2. На каналному (MAC) рівні: MAC затримка, стабільність зв'язку (З'єднання) - передбачуваний час життя зв'язку; надійність зв'язку - коефіцієнт доставки пакетів (%), відносна рухливість / стабільність вузлів,

3. На фізичному рівні: співвідношення сигнал / перешкода (SIR), швидкість бітових помилок (BER), залишковий заряд батареї або показник вартості.

В самоорганізованій радіомережі з невідомою топологією оптимальним методом пошуку маршруту є метод за запитом (вимогу). Даний метод дозволяє будувати маршрут в мережі без постійного опитування, що зменшує навантаження на мережу. Для пошуку маршруту з широкомовної розсилкою пакетів необхідно вирішити ряд складних завдань, пов'язаних з лавиноподібним поширенням пакетів по мережі [2,3]. Даний вид пошуку маршруту наповнює мережу великою кількістю пакетів, і якщо не застосовувати методи скорочення кількості пакетів, мережа швидко досягне критичної "маси" трафіку, що призведе до її непрацездатності. На рис.1 вказана схема розсилки запитів, що призводить до лавиноподібного поширення трафіку при широкомовної розсилки. В радіомережі через властивостей середовища передачі

даних пакети досягають всіх вузлів тільки в зоні стабільного радіоприйому. Для зменшення кількості службового трафіку в мережі слід перенести проблему вибору ретрансляторів на самі проміжні вузли (рис.3.14).

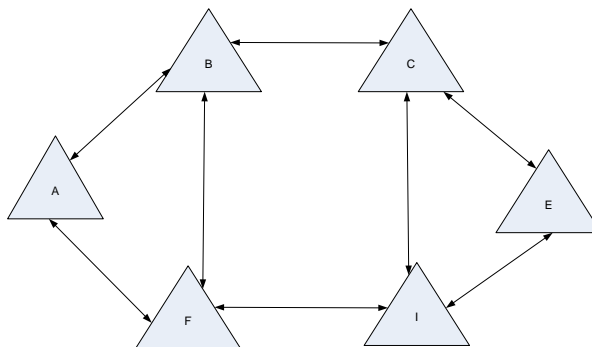


Рис. 3.14 Запит при побудові маршруту в радіомережі

Основною особливістю самоорганізованих радіомереж є мінливість топології, зміна параметрів ліній зв'язку, непередбачувана динаміка вузлів і зв'язків між ними (рис. 3.15).

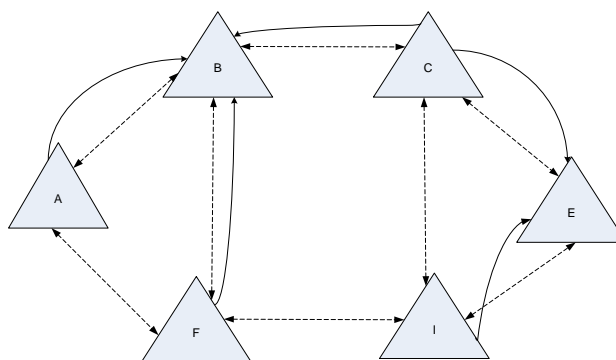


Рис. 3.15 Взаємодія вузлів в режимі запит-відповідь.

Особливості пропонованого варіанту маршрутизації можна відобразити наступною схемою (рис. 3.16). На відміну від протоколів з побудовою декількох варіантів шляху (часто використовується термін «розтікання» або «затоплення», рис. 3.17) і оцінкою вартості кожного, в запропонованому варіанті (самоорганізованої) маршрутизації кожен вузол-ретранслятор в залежності від вихідної програми і умов

«сам вирішує» - чи буде він ретранслювати повідомлення сусідам чи ні. Таке рішення, наприклад, можуть залежати від розрядки батареї живлення в даному присторі. Найбільш близькими до алгоритмів маршрутизації подібного типу, можливо, слід вважати «епідемічні» алгоритми. В останніх моделюється процес поширення захворювання (епідемія) в колективі. Передача інформації відбувається з проміжним зберіганням інформації, якщо не можна відразу передати її адресату [1,6]. Вдосконалений самоорганізований алгоритм маршрутизації (САМ) використовує дещо інший принцип епідемії, залежно від свого стану вузол або «підхоплює хвороба», або ні.

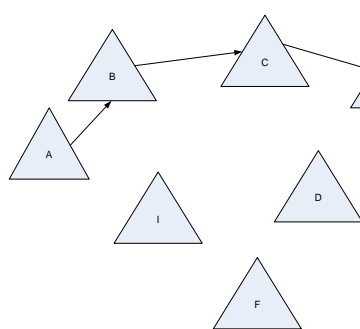


Рис. 3.16 Розбудова одного шляху

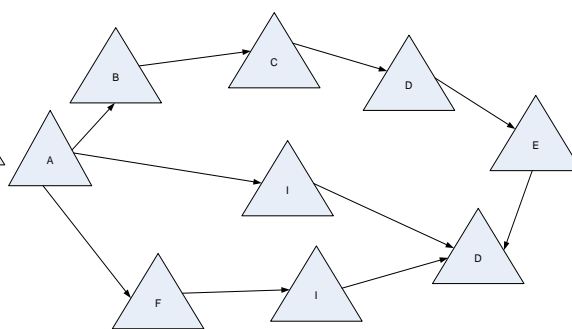


Рис. 3.17 Розбудова декількох шляхів

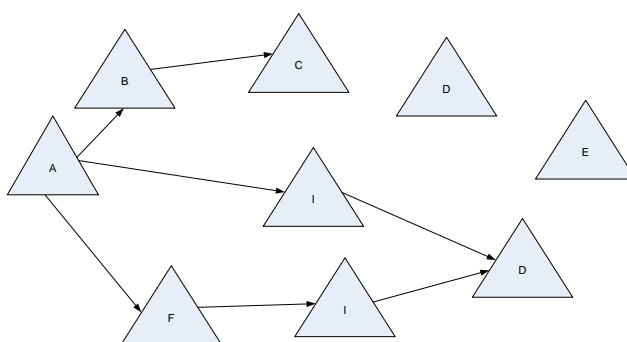


Рис. 3.18 Самоорганізація мережі

Розглянемо самоорганізований алгоритм маршрутизації (САМ, рис. 3.18)

- Алгоритм САМ призначений для мобільних бездротових самоорганізованих мереж зв'язку, в яких вузли мають однаковий статус. Функції базових станцій розподілені між усіма учасниками інформаційної взаємодії. Алгоритм САМ є інтелектуальним, в нього закладена можливість вузлом самостійно

приймати рішення про участь в побудові маршруту та / або відновленні його. Така можливість дозволяє управляти трафіком, що проходить через вузол (Traffic Driven).

- Алгоритм виробляє пошук оптимального маршруту між тим що викликає та тим, кого викликають в складі самоорганізованої мережі. Особливість і унікальність алгоритму полягає в тому, що він не будує таблиць маршрутизації на вузлі, а абоненти не мають інформації про місцезнаходження кожного учасника мережі. Але, в той же час алгоритм дозволяє знайти оптимальний маршрут між учасниками з'єднання. Досягається це за рахунок наступних властивостей алгоритму.

- Для забезпечення зв'язності, з урахуванням мобільності вузлів, в алгоритмі SAM застосовується кілька варіантів відновлення і підтримання маршрутів. Один з варіантів заснований на руйнуванні і побудові маршрутів через певний час. Такий підхід дозволяє будувати актуальні маршрути, так як маршрут буде будуватися в чинній топології на даний момент часу. Складність використання даного підходу полягає в лавинній розсилці пакетів для побудови маршруту.

- Іншим варіантом забезпечення зв'язності є метод локального відновлення маршруту. На шляху поширення інформації за обраним маршрутом завжди знаходяться вузли, що не беруть участь в даному маршруті, але отримують інформацію від сусідніх вузлів. Найближчі вузли отримують та обробляють отримані пакети. На основі отриманих даних обчислюється інформація, яка необхідна для підтримки маршруту. При розриві маршруту найближчі вузли відновлюють зруйнований маршрут.

- На ділянці розриву алгоритм починає будувати новий маршрут якраз з точки розриву. Відновлення маршруту відбувається на основі основного алгоритму, маршрут будується з використанням даних про попередній маршрут.

- Запит побудови маршруту викликає трансляцію розсилку пакетів. Адресат приймає пакети з усіх маршрутів і вибирає основний та додаткові маршрути. За основним маршрутом передаються дані, а по запасним передаються пакети підтримки маршруту.

Алгоритм САМ для забезпечення зв'язності вирішує також завдання, які адаптують його до постійно умов, що постійно змінюються:

1. Зміна числа вузлів.

Число вузлів впливає тільки на пропускну здатність мережі і завантаженість. Алгоритм побудований таким чином, щоб не прив'язуватися до кількості вузлів.

2. Навантаження на мережу, втрата пакетів.

Алгоритм маршрутизації намагається рівномірно розподілити навантаження по мережі. Для цього використовується різні стани вузла, що дозволяють оцінити можливість вузла. Доставка пакета до наступного вузла відстежується за рахунок властивостей середовища передачі даних.

Мережа, побудована відповідно до протоколу САМ, в разі необхідності відправки пакетів декільком вузлам, формує різні сесії, що дозволяють розділяти інформацію від різних вузлів. У разі передачі інформації від групи вузлів одного вузла, ідентифікатор з'єднання дозволяє вузлу, що приймає, розділяти інформацію.

Алгоритм САМ для забезпечення зв'язності в мережі усуває такі недоліки протоколів маршрутизації, що притаманні відомим алгоритмам. (Нижче перераховуються: недолік і способи усунення)

1. Перевантаженість мережі через постійну передачу даних. Для підтвердження пакетів відсилаються пакети підтвердження, що призводять до подвоєння кількості пакетів в ефірі. В алгоритмі для підтвердження використовується властивість дипольних антен поширювати сигнали на всі боки, що дозволяє відмовитися від пакетів підтвердження або зменшити кількість таких пакетів.

2. Дуже низька надійність, захист, тому що дані поширюються в радіоефірі. В алгоритмі САМ ці проблеми поки не розглядалися, тому що захист даних може забезпечуватися самим додатком.

3. Кожен вузол самостійно вирішує - брати участь чи ні в маршруті, а також приймати / розсилати пакети по декількох маршрутах. Це призводить до надмірних затримок. В алгоритмі САМ після побудови маршруту вузли виробляють тільки порівняння необхідних полів і не виробляють розрахунків, що дозволяє скоротити час обробки і прийняття рішення про участь в маршруті. Ухвалення рішення про участь

в маршруті відбувається на етапі побудови маршруту та проводяться за поточним станом вузла, і в процесі роботи маршруту не змінюються. У САМ методі не застосовується адресна передача даних. Перевіряється тільки інформація - ретранслює вузол пакет чи ні.

4. Кожен вузол «повинен відкрити великий пакет», що вимагає більше часу, ніж при відкритті «маленьких», службових. Для обробки пакета не потрібно вивчати пакет цілком, досить лише переглянути певні поля і порівняти їх з іншими значеннями. Відмінність маленьких і великих пакетів полягає в займаній пам'яті і часу поширення по ефіру. За час, поки приймається останній біт пакета, може бути прийнято рішення про ретрансляцію.

Висновки

Доведено, що самоорганізований алгоритм маршрутизації, відповідає вимогам адаптації, самоконфігурування і самовідновлення мережі. До позитивних особливостей алгоритму відноситься знижений обсяг службового трафіку.

Зниження службового трафіку досягається за рахунок об'єднання інформаційного та службового потоків.

Виявлено, що за сукупністю таких параметрів, як «затримка з кінця в кінець», пропускна здатність в мережі, затримка доступу до середовища, запропонований алгоритм ефективніше та має переваги перед стандартними протоколами, такими як AODV, DSR, OLSR.

Висновки до розділу 3

1. В цьому розділі сформульована задача оцінки пропускної здатності радіозасобів на основі технології SDR самоорганізованої мережі, яка визначається ймовірністю якісного забезпечення зв'язку і ймовірністю успішного радіоприйому при апріорно невідомому територіальному розподілі радіовузлів з урахуванням середніх втрат поширення і завмирань.

2. Запропоновано алгоритм оцінки пропускної здатності самоорганізованої мережі з радіозасобами технології SDR, який дозволяє оцінити чинники, що її

визначають, окремо і, таким чином, визначити шляхи підвищення пропускної спроможності мережі з програмно-конфігурованими радіозасобами.

3. Наводяться результати досліджень статистичних характеристик пропускної здатності самоорганізованої мережі з ортогональними піднесучими, що функціонує в багатопроменевому радіоканалі із завмираннями Накагамі. Визначено пропускну здатність широкосмугової мережі та запропоновано її статистична модель для багатопроменевого радіоканалу зв'язку зі статистикою впливу одночасно швидких і повільних завмирань.

4. Запропоновано модель оцінки живучості самоорганізуючої бездротової мережі із радіозасобами технології SDR, який дозволяє оцінити чинники, що її визначають, окремо і, таким чином, визначити шляхи підвищення живучості мережі з програмно-конфігурованими радіозасобами.

5. Наведена оцінка якості надання послуг в мережах стільникового зв'язку. Якість послуг зв'язку є тим фактором, який впливає на рівень конкурентоспроможності серед операторів зв'язку. Єдині показники якості надання послуг зв'язку будуть використовуватися як операторами зв'язку, так й представниками офіційної влади, фізичними та юридичними особами. Варто розробити систему показників якості послуг з урахуванням світових стандартів та досвіду міжнародних організацій, проте в першу чергу опиратись на нормативну базу діючого законодавства. Наведені нормативні документи та міжнародні стандарти, які використовуються в основі створення високоякісної та гнучкої системи перевірки якості послуг системи стільникового зв'язку.

6. Визначені основні задачі та підстави для розгляду питань створення комплексної системи моніторингу телекомунікаційних систем для забезпечення якості послуг самоорганізуючої мережі. Розглянута методологія проведення аналізу мережі, наведені приклади побудови систем аналізу і контролю вимірювань. Показано, що на сучасних телекомунікаційних мережах в даний час створено та експлуатуються одночасно декілька систем моніторингу. З метою здешевлення та спрощення існуючих систем моніторингу доцільно об'єднати їх в одну комплексну систему, використовуючи в якості базового елементу універсальний аналізатор

сигналізацій телекомунікаційних систем. Розглянуті особливості використання базового модуля збору інформації на базі АСТС з різним програмним забезпеченням і з єдиним центром обробки інформації про стан мережі. Описані функціональні характеристики систем контролю й вимірювань мережі сигналізацій «Сапсан» і «Спайдер»).

7. Доведено, що самоорганізований алгоритм маршрутизації, відповідає вимогам адаптації, самоконфігурування і самовідновлення мережі. До позитивних особливостей алгоритму відноситься знижений обсяг службового трафіку. Вдосконалений алгоритм маршрутизації самоорганізованих радіомереж за параметром завантаженості мережі службовим трафіком, перевищує основні протоколи обміну інформації на 15%. Це є цілком сприятним результатом, та доводить переваги розробленого алгоритму.

РОЗДІЛ 4

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБЛЕНИХ МОДЕЛЕЙ І АЛГОРИТМІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ В САМООРГАНІЗОВАНИХ МЕРЕЖАХ

4.1. Постановка задачі

Раніше було встановлено, що показник зв'язності мобільної радіомережі із самоорганізацією є вихідним і визначається середньою дальністю радіозв'язку мобільного засобу мережі, а показник пропускної здатності визначається ймовірністю успішного радіоприйому. Підвищення пропускної спроможності радіозасобів зі збереженням зв'язності радіомережі із самоорганізацією можливо за рахунок адаптації параметрів радіозасоба до умов територіального розподілу бездротових засобів в зоні дії мережі, зокрема, за допомогою керування напрямком і потужністю передачі.

Отже, в цьому розділі для підвищення ефективності функціонування мобільної радіомережі зі самоорганізацією необхідно розробити алгоритм і пристрій адаптивного вибору режимів роботи радіозасобів нового покоління в умовах складної заводої обстановки, систему широкосмугового бездротового доступу із використанням терагерцового діапазону для забезпечення пропускної спроможності. Для вирішення завдань розробки наукових основ дослідження загальних властивостей і принципів функціонування мобільних телекомунікаційних систем і комп'ютерних мереж нового покоління, а також з метою розробки принципово нових методів аналізу, які спрямовано на поліпшення їх технічних характеристик і забезпечення контролю та діагностики необхідно проаналізувати методи аналізу сезонності та аналізу тренду, методологію збору первинної інформації про телекомунікаційної мережі та процедури перетворення первинних значень характеристик телекомунікаційної мережі у часовий ряд і випадкову послідовність.

4.2 Спосіб адаптивного вибору режимів роботи радіозасобів нового покоління в умовах складної заводової обстановки

Одним з варіантів практичного вирішення завдання забезпечення високої заводостійкості радіозасобів і комплексів рухомого радіозв'язку при комплексному впливі чинників, що заважають і одночасному покращенні характеристик їх електромагнітної сумісності є запропонований алгоритм (рис. 4.1) заводостійкого функціонування окремих радіозасобів, що використовують автоматичне регулювання потужності передавача і зміну режимів роботи, а також функціональна схема радіозасобу, що реалізує даний алгоритм [115].

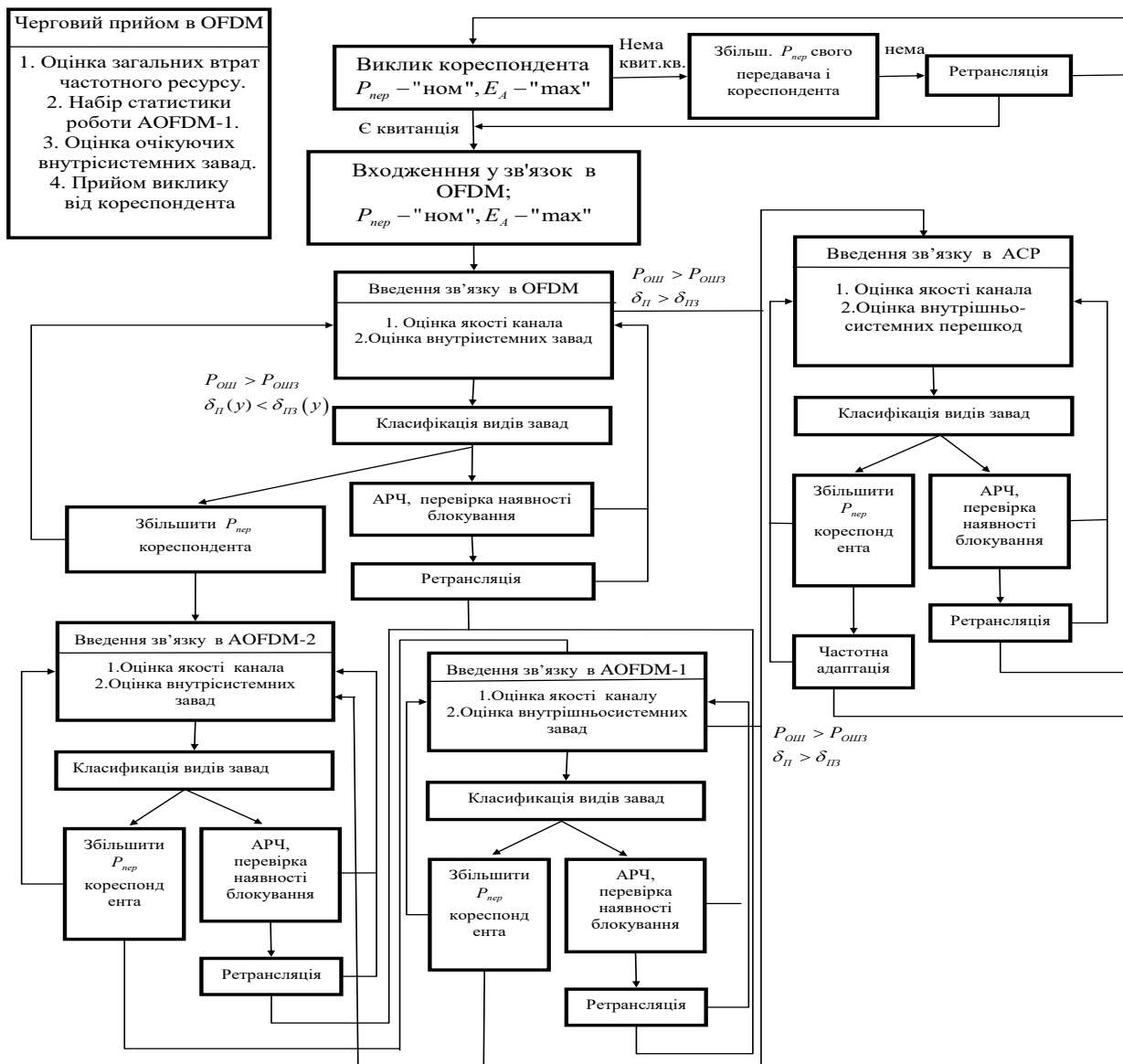


Рис. 4.1 Алгоритм роботи режимів роботи радіозасобів

Пропонований алгоритм функціонування заснований на оцінці каналу (у тому числі глибини завмирань сигналу) і оцінці внутрісистемних завад, а також класифікації виду завад, що викликають порушення зв'язку. У тому випадку, якщо якість радіоканалу менше необхідного $P_{oui} \geq P_{ouitp}$, рівень внутрісистемних завад допустимий ($\delta n(y) < \delta n_3(y)$) і впливає адитивна завада, то відновлення зв'язку здійснюється в такій послідовності: спочатку дається команда на збільшення потужності передавача кореспондента, і якщо зв'язок не відновився, то відбувається зміна режиму (з OFDM в AOFDM-2). Зміна режимів відбувається послідовно від OFDM до ACP режиму.

Радіозасіб, функціональна схема якого представлена на рис 4.2, містить:

- 1 - аналізатор виду перешкод (АВП),
- 2 - аналізатор якості каналу (АКК),
- 3 - аналізатор придатності частоти (АПЧ),
- 4 - блок автоматичного ведення зв'язку (БАВС);
- 5 - кінцевий пристрій (ЗУ),
- 6 - RS-тригер;
- 7,8,31,34,35,39 - елементи "АБО",
- 9 - атенюатор (АТТ);
- 10,21 - приймачі (ПРМ1, ПРМ2) ;
- 11 - генератор псевдовипадковою послідовності (ГПРП);
- 12 - система єдиного часу (СЕВ),
- 13 - дешифратор команд кореспондента;
- 14,15,26 - ключі,
- 16 - блок управління атенюатором;
- 17,25,29 - блоки електроживлення (БЕЗ) приймачів № 10,21 і передавача 30;
- 18 - комутатор,
- 19 - виділювач адреси,

20 - блок виявлення блокування (БВБ);

22 - блок оцінки загальних втрат (БООП);

23 - блок набору та прийому адрес і команд (БНПАК);

24 - вимірювач $U_c + U_n$ і глибини завмирань сигналу;

27 - пристрій вибору (УВЛЧ);

28 - блок ведення зв'язку AOFDM-1;

30 - передавач (ПРД);

32 - формувач команд кореспонденту (ФКК),

33 - блок формування команд на регулювання потужності передавача (БФКРМП);

36,41 - елементи И;

37,40,42,43 - чекаючі мультивібратори (ЖМВ),

38 - блок прийому команд регулювання потужності передавача.

Радіозасіб працює таким чином. В режимі чергового прийому другий приймач сканує по виділеному діапазону частот. Сигнал з його виходу надходить на вхід БВС AOFDM-1 28, в якому у залежності від заводової обстановки кожній частоті присвоюється свій ваговий коефіцієнт. У БООП 22 ведеться підрахунок втрачених частот від загального ресурсу, який виділений для радіозв'язку. З виходу БООП 22 чисельне значення втрат в двійковому коді надходить в БАВС 4 на компаратори. Інші виходи компараторів з'єднані з відповідними виходами ДМВП, при яких можливе використання одного з чотирьох режимів (OFDM, AOFDM-1, AOFDM-2 і ACP) роботи пристрою. Шифратор замкнений. Перший приймач перебудовується в режимі OFDM.

Сигнал з виходу першого приймача надходить на дешифратор команд кореспондента 13, виділювач адреси 19 і на БНПАК 23. Якщо адреса, що надходить в БНПАК, не належить даному пристрою, то в БНПАК сформується сигнал "скидання", який надійде в блок 13, який заборонить просування інформації в регістрах зсуву блоку 13.

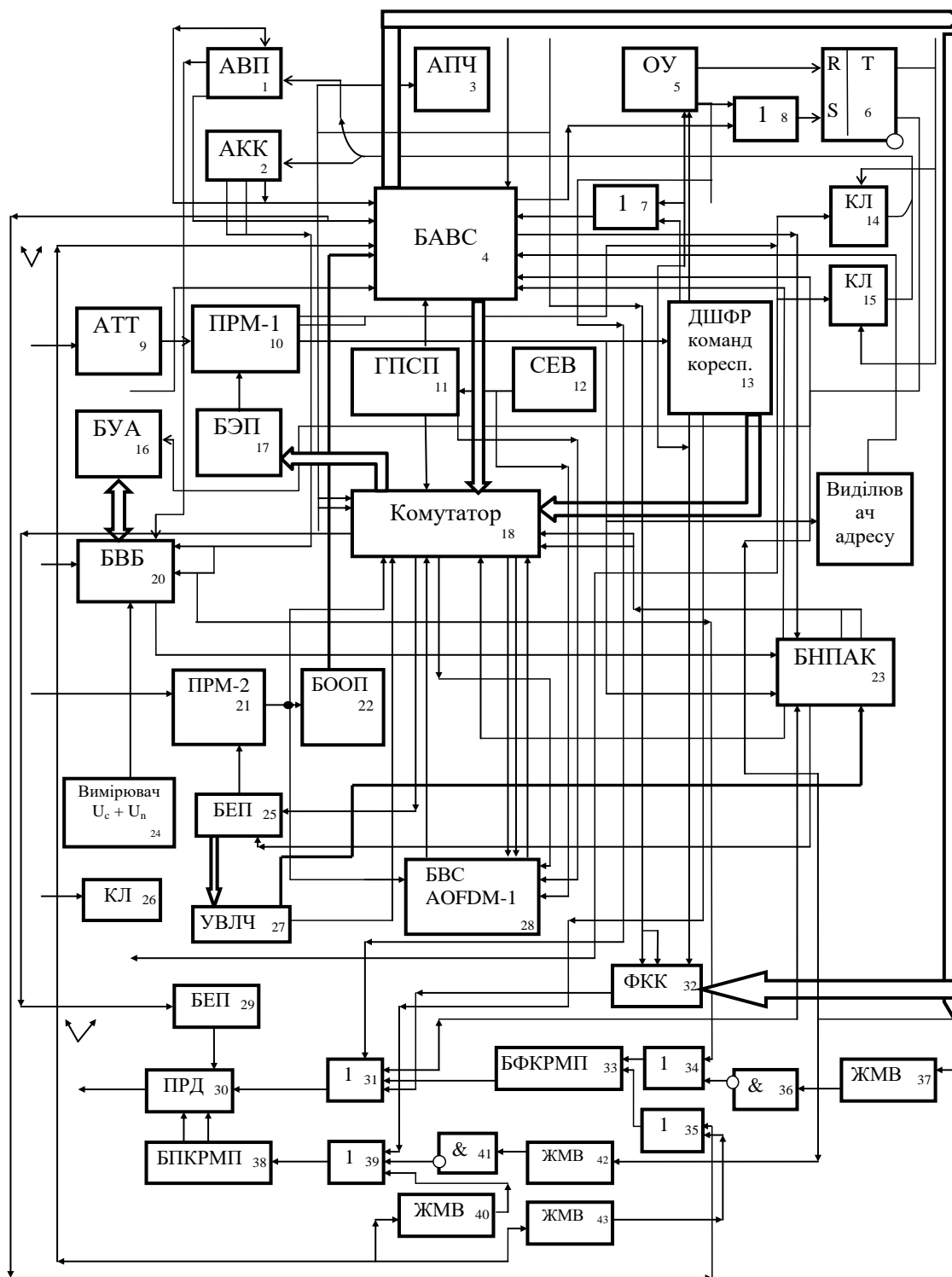


Рис. 4.2 Функціональна схема режимів роботи радіозасобів

Виділювач адреси 19 реєструє на кожну адресу даної радіомережі. З його виходу сигнал надходить в БАВС 4 на блок оцінки внутрісистемних перешкод, де в залежності від кількості прийнятих адрес за повний цикл псевдовипадкової

послідовності, яка формується в ГПРП 11, на виході ПЗУ в двійковому коді з'явиться значення очікуваних внутрісистемних завад. У компараторі проводиться порівняння очікуваного рівня внутрісистемних втрат із значенням, при якому ще забезпечується необхідна якість зв'язку.

Таким чином, в режимі чергового прийому виходячи з оцінки загальних втрат частотного ресурсу, що виникають за рахунок використання кореспондентами мережі одного й того ж ансамблю частот, проводиться попередній вибір режиму роботи. Цей вибір забезпечує БАВС. Переведення приймальної частини даного радіозасобу та аналогічного пристрою кореспондента в той чи інший режим відбувається після прийому адреси. Після прийому адреси формується "квитанція", яка передається кореспонденту.

Обмін квитанціями між кореспондентами свідчить про входження їх в зв'язок. Якщо в процесі входження в зв'язок за час $t = t_{\text{прд вик}} + t_{\text{прм вик}} + t_{\text{пер квит}}$ на БАВС 4 не надійде сигнал квитанції, то формуються імпульси тривалістю, що забезпечує максимальну потужність свого передавача і передавача кореспондента. Дане збільшення потужності передавачів необхідно в тому випадку, якщо кореспондент не приймає виклик або ж ми не приймаємо "квитанцію". Якщо після збільшення потужності передавача через час $t = t_{\text{увл.мощ}} + t_{\text{прд вик}} + t_{\text{прм вик}} + t_{\text{пер квит}}$ забезпечується лінією затримки "квитанція" не надійде, то потужності передавачів (свого і кореспондента) виводяться на номінальну. Команда на збільшення (зменшення) потужності сприймається в дешифратор регулювання потужності блока 13. Якщо після відходу на ретранслятор через час $t = t_{\text{перех в ретр}} + t_{\text{прд вик}} + t_{\text{прм вик}}$, що забезпечується лінією затримки, з блоку 13 квитанція не надійде, то на виході ключа з'явиться одиниця, яка встановить *RS*-тригер в початковий стан. При необхідності повторити виклик кореспондента повторюється операція номер телефону та входження в зв'язок.

У разі приходу сигналів "квитанції" або "виклик" відбудеться відмикання шифратора. Сигнали на його виходах, залежно від оцінки загальних втрат частотного

ресурсу і всередині системних перешкод встановлять один з чотирьох RS-тригерів блоку установки режимів в одиничний стан.

На виходах дешифратора з'являться сигнали установки приймальної частини радіозасобів в той чи інший режим (OFDM, AOFDM-2, ACP, AOFDM-1). Паралельно у формувачі команд (32) формується команда “перехід” в один з чотирьох режимів, що надходить через елемент ІЛИ 31 в передавач 30. Команда “перехід” сприймається кореспондентом в дешифратор “переходів” (блок 13). Сигнали з блоку 13 надходять на комутатор 18. При цьому:

- “Перехід в OFDM”: БЕП 29 управляється ГПСП11.

- “Перехід в AOFDM-2”: БЕП 29 управляється ГПСП 11 через лінію затримки на час $t = t_{анал. прм. частоти}$. Аналіз проводиться кореспондентом, і якщо частота непридатна, відбувається “виключення частоти” та ключ закривається. Відбувається виключення ураженої частоти з ансамблю частот, виділеного для зв'язку. Механізм формування сигналу “виключення частоти” розглядається нижче.

Алгоритми ведення радіозв'язку. Запропонуємо, що за внутрісистемним завадам і за загальними втрат частотного ресурсу БАВС 4 встановить приймальню частину радіозасобу в режим OFDM (передавальною частиною керує кореспондент). У передавач через елемент ІЛИ 31 надходить адресу від БНПАК 23 і інформація від ОУ 5. Сигнал від загального тракту прийому ПЗМ-1 (10) проходить через відкритий ключ 15 на аналізатор якості каналу 2, а від амплітудного обмежувача ПЗМ -1 (10) через відкритий ключ 14 на аналізатор виду завади 1.

Алгоритм 1. Аналіз якості каналу 2 на виході “>” видав одиницю (канал поганий). Ця одиниця надходить на аналізатор виду завади 1 і відкриє його виходи. Якщо завада адитивна, то способом боротьби з нею в режимі OFDM (AOFDM-1, AOFDM-2) буде збільшення потужності передавача кореспондента. Логічна одиниця з аналізатора виду завади 1 надійде у блок формування команд 33. Кореспондент збільшить потужність свого передавача. Ця ж одиниця через час $t = t_{прд. команд} + t_{прм. команд} + t_{увл. моц.}$, що забезпечується лінією затримки, відкриє ключ БАВС 4. Якщо на виході “>” аналізатора якості каналу, як і раніше “1”, то з ключа

одиниця поступить в блок установки режимів, на елементи И. На другі входи И надходять сигнали від RS-тригер. Таким чином, пропонуючи роботу в OFDM (1-й RS-тригер у стані 1), “1” з виходу першого елемента И через елемент ИЛИ надійде на S-вхід другого RS-тригера і встановить його в одиничний стан, що забезпечує режим AOFDM-2 скинеться в “0”. “Одиниця” з RS-тригера поступить в дешифратор. На виході дешифратора сформується сигнал “включення AOFDM-2 на прийом”. Цей сигнал у вигляді одиниці надійде на комутатор 18. При цьому на вході 3 демультимплексора одиниця, вхід 1 комутується на вихід 1 і керування БЕП 25 виробляє ГППП 11. На керуючому вході ключа також одиниця, він відкритий і сигнал від ПРМ-2 (21) надійде на аналізатор придатності частоти 3. Якщо частота придатна до використання в якості робочої, то на виході блоку 3 з’явиться одиниця, яка надходить на ключ комутатора 18. Ключ відкриється і через час $t = t_{\text{анализу пригод. частоти}}$, що забезпечується лінією затримки, сигнал надійде до БЕП 17. Таким чином, відбувається управління перебудовою ПЗМ-1 (10) в режимі AOFDM-2. Якщо ж частота не годна, то ключ виявиться розімкнутим і частота, яка визначається ГПСЦ, буде виключена. Крім того, з другого виходу блоку 13 одиниця надійде на ФКК 32. Сформований сигнал “виключення частоти”, надійде потім через ИЛИ 31 на передавач.

Розглянемо як відбувається встановлення режиму AOFDM-2 у кореспондента на передачу, а також виключення частоти. Отже, з виходу шифратора, як було розглянуто вище, сигнал “включення AOFDM-2 на прийом” проходить на комутатор 18. Цей же сигнал надходить у формувач команд кореспонденту 32. У формувачі відбувається формування команди “перехід в AOFDM-2” і через елемент ИЛИ 31 вона надходить на передавач 30. Ця команда сприймається кореспондентом в дешифратор переходів (блок 13).

Алгоритм 2. На виході “>” аналізатора якості каналу 2 в режимі AOFDM-2 з’явилася одиниця. Дія блоку автоматичного відновлення зв’язку в разі адитивної завади точно таке ж, як і при роботі в OFDM. Перехід же буде здійснюватися в AOFDM-1, якщо збільшення потужності у кореспондента не поліпшить якість зв’язку.

Може статися так, що і в режимі AOFDM-2 виникає та ж ситуація (на виході “>”, АКК 2 “1”, і завада при цьому адитивна). У цьому випадку БАВС 4 прийме рішення на ведення зв'язку в адаптивному режимі (АСР).

Отже, при дії адитивної широкопasmової завади найбільш прийнятним для зв'язку є режим АСР. Але цей режим має низку завадостійкості. Аналізатор виду завади 1 (при погіршенні якості каналу) визначить, що завада адитивна. Відбудеться збільшення потужності у кореспондента (алгоритм збільшення точно такий же як в режимі OFDM, AOFDM-1, AOFDM-2). Корисний сигнал може задавити перешкоду і зв'язок триває. Якщо ж сусідній радіозасіб збільшить рівень спрямованої завади, то з виходу елемента И в БНПАК 23 надійде команда (“адаптація по частоті”). БНПАК 23, керуючий БЕП 17 по ланцюгу перебудує приймач на частоту, зазначену пристроєм вибору кращої частоти 27. У кореспондента, після того як прийме команду переходу на нову частоту (команда приймається в БНПАК), управління піде по ланцюгу ключ - елемент ИЛИ. Якщо через час $t = t_{\text{воост зв.}}$ за рахунок перебудови (забезпечуваною ЛЗ) якість зв'язку не покращився, то відмикається ключ, і одиниця надійде в блок установки режимів на RS-тригер включення режиму AOFDM-2. Таким чином, у цій ситуації єдино правильним способом покращити зв'язок буде зміна режиму роботи АСР на більш перешкодостійкий режим AOFDM-2.

Алгоритм 3. Від сусіднього радіопристрою діє широкопasmова загороджувальна завада. БАВС 4 при роботі в AOFDM-2, AOFDM-1 і OFDM прийме рішення на роботу в АСР, але в цьому режимі діє завада і БАВС 4 переведе радіозасіб в режим AOFDM-2. Виходить як би замкнене коло, постійний перехід радіозасіб з режиму в режим. Щоб уникнути цього в БАВС 4 введений лічильник, який дозволяє включення режиму АСР не більше трьох разів. Таким чином, перебудова по замкнутому кільцю АСР → AOFDM-2 → AOFDM-1 → АСР здійсниться не більше трьох разів. Четвертої перебудови не відбудеться, радіозасоби залишаться в режимі AOFDM-1. Втрати інформації звичайно ж будуть, але ведення зв'язку не припиниться. Крім того таймер через t , визначається хвилинами, скине лічильник в початковий стан, тим самим

здійсниться перевірка наявності завади. Отже, ми розглянули роботу радіозасобів при впливі на нього широкопasmової адитивної завади.

Алгоритм 4. На вхід приймача ПРМ-1 (10) впливає мультиплікативна завада. З виходу “мультиплік” аналізатора виду завади рівень логічної “1” надійде в блок виявлення блокування 20. Якщо блокування є, то з блоку 20 надійде команда на блок управління атенюатором 16 “загрубити чутливість”. Якщо через $t = t_{\text{загрубл. чутл.}}$, яке забезпечується лінією, затримки якість зв'язку не покращитися (рівень блокуємої завади високий), то з ключа “1” надійде на ИЛИ, і далі на JK-тригер. JK тригер встановлюється в стан “1”. Радіозасіб переходить в режим чергового прийому.

Нехай БВБ 20 визначив - “блокування немає”. Іншими словами, мультиплікативна завада обумовлена завмираннями на трасі, тому з БВБ надходить рівень логічної одиниці в БНПАК 4, як команди “включення ретранслятора”. Якщо через $t = t_{\text{перех. в ретран.}}$, забезпечується лінією затримки, поліпшення якості зв'язку не відбулося, з виходу ключа одиниця надійде на JK-тригер. Радіозасіб перейде в режим чергового прийому.

Отже, ми розглянули роботу радіозасобу при впливі на вхід мультиплікативної завади.

Алгоритм 5. В системі зв'язку при роботі в AOFDM-2, OFDM, AOFDM-1 з'явилися внутрісистемні завади. На виході компаратора “>” з'явиться рівень логічної одиниці, що надходить на елемент И. На другий вхід елемента И надійде одиниця від аналізатора якості каналу 2. Лічильник спрацює і встановить RS-тригер в стан “включення АСР”. Такий перехід можливий не більше трьох разів, оскільки в АСР (як уже зазначалося вище можлива наявність завади). Таким чином, краще працювати з внутрісистемними завадами, ніж бути повністю пригніченими випадковою завадою. Новий перехід можливий через час, що забезпечується таймером. Тим самим проводиться перевірка наявності постійної завади в АСР. Відомо, що найбільш завадостійким режимом є OFDM, потім AOFDM-2, AOFDM-1, АСР. Тому при наявності частотного ресурсу необхідно працювати в самому завадостійкому режимі.

4.3 Система широкопasmового безпроводового доступу із використанням терагерцового діапазону

Корисна модель відноситься до техніки зв'язку, що забезпечує передачу та прийом даних по каналам радіозв'язку. У сучасному світі постійно зростає інтерес до такого каналу одержання інформації, як міжнародна комп'ютерна мережа Інтернет. Усі наявні до дійсного часу системи Інтернет-доступу, технології яких найчастіше доповнюють одна одну, формують розгалужену різношвидкісну мережу. При цьому ріст потреби абонентів до якості доступу, що включає і підвищену інформаційну швидкість, тобто доступу до широкої смуги інформаційного потоку, вимагає надавати можливість використання широкопasmового абонентського доступу, і безпроводного в тому числі. Старі вузькопasmові технології, які використовують технологію доступу до основної смуги із швидкостями нижче 1...1,5Мбіт/с, все частіше поступаються місцем новим і зокрема мікрохвильовим системам, що базуються на технології розширення спектра сигналу, псевдовипадкових стрибків частоти, технологіях WIMAX, WiFi. Безпроводова мережа дозволяє скоротити трати на прокладку дорогого оптичного кабелю, а також значно зекономити на організації крупної розгорнутої локальної мережі в середині самої будівлі. Крім того, безпроводова мережа є оптимальним рішенням у випадку неможливості проведення кабельних робіт в будівлі через особливості конструкції чи по іншим причинам, наприклад, при відмові в проведенні таких робіт зі сторони орендатора будівлі.

Покриття зони обслуговування значного розміру послугами доступу до інформаційних ресурсів реалізується аналогом системою МІТРС-ІНТ [106-109].

Це мікрохвильова інтегрована телерадіоінформаційна система складається з центральної і абонентської станцій, причому центральна станція містить принаймні один передавально-приймальний ствол, що включає в себе передавач, вихід якого через дуплексер підключений до антени, та приймальний тракт (d-конвертор), вхід якого через дуплексер підключений до антени, вихід до блока подільника, а абонентська станція містить дзеркальну антену, яка через дуплексер з'єднана з передавачем (UP-конвертором) і приймальним трактом (d-конвертором), яка

відрізняється тим, що до складу центральної станції введені головна приймальна станція (ПС), що включає в себе d-конвертор, вихід якого підключений до входу блока подільника, вихід якого з'єднаний з блоками демодуляції, і комп'ютер, до якого підключені блоки демодуляції, а до складу абонентської станції додатково входить блок модуляції, вхід якого з'єднаний з виходом d-конвертора, та передавальна термінальна станція (ТС), що включає в себе UP-конвертор, вхід якого з'єднаний з блоком модуляції, комп'ютер, до якого підключені блок модуляції і блок демодуляції.

При цьому блок подільника головної приймальної станції (ПС) має від 1 до N-виходів, а вхід передавача центральної станції підключений до каналу зв'язку, що з'єднує його з портом серверу вузла інформаційної мережі (наприклад, Інтернет). Комп'ютер центральної станції підключений до сервера доступу вузла інформаційної мережі (наприклад, Інтернет), а блок модуляції абонентської станції може функціонувати як в режимі множинного доступу з розподілом по частоті (FDMA), так і в режимі множинного доступу з розподілом по часу (TDMA), а для корегування режиму TDMA використовується ресурс спадного (прямого) інформаційного каналу. При цьому спадний (прямий) та висхідний (зворотний) канали можуть підтримувати різні стандарти, а кількість блоків демодуляції головної приймальної станції (ПС) ЦС визначається кількістю мереж зворотних каналів, кожна з яких займає одну частоту і режими функціонування системи реалізуються при асинхронній роботі передавальних термінальних станцій (ТС) абонентів.

Недоліками дійсного аналогу є:

- система функціонує в ліцензійному і вичерпаному частотному діапазоні
- пропускна здатність прямого та зворотного каналів не дозволяє реалізувати широкопasmовий доступ до інформаційних ресурсів
- використаний в системі вид модуляції потребує реалізації режиму прямої видимості між антенами ЦС та АС, що потребує значного збільшення вартості створюваної мережі, а іноді і не можливе.

В «Мікрохвильовій інтегрованій телерадіоінформаційній системі мультисервісного радіодоступу з підвищеною пропускною здатністю UMDS-K» яка складається із центральної та абонентської станції, причому центральна станція

містить принаймні один передавально-приймальний ствол, що включає в себе передавач, вихід якого через дуплексер підключений до антени, та приймальний тракт, вхід якого через дуплексер підключений до антени, вихід до блока подільника, а абонентська станція містить приймально-передавальну антену, яка послідовно з'єднана із зовнішнім та внутрішнім, до складу системи в статусі абонентської станції введена базова станція Wi-Fi, що з'єднана з внутрішнім блоком і забезпечує доступ локальної мережі по стандарту IEEE 802.11, а до складу ЦС додатково введена апаратура системи приймання зворотного (від АС) каналу із доступом по FDMA в складі секторна антена, лінійний тракт, демодулятор зворотного каналу, маршрутизатор (роутер) чи комутатор, до складу АС додатково введено технічні засоби системи формування та передавання зворотного каналу (від АС до ЦС) по FDMA в складі модулятора транспортного потоку, роутера АС, лінійного тракту.

Така система, вибрана в якості прототипу, дозволяє дещо підвищити пропускну здатність зворотного каналу за рахунок розширення використовуваної смуги пропускання каналу. Проте недоліками є:

- збільшення пропускну здатності не достатнє для реалізації широкосмугового доступу;
- введення до складу АС базової станції Wi-Fi не дозволяє надання послуг прийнятній кількості абонентів, не підключених проводимим каналом;
- використання ліцензійного частотного ресурсу в цій системі також не вирішує проблеми функціонування в вільному частотному діапазоні;
- проблеми із реалізацією режиму прямої видимості залишаються і системі прототипу.

Задачею дійсного технічного рішення є створення на базі центральної станції системи-прототипу UMDS-K [107] центральної станції, що дозволяє надавати в зону обслуговування послуги широкосмугового доступу до інформаційних ресурсів та послуг передачі даних при реалізації потрібної щільності дислокації абонентів, і системи, на базі якої реалізується розгортання зони обслуговування (ЗО) досить значних розмірів, достатніх для обслуговування абонентів в масштабі країни. Тобто в технічних рішеннях [107] підвищення швидкості пропонується за рахунок

використання модуляції із більш високою позиційністю в прямому та зворотному доступу по зворотному каналу (FDMA замість TDMA). Але в цілому проблема не вирішується (втрачається дальність, з'являється потреба в суттєвому підвищенні енергетики каналу та зменшується число підключених абонентів).

Система запропонована дійсним технічним рішенням функціонує в вільному і неліцензійному частотному діапазоні (наприклад, в терагерцовому) і не є критичною до реалізації режиму прямої видимості. Прийнятна ефективність системи реалізується, коли в прямому та зворотному каналах надається швидкість передачі, що відповідає умові широкосмугового доступу.

В дійсному технічному рішенні пропонується створення приймально-передавального обладнання центральної станції (ЦС) на базі стандарту 802.11n. Такий засіб – формувач та канал передачі відображені в технічних рішеннях [108] та [109].

Задачею даної корисної моделі є створення на базі системи-прототипу UMDS-K технічного рішення, що дозволяє створити опорну мережу, яка надає можливість реалізувати доступ абонентських комп'ютерів до зовнішніх інформаційних мереж. Ці комп'ютери та локальні мережі можуть бути віддаленими та дистанційно рознесені і повинні мати доступ до інформаційних ресурсів зовнішніх мереж, використовуючи каналний ресурс системи. Мережа абонентська комп'ютерів підключається до безпроводової локальної мережі яка створюється засобами точки доступу, дислокованої в абонентській станції мережі на базі запропонованої дійсним технічним рішенням системи UMDS-TH. При цьому передбачається використання неліцензійного (безоплатного) частотного діапазону в каналах мережі *backhaul*, що понижує вартість послуг, спрощує процедуру отримання дозволу та знімає дефіцит частотного ресурсу.

Рішення цієї проблеми особливо важливе в умовах слаборозвинутої комунікаційної інфраструктури (наприклад, підключення до Інтернет абонентів в сільських регіонах, де кількість телефонних каналів мала, а якість їх вкрай низька, крім того зв'язок з сервером провайдера доводиться підтримувати по каналам міжміського зв'язку).

До відмінних від прототипу ознак запропонованої системи UMDS -TH відноситься використання в якості засобів передавання інформації по запити АС та приймання запити АС створеного приймально-передавального формувача інформаційного потоку [109] для каналу зв'язку із підвищеною спектральною ефективністю та пропускною здатністю, який реалізує наступні характеристики:

В блоці формувача використовуються технічні рішення, що базуються на елементах в вигляді чіпу, що масово випускаються в серійному виробництві і використовуються в мережах Wi-Fi. Це, наприклад, блок модуляторів - демодуляторів Mikrotik R52nM, який дозволяє отримати швидкість у прямому та зворотному каналах до 150Мбіт/с. Вхід передавальної та вихід приймальної схеми в складі даного чіпу – бітовий потік в форматі Ethernet, а вихід передавальної та вхід приймальної схеми в складі даного чіпу – символний потік на частоті в діапазоні біля 2 або 5 ГГц. Модуляція та демодуляція може програмно перебудовуватися від BPSK до QAM-64. Смуга отриманого сигналу складає 40 МГц. При цьому швидкість в каналі зв'язку складає 150Мбіт/с.

Підвищення спектральної ефективності досягається використанням багатопозиційної модуляції (QAM-64). Подальше підвищення швидкості в каналі зв'язку досягається створенням блоку, що виконує кодування та модуляцію потоку в форматі Ethernet із розподілом по суміжних частотних смугах та об'єднанні їх в загальний багаточастотний потік в передавальній частині та розподілу по вихідних частотних смугах із подальшою їх демодуляцією, маршрутизацією та формуванням Ethernet інтерфейсу в приймальній частині.

Для забезпечення потрібного значення швидкості інформаційного потоку приймальна та передавальна складові частини створюються на базі однакових чіпів Mikrotik R52nM, кожен із яких може забезпечити як приймання, так і передачу. Формат кожного складового інформаційного потоку: стандарт 802.11n. Результуюча (сумарна) швидкість при створенні восьми частотних потоків при модуляції QAM-64 складе 1200Мбіт/с в кожному напрямку. Для зниження можливої інтерференції вибирається рознесення смуг величиною від 2,5МГц. Сумарна смуга із врахуванням захисних частотних інтервалів (ширини смуги фільтрів, що обмежують смугу

кожного потоку) складе до 400МГц.В цьому випадку і в передавальному і в приймальному трактах використовуються по вісім чіпів Mikrotik R52nM.

Приймально-передавальний формувач, що складається із приймального та передавального трактів, відрізняється тим, що до його складу введено n приймально-передавальних блоків в форматі чіпа, в передавальній частині якого є кодер, модулятор, підвищуючий частотний конвертор, за допомогою яких формується n окремих частотно рознесених потоків, які об'єднуються в загальний інформаційний потік, а приймальна частина включає декодер, демодулятор, понижуючий частотний конвертор, кожен із n приймальних блоків підключаються до частотного розгалужувача прийнятого загального інформаційного потоку.

Таке технічне рішення дозволяє створення каналу зв'язку в необхідному терагерцовому частотному діапазоні, наприклад, методом гетеродинного перетворення до потрібного рівня, в тому числі до 140ГГц і вище .

При використанні в каналах мережі backhaul терагерцового частотного діапазону в формувачі, що використовується в системі, мультиплексування складових несучих виконується в терагерцовому діапазоні, а число несучих визначається по результатам дослідження зони обслуговування. Введення лінійного тракту в кожен модифікований мультиплекс дозволяє суттєво підвищити енергетику каналу, а, значить, і дальність зв'язку ,тобто розмір території обслуговування.

Створення мультиплексів меншого розміру ніж сумарний, що доводиться до абонента, дозволяє підвищити ефективність використання наданого інформаційного ресурсу.

Оскільки сигнал міліметрового та субміліметрового діапазону при розповсюдженні в ефірі підлягає впливу значних втрат, то антени, що підключаються до лінійних трактів на стороні передачі і приймання мають значення направленості порядку 50дБ. Тобто кут розкриву діаграми спрямованості складе біля 10...20. І при використанні окремих антен для кожного мультиплексу і при на співпаданні напрямку їх спрямованості сумарна територія покриття може бути збільшена на величину до двох раз.

Тобто при використанні 8 окремих потоків кут зони покриття може бути збільшений в порівнянні із випадком використання однієї антени в 16 раз. І кут покриття складе біля 200 при куті покриття однією антеною біля 1.50.

Для покриття території в 3600 при мінімізації частотного ресурсу знадобиться 8 секторів (кут покриття кожним сектором – 450) і число потрібних піднесучих в кожному секторі при обслуговуванні кожною піднесучою одного вузла доступу (надання доступу зі швидкістю в 150Мбіт/с) – 8...9.

Абонентська станція (АС) складається із приймально-передавальної антени, лінійних трактів та вузла доступу в потрібній конфігурації.

Система працює наступним чином:

Запит від абонентського комп'ютера, підключеного до безпроводової локальної мережі, створеної вузлом доступу, поступає на вузол доступу, який є частиною каналу мережі backhaul, і по передавальному лінійному тракту в форматі Wi-Fi-802.11n на вхід антени АС, якою випромінюється на трасу розповсюдження. Прийнятий приймальною антеною ЦС сигнал в форматі Ethernet поступає до маршрутизатора ЦС і по зовнішньому каналу передачі передається до сервера операторської станції магістральної інформаційної мережі.

Інформаційний потік від стації магістральної мережі по каналу високої пропускної здатності в форматі Ethernet поступає цифровий вхід формувача, де із подальшим перетворенням по зворотному перетворенню Фур'є, кодуванням, модуляцією в вигляді потоків частотою 2,5ГГц

поступає в передавальний лінійний тракт формувача і затим на вхід передавального лінійного тракту, де сигнал переноситься в терагерцовий діапазон (наприклад в 140ГГц) і підсилюється (потужність може сягати до 5...10Вт).

Після проходження до антени сигнал випромінюється і після прийому антеною АС поступає на вхід приймального тракту АС і на вхід точки доступу, звідки по локальній мережі поступає на вхід комп'ютера, із якого посланий запит.

4.4 Методи і процедури первинної обробки значень параметрів телекомунікаційної мережі

4.4.1 Актуальність задачі

Однією з важливих задач моніторингу телекомунікаційної мережі є діагностика характеристик мережевого трафіку з метою аналізу стану всієї мережі. В свою чергу, аналіз інформації про те, в якому стані знаходиться мережа в цілому, які поточні процеси, та, можливо, аномалії відбуваються при роботі каналів зв'язку і яким законам вони підпорядковуються, дозволяє перейти до практичної модифікації телекомунікаційної мережі, розподілу навантаження по каналах, запобіганню збоїв в телекомунікаційній мережі. В даний час подібні завдання вирішуються за допомогою різних протоколів для управління телекомунікаційним обладнанням з використанням суб'єктивних методів системного адміністрування.

4.4.2 Методи первинної обробки значень параметрів телекомунікаційної мережі

На практиці застосовуються два сімейства стандартів управління мережами – стандарти Internet, побудовані на основі протоколу SNMP (Simple Network Management Protocol – простий протокол управління мережею) та міжнародні стандарти ISO/ITU-T, що використовують для взаємодії агентів і менеджерів протокол CMIP (Common Management Information Protocol – протокол загальної керуючої інформації) [111-114].

Завданням адміністрування сучасної великої телекомунікаційної мережі є не тільки забезпечення «потреб» користувачів, підключення нових робочих станцій і заповнення таблиць маршрутизації, але й одержання інформації про мережу на глобальному рівні в цілях накопичення статистики та управління трафіком. Для успішного адміністрування мережі необхідно знати стан кожного її елемента і мати можливість змінювати параметри його функціонування. Зазвичай мережа складається

з пристроїв різних виробників і керувати нею було б неможливо, якби кожен з мережевих пристроїв розумів тільки свою систему команд. Внаслідок цього виникла необхідність у використанні єдиної мови управління мережевими ресурсами, яку б розуміли всі пристрої, і яка, в силу цього, використовувався б усіма пакетами управління мережею для взаємодії з конкретними пристроями.

Подібною мовою стала SNMP – Simple Network Management Protocol. Розроблена для систем, орієнтованих під операційну систему UNIX, вона стала фактично загальноприйнятим стандартом мережевих систем управління та підтримується переважною більшістю виробників мережевого устаткування в своїх продуктах.

В силу своєї назви – Простий Протокол Мережевого Управління – вона максимально проста в реалізації. Це протокол, що включає мінімальний набір команд, але дозволяє виконувати практично весь спектр завдань управління мережевими пристроями - від отримання інформації про місцезнаходження конкретного пристрою, до можливості виробляти його тестування. Основною концепцією протоколу є те, що вся необхідна для управління пристроєм інформація зберігається на самому пристрої - будь то сервер, модем або маршрутизатор – в так званій Адміністративній Базі Даних (MIB – Management Information Base). MIB являє собою набір змінних, що характеризують стан об'єкта управління. Ці змінні можуть відображати такі параметри, як кількість пакетів, оброблених пристроєм, стан його інтерфейсів, час функціонування пристрою і т.п. Кожен виробник мережевого устаткування, крім стандартних змінних, включає в MIB які-небудь параметри, специфічні для даного пристрою. Однак при цьому не порушується принцип представлення та доступу до адміністративної інформації - всі вони будуть змінними в MIB. Тому SNMP як безпосередньо мережевий протокол надає тільки набір команд для роботи з перемінними MIB.

Для того, щоб проконтролювати роботу деякого пристрою мережі, необхідно просто отримати доступ до його MIB, яка постійно оновлюється самим пристроєм, і проаналізувати значення деяких змінних.

Важливою особливістю протоколу SNMP є те, що в ньому не містяться конкретні команди управління пристроєм. Замість визначення всього можливого спектру таких команд, які безумовно перевантажили б сам протокол, який вважається все-таки простим, визначені змінні MIB, перемикання яких сприймається пристроєм як вказівка виконати деяку команду.

Таким чином, вдається зберегти простоту протоколу, але разом з цим зробити його досить потужним засобом, що дає можливість стандартним чином задавати набори команд управління мережевими пристроями. Завдання забезпечення виконання команд складається, таким чином, з реєстрації спеціальних змінних MIB і реакції пристрою на їх зміни.

За своєю структурою MIB являє собою дерево, зображене на рисунку 4.3.

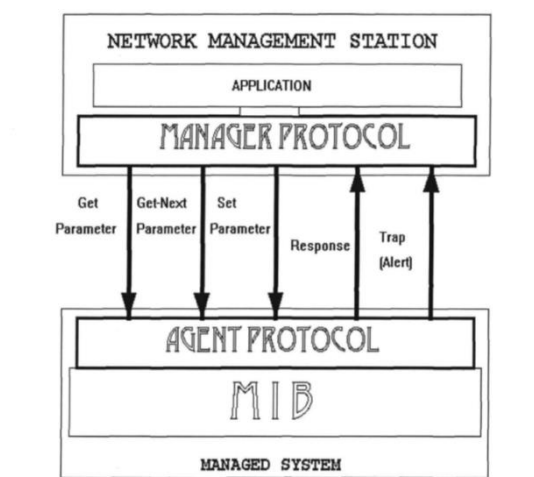


Рис. 4.3 Структура MIB

Кожному елементу відповідає чисельний і символічний ідентифікатор. В ім'я змінної включається повний шлях до неї від кореневого елемента root. Наприклад, час роботи пристрою з моменту перезавантаження зберігається у змінній, що знаходиться в розділі system під номером 3 і називається sysUpTime. Відповідно, ім'я змінної включатиме весь шлях: iso (1) .org (3) .dod (6) .internet (1) .mgmt (2) .mib- 2 (1) .system (1) .sysUpTime (3) ; або мовою чисел: 1.3.6.1.2.1.1.3. Слід зауважити, що при цьому вузли дерева поділяються точками.

4.4.3 Процедури збору інформації про роботу телекомунікаційної мережі

Для аналізу мережевого трафіку з листопада 2000 року на сервері spb.runnet.ru системним адміністратором мережі RUNNet здійснювався збір даних за допомогою протоколу SNMP. На сервері використовувалися такі технології передачі даних як: ATM 1/0, FastEthernet1 / 0, FastEthernet 4/0 (1 і 4 - умовні номери 2-х різних каналів, що істотно відрізняються об'ємом завантажень). Розглянемо технології збору первинної інформації про функціонування телекомунікаційної мережі докладніше [111].

Дані про функціонування телекомунікаційної мережі реєструвалися за допомогою чотирьохбайтового лічильника з інтервалом 5 хв. Для аналізу були визначені наступні характеристики:

- завантаження каналу на вході і виході (байт); число пакетів на вході і виході; число помилок в їх реєстрації; загрузка процесора (% від 100);
- обсяг вільної пам'яті процесора і системи введення-виведення для маршрутизатора (байт);
- збір та реєстрація параметрів телекомунікаційної мережі здійснювалися протягом тривалого періоду часу за допомогою чотирьохбайтових лічильників, при переповненні лічильників відбувалося їх обнуління (або скидання), це призводило до пилкоподібний в уявленні значень параметрів телекомунікаційної мережі і не дозволяло безпосередньо використовувати відомі методи статистичної обробки інформації.

В Таблиці 4.1 представлений фрагмент отриманих первинних значень для різних телекомунікаційних технологій.

Таблиця 4.1

Фрагмент первинних значень

Час, с	Завантаження каналу інтерфейсу в байтах		
	ATM 1/0	FastEthernet 0/0	FastEthernet 0/0 4/0

Продовження Таблиці 4.1

972679200	0	0	0
972679500	2295814400	1591956794	4292426841
972679800	2845509618	1847131537	23553383
972680100	3362825219	2065629362	56449704
972680400	3861342029	2248183765	92505895
972680700	44955162	2454219679	127426756
972681000	504745715	2603268793	160571793
972681300	991229953	2768885858	191229552
72681600	1467868509	2943932422	221035042
972681900	1934793959	3118191498	252665332
972682200	2405304536	3277795544	283981824
972682500	2866122697	3445428635	316374364
972682800	3351797421	3634525866	351033268
972683100	3796589541	3820092939	387842305

Пропонуються дві процедури обробки даних, що дозволяють усунути це обмеження. Подальший вибір процедури визначатиметься набором кінцевих характеристик, що відбивають поведінку аналізованих випадкових послідовностей і спостерігається частоти «обнулення». Як видно з представленої Таблиці 4.1, перший стовпець є часом, представленим лічильником і виражений в секундах. Для подальшого аналізу найкраще прив'язати час лічильника до реального часу для з'ясування з експертами та адміністратором що відбуваються і подальшої інтерпретації отриманих результатів. Для зручності введемо поняття дискретного моменту часу $t_j = j \cdot \Delta$, де Δ інтервал між окремими спостереженнями (в даному випадку Δ одно 5 хв.), А ціле число J змінюється від 1 до N .

4.4.4 Визначення особливостей процесу статистичного моніторингу характеристик телекомунікаційної мережі

За допомогою описаної вище процедури перетворення даних з накопичувального типу в випадкову послідовність були представлені інші характеристики мережевого трафіку. Нижче представлені графіки (Рис. 4.4, Рис. 4.5, Рис.4.6, Рис.4.7) надходження інформації для таких характеристик як завантаження каналів на вході інтерфейсів ATM, FastEthernet 1/0, FastEthernet 4/0 та завантаження процесора.

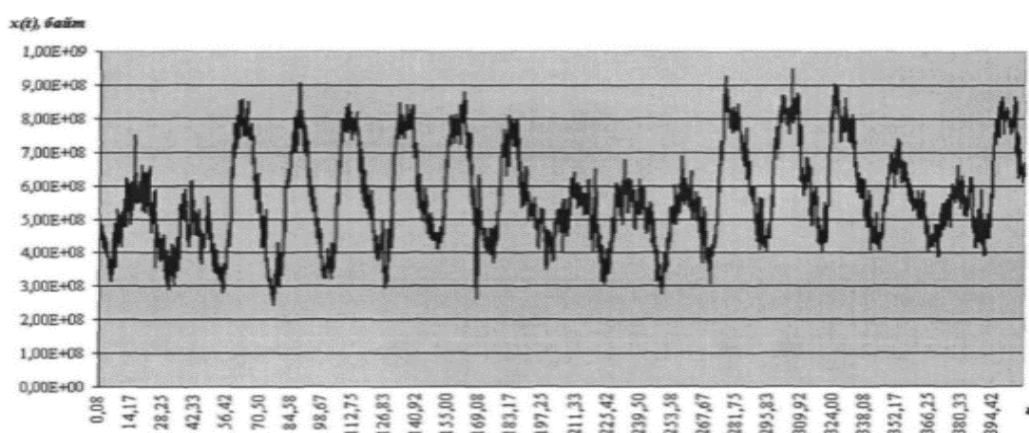


Рис. 4.4 Динаміка завантаження каналу на вході інтерфейсу ATM кількість інформації, яка прийшла по 5 хв.

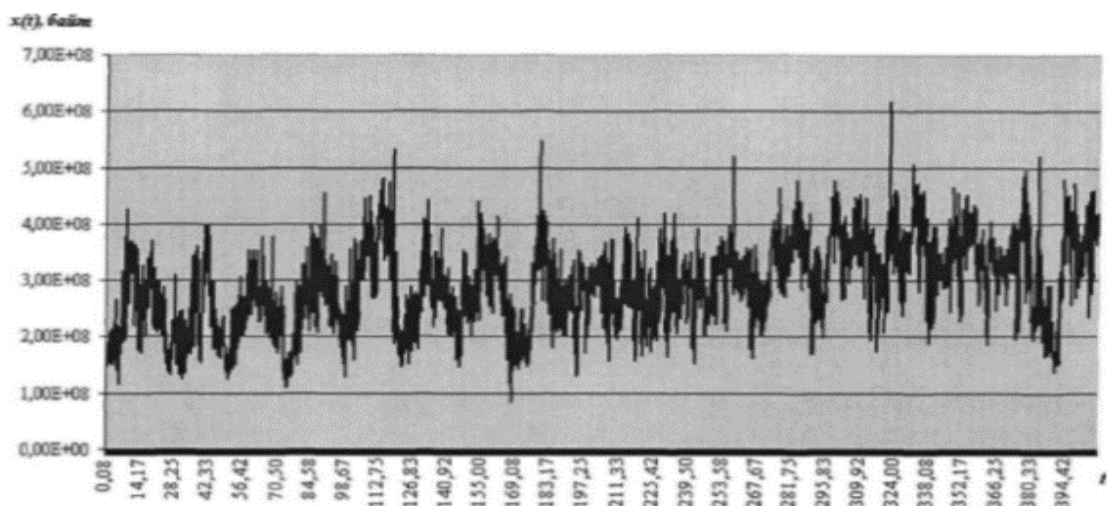


Рис. 4.5 Динаміка завантаження каналу на вході інтерфейсу FastEthernet 1/0 (кількість інформації, яка прийшла по 5 хв.)

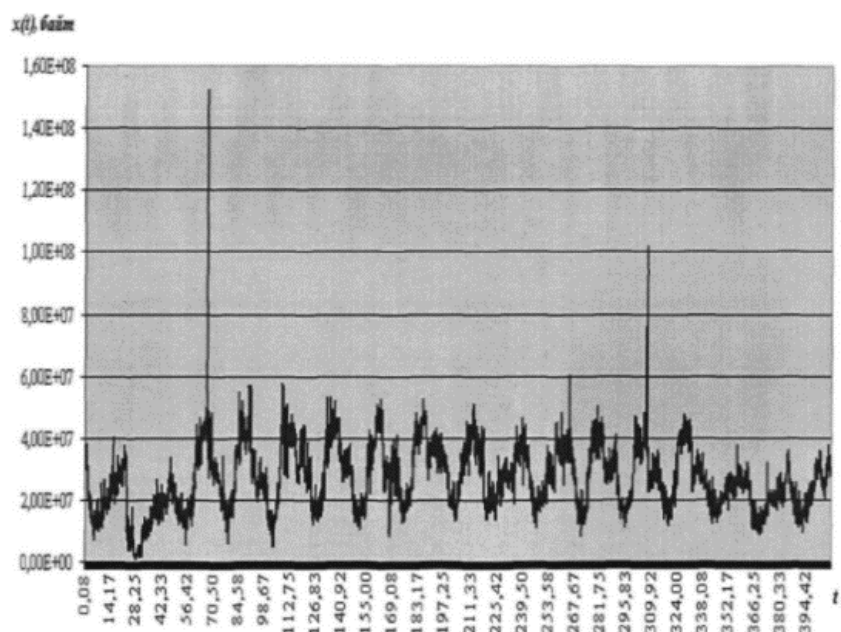


Рис.4.6 Динаміка завантаження каналу на вході інтерфейсу FastEthernet 4/0
(кількість інформації, яка прийшла по 5 хв.)

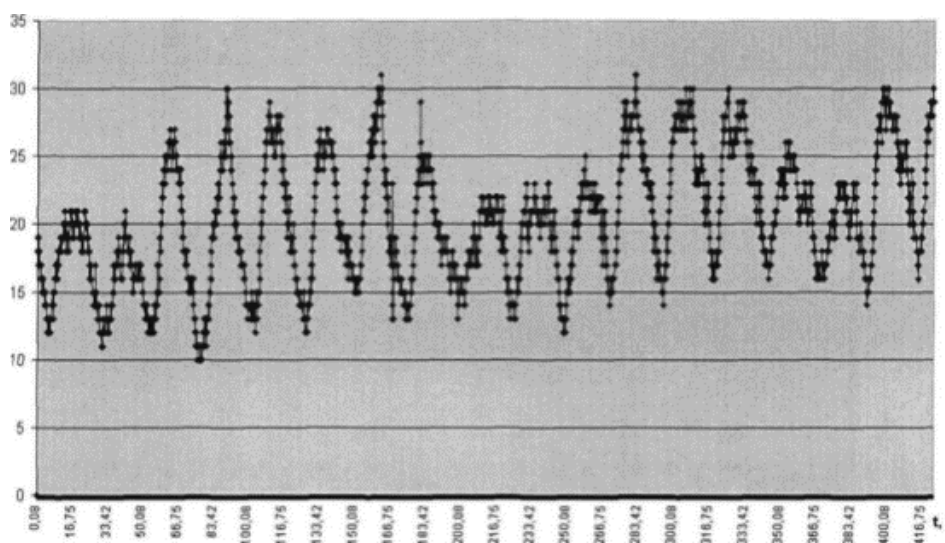


Рис.4.7 Завантаження процесора

Як видно з представлених графіків (Рис. 4.4 - 4.7), можна виділити основні особливості статистичного моніторингу телекомунікаційної мережі:

нестационарність;

неоднорідність;

періодичність (нерівномірність завантаження каналів); складна форма періодичного сигналу; форми сигналів ближче до трапецієподібним з явно

вираженим «плато» в області максимальних завантажень; кількість шумів (явно випадуючих точок) більше при максимальних завантаженнях.

З вищевказаних характеристик телекомунікаційної мережі особливо можна виділити найбільш інформативний параметр - завантаження каналу. Завантаження каналів безпосередньо впливає на стабільність і надійність каналів зв'язку. Надалі під аналізом мережевого трафіку, будемо розуміти обсяг інформації проходить по каналу зв'язку, тобто завантаження каналу за певну одиницю часу завантаження каналів (байт)

У відповідність технології збору інформації та природи вимірюваних характеристик, реєстровані значення утворюють випадкові часові ряди з інтервалом дискретизації, рівним 5 хв. Нижче буде показано, що адекватним математичним апаратам для аналізу параметрів функціонування телекомунікаційної мережі є статистичний аналіз часових рядів. Однак через перераховані вище особливостей не можна безпосередньо використовувати класичні методи аналізу часових рядів. Важлива умова застосування цих методів - стаціонарність часового ряду. Як відомо, процес називається стаціонарним, якщо його властивості не змінюються в часі. Зокрема, він має постійне математичне сподівання, постійну дисперсію, визначальну розмах його коливань щодо середнього значення [11-114]. Для виконання даної умови необхідно скористатися евристичними методами аналізу.

4.4.5 Моделювання часових рядів

Моделювання різних складових, що характеризують роботу мережі, таких, як обсяг трафіку, кількість втрачених пакетів і ін. [111] у вигляді часових рядів має ряд очевидних переваг у порівнянні з вищеописаними способами. При побудові моделі часових рядів використовується експериментальна інформація (отримана в реально функціонуючої мережі), потрібно менше припущень і, отже, більш адекватно відображається реальний об'єкт, тобто телекомунікаційна мережа. Математична модель описує потік інформації в залежності від моменту T .

Ряд моделей, побудованих на сучасних частково евристичних методах і запропонованих у даній роботі для дослідження та аналізу функціонування телекомунікаційних мереж, буде розглянуто нижче.

Статистичні моделі телекомунікаційних мереж у вигляді часових рядів, на наш погляд, найбільш достовірні, оскільки засновані на великому числі експериментальних даних, а, отже, є і найбільш інформативними для прогнозу стану мережі.

4.4.6 Аналіз тренду

Не існує «автоматичного» способу виявлення тренда в часовому ряді. Однак якщо тренд є монотонним (стійко зростає або стійко убиває), то аналізувати такий ряд звичайно неважко. Якщо часові ряди містять значну помилку, то першим кроком виділення тренда є згладжування.

Згладжування завжди включає деякий спосіб локального усереднення даних, при якому несистематичні компоненти взаємно погашають один одного. Найбільший загальний метод згладжування - ковзне середнє, в якому кожен член ряду замінюється простим або зваженим середнім n сусідніх членів, де n - ширина "вікна" (див. Бокс і Дженкінс, 1976; Velleman and Hoaglin, 1981). Замість середнього можна використовувати медіану значень, що потрапили у вікно. Основна перевага медіанного згладжування, в порівнянні зі згладжуванням ковзним середнім, полягає в тому, що результати стають більш стійкими до викидів (наявним всередині вікна).

Таким чином, якщо в даних є викиди (пов'язані, наприклад, з помилками вимірів), то згладжування медіаною зазвичай призводить до більш гладким або, принаймні, більш «надійним» кривим, порівняно з ковзаючим середнім з тим же самим вікном. Основний недолік медіанного згладжування в тому, що за відсутності явних викидів, він призводить до більш "зубчастим" кривим (чим згладжування ковзним середнім) і не дозволяє використовувати ваги.

Щодо рідше, коли помилка виміру дуже велика, використовується метод згладжування методом найменших квадратів, зважених щодо відстані або метод

негативного експоненціально зваженого згладжування. Всі ці методи відфільтровують шум і перетворюють дані у відносно гладку криву. Ряди з відносно невеликою кількістю спостережень і систематичним розташуванням точок можуть бути згладжені за допомогою Бікубичнихсплайнов.

Багато монотонні часові ряди можна добре наблизити лінійною функцією. Якщо ж мається явна монотонна нелінійна компонента, то дані спочатку слід перетворити, щоб усунути нелінійність. Зазвичай для цього використовують логарифмічне, експоненціальне або (менш часто) поліноміальное перетворення даних.

4.4.7 Аналіз сезонності

Періодична і сезонна залежність (сезонність) являє собою інший загальний тип компонент часового ряду. Можна легко бачити, що кожне спостереження дуже схоже на сусіднє; додатково, мається повторювана сезонна складова, це означає, що кожне спостереження також схоже на спостереження, що були в тому ж самому місяці рік тому. Загалом, періодична залежність може бути формально визначена як кореляційна залежність порядку k між кожним i -м елементом ряду і $(i-k)$ -м елементом (Kendall, 1976). Її можна виміряти за допомогою автокореляції (тобто кореляції між самими членами ряду); k зазвичай називають лагом (іноді використовують еквівалентні терміни: зрушення, запізнювання). Якщо помилка виміру не надто велика, то сезонність можна визначити візуально, розглядаючи поведінку членів ряду через кожні k тимчасових одиниць.

Сезонні складові часового ряду можуть бути знайдені за допомогою коррелограми. Коррелограми (автокоррелограма) показує чисельно і графічно автокорреляциону функцію (АКФ), іншими словами коефіцієнти автокореляції (і їх стандартні помилки) для послідовності лагів з певного діапазону (наприклад, від 1 до 30). На коррелограмі звичайно відзначається діапазон в розмірі двох стандартних помилок на кожному лазі, проте зазвичай величина автокореляції більш цікава, ніж її

надійність, тому що інтерес в основному представляють дуже сильні (а, отже, високо значущі) автокорреляції.

При вивченні коррелограми слід пам'ятати, що автокорреляції послідовних лагів формально залежні між собою. Розглянемо наступний приклад. Якщо перший член ряду тісно пов'язаний з другим, а другий з третім, то перший елемент повинен також якимось чином залежати від третього і т.д. Це призводить до того, що періодична залежність може істотно змінитися після видалення автокорреляцій першого порядку, тобто після взяття різниці з лагом 1.

Інший корисний метод дослідження періодичності полягає в дослідженні приватної автокорреляційної функції (ПАКФ), що представляє собою поглиблення поняття звичайної автокорреляційної функції. В ПАКФ усувається залежність між проміжними спостереженнями (спостереженнями всередині лага). Іншими словами, приватна автокорреляція на даному лагу аналогічна звичайній автокорреляції, за винятком того, що при обчисленні з неї віддаляється вплив автокорреляцій з меншими лагами (см. Бокс і Дженкінс, 1976; див. Також McDowall, McCleary, Meidinger, and Nau, 1980). На лагу 1 (коли немає проміжних елементів усередині лага), приватна автокорреляція дорівнює, очевидно, звичайною автокорреляції. Насправді, приватна автокорреляція дає більш "чисту" картину періодичних залежностей.

Як зазначалося вище, періодична складова для даного лага k може бути видалена взяттям різниці відповідного порядку. Це означає, що з кожного g -го елемента ряду віднімається $(g-k)$ -й елемент. Є два доводи на користь таких перетворень.

По-перше, таким чином можна визначити приховані періодичні складові ряду. Нагадаємо, що автокорреляції на послідовних лагах залежні. Тому видалення деяких автокорреляцій змінить інші автокорреляції, які, можливо, домінували над ними, і зробить деякі інші сезонні складові більш помітними.

По-друге, видалення сезонних складових робить ряд стаціонарним, що необхідно для застосування АРПСС та інших методів, наприклад, спектрального аналізу.

4.4.8 Модель АРПСС

Загальна модель, запропонована Боксом і Дженкінсом (1976) включає як параметри авторегресії, так і параметри змінного середнього. Саме, є три типи параметрів моделі: параметри авторегресії (p), порядок різниці (d), параметри змінного середнього (q). В позначеннях Боксу і Дженкінса модель записується як АРПСС (p, d, q). Як зазначено раніше, для моделі АРПСС необхідно, щоб ряд був стаціонарним, це означає, що його середнє постійно, а вибірккові дисперсія і автокорреляція не змінюються в часі.

Тому зазвичай необхідно брати різниці ряду доти, поки він не стане стаціонарним (часто також застосовують логарифмічне перетворення для стабілізації дисперсії). Число різниць, які були взяті, щоб досягти стаціонарності, визначаються параметром d . Для того, щоб визначити необхідний порядок різниці, потрібно досліджувати графік ряду і автокоррелограму.

Сильні зміни рівня (сильні скачки вгору або вниз) зазвичай вимагають взяття несезонного різниці першого порядку (лаг = 1). Сильні зміни нахилу вимагають взяття різниці другого порядку.

Сезонна складова вимагає взяття відповідної сезонної різниці (см. Нижче). Якщо мається повільне спадання вибірккових коефіцієнтів автокорреляції в залежності від лага, зазвичай беруть різницю першого порядку. Однак слід пам'ятати, що для деяких часових рядів потрібно брати різниці невеликого порядку або зовсім не брати їх. Зауважимо, що надмірна кількість взятих різниць призводить до менш стабільним оцінками коефіцієнтів.

На цьому етапі (який зазвичай називають ідентифікацією порядку моделі) необхідно вирішити, як багато параметрів авторегресії (p) і змінного середнього (q) повинна бути присутньою в ефективною і економною моделі процесу. (Економність моделі означає, що в ній є найменше число параметрів і найбільше число ступенів свободи серед всіх моделей, які підганяються до даних). На практиці дуже рідко буває, що число параметрів p або q більше 2.

Наступний, після ідентифікації, крок (Оцінювання) складається в оцінюванні параметрів моделі (для чого використовуються процедури мінімізації функції втрат. Отримані оцінки параметрів використовуються на останньому етапі {Прогноз) для того, щоб обчислити нові значення ряду і побудувати довірчий інтервал для прогнозу. Процес оцінювання проводиться по перетвореним даними (підданим застосуванню різностного оператора). До побудови прогнозу потрібно виконати зворотну операцію (інтегрувати дані). Таким чином, прогноз методології буде порівнюватися з відповідними вихідними даними. На інтегрування даних вказує буква Π в загальному назві моделі (АРПСС = **авторегресійнепроінтегроване змінено середнє**).

До того, як почати оцінювання, необхідно вирішити, який тип моделі буде підбиратися до даних, і яка кількість параметрів присутній в моделі, іншими словами, потрібно ідентифікувати модель АРПСС. Основними інструментами ідентифікації порядку моделі є графіки, автокореляційна функція (АКФ), приватна автокореляційна функція (ЧАКФ). Це рішення не є простим і потрібно ґрунтовно проекспериментувати з альтернативними моделями. Тим не менше, більшість зустрічаються на практиці часових рядів можна з достатнім ступенем точності апроксимувати однією з 5 основних моделей, які можна ідентифікувати по виду автокореляційної (АКФ) і приватної автокореляційної функції (ЧАКФ). Додаткові практичні методики дано в Hoff (1983), McCleary and Hay (1980), McDowall, McCleary, Meidinger, and Hay (1980), and Vandaele (1983).

Мультиплікативна сезонна АРПСС представляє природний розвиток і узагальнення звичайної моделі АРПСС на ряди, в яких мається періодична сезонна компонента. У доповненні до несезонним параметрам, в модель вводяться сезонні параметри для певного лага (встановлюваного на етапі ідентифікації порядку моделі). Аналогічно параметрам простої моделі АРПСС, ці параметри називаються: сезонна авторегресія (**ps**), сезонна різниця (**ds**) і сезонне ковзне середнє (**qs**). Таким чином, повна сезонна АРПСС може бути записана як АРПСС (**p, d, q**) (**ps, ds, qs**). Загальні рекомендації щодо вибору звичайних параметрів (за допомогою АКФ і ЧАКФ) повністю застосовні до сезонних моделями. Основна відмінність полягає в тому, що в сезонних рядах АКФ і ЧАКФ мають суттєві значення на лагах, кратних сезонному

лагу (в доповненні до характерного поведінки цих функцій, що описують регулярну (несезон) компоненту АРПСС).

4.4.9 Оцінювання параметрів

Існують різні методи оцінювання параметрів, які дають дуже схожі оцінки, але для даної моделі одні оцінки можуть бути ефективніші, а інші менш ефективні. Загалом, під час оцінювання порядку моделі використовується так званий квазіньютонівський алгоритм максимізації правдоподібності (вірогідності) спостереження значень ряду за значеннями параметрів. Практично це вимагає обчислення (умовних) сум квадратів залишків моделі. Є різні способи обчислення суми квадратів залишків SS'' ; можна вибрати: (1) наближений метод максимальної правдоподібності Маклеода і сейлз (1983), (2) наближений метод максимальної правдоподібності з ітераціями назад, (3) точний метод максимального правдоподібності по Меларду (1984).

Для всіх оцінок параметрів обчислюються так звані асимптотичні стандартні помилки, для обчислення яких використовується матриця приватних похідних другого порядку, що апроксимується кінцевими різницями.

Процедура оцінювання мінімізує (умовну) суму квадратів залишків моделі. Якщо модель не є адекватною, може трапитися так, що оцінки параметрів на якомусь кроці стануть неприйнятними - дуже великими (наприклад, не задовольняють умові стаціонарності). В такому випадку, SS буде приписано дуже велике значення (штрафне значення). Зазвичай це "змушує" ітераційний процес видалити параметри з неприпустимою областю. Проте в деяких випадках і ця стратегія може виявитися невдалою, і ви все одно побачите на екрані (під час процедури оцінювання) дуже великі значення SS на серії ітерацій. В таких випадках слід з обережністю оцінювати придатність моделі. Якщо модель містить багато параметрів і, можливо, мається інтервенція, то слід кілька разів випробувати процес оцінювання з різними початковими даними.

4.4.10 Оцінювання моделі

Якщо значення обчислюється t статистики не значимі, відповідні параметри в більшості випадків видаляються з моделі без збитку підгонки. Іншої звичайної заходом надійності моделі є порівняння прогнозу, побудованого за урізаному ряду з "відомими (вихідними) даними".

Однак якісна модель повинна не лише давати досить точний прогноз, але бути економною і мати незалежні залишки, що містять тільки шум без систематичних компонент (зокрема, АКФ залишків не повинна мати будь-якої періодичності). Тому необхідний всебічний аналіз залишків. Нормальною моделі є: (а) графік залишків та вивчення їх трендів, (б) перевірка АКФ залишків (на графіку АКФ зазвичай чітко видна періодичність).

Якщо залишки систематично розподілені (наприклад, негативні в першій частині ряду і приблизно рівні нуля у другій) або включають деяку періодичну компоненту, то це свідчить про неадекватність моделі. Аналіз залишків надзвичайно важливий і необхідний при аналізі часових рядів. Процедура оцінювання передбачає, що залишки не корельовані і нормально розподілені.

Слід нагадати, що модель АРПСС є підходящою лише для рядів, які є стаціонарними (середнє, дисперсія і автокореляція приблизно постійні в часі); для нестаціонарних рядів слід брати різниці. Рекомендується мати, як мінімум, 50 спостережень у файлі вихідних даних. Також передбачається, що параметри моделі постійні, тобто не змінюються в часі.

Висновки до розділу 4

1. Розроблений інноваційний спосіб і пристрій адаптивного вибору режимів роботи радіозасобів нового покоління в умовах складної заводої обстановки. На даний спосіб подано заявку на винахід.

2. Запропонована система широкопasmового безпроводового доступу, що складається із центральної та абонентської станцій, причому центральна станція

містить приймально-передавальні блоки, які підключені до маршрутизатора по інтерфейсу Ethernet для передачі в магістральну мережу запитного потоку чи приймання від інформаційної мережі інформації, яка передається до абонентських станцій по каналам мережі backhaul, а вихід передавального тракту і вхід приймального підключаються до передавальних та приймальних трактів відповідно, та блоків обробки сигналів на базі формувача центральної станції, який відрізняється від відомих тим, що приймально-передавальні блоки будуються на базі формувача інформаційного потоку, який містить n складових потоків згідно стандарту 802.11n, із яких створено m мультиплексів, що включають в себе приймальні та передавальні лінійні тракти, в яких реалізується перетворення частоти та підсилення потужності і до яких підключено m приймальних та m передавальних антен, які обслуговують наданням інформаційного ресурсу створеними формувачем мультиплексами відповідні ділянки зони покриття, а абонентські станції представляють собою вузли доступу WiFi, які створюють локальні комп'ютерні мережі, що обслуговуються відповідним мультиплексом і до яких підключені лінійні тракти та приймально-передавальні антени. Крім того, в розробленій системі мережа backhaul складається із каналів, де використовується неліцензійний частотний діапазон, а кількість секторів зони обслуговування та кількість каналів передачі визначається за результатами дослідження зони обслуговування.

3. Для вирішення завдань розробки наукових основ дослідження загальних властивостей і принципів функціонування мобільних телекомунікаційних систем і комп'ютерних мереж нового покоління, а також з метою розробки принципово нових методів аналізу, які спрямовано на поліпшення їх технічних характеристик і забезпечення контролю та діагностики розглянуто методи математичного моделювання, засновані на статистичних методах аналізу багатовимірних даних. Розглянуті особливості процесу статистичного моніторингу характеристик мобільної телекомунікаційної мережі. Проаналізовано методи аналізу сезонності та аналізу тренду. Розглянута методологія збору первинної інформації про телекомунікаційної мережі та процедури перетворення первинних значень характеристик телекомунікаційної мережі у часовий ряд і випадкову послідовність, що дозволяють

здійснювати безперервний моніторинг характеристик мобільної телекомунікаційної мережі статистичними методами.

ВИСНОВКИ

В результаті дисертаційних досліджень вирішена важлива науково-прикладна проблема щодо розрахунку моделей та методик підвищення ефективності функціонування самоорганізованих радіомереж.

В дисертації одержані такі основні наукові результати:

1. Вперше розроблено математичну модель розрахунку мобільності самоорганізованої бездротової мережі, яка дозволяє здійснювати порівняння децентралізованих мереж, побудованих на різних організаційно-технічних принципах за системним критерієм мобільності з урахуванням необхідної пропускної здатності і обсягу переданих повідомлень.

2. Вдосконалено методику оцінки зв'язності радіозасобів на основі технології SDR самоорганізованої мережі нової генерації, яка, на відміну від відомих, дозволяє здійснювати розрахунок дальності зв'язку точка-точка з урахуванням довільного переміщення.

3. Вдосконалено методику використання терагерцового діапазону для передачі інформаційного трафіку в радіосистемах, яка, на відміну від існуючих, враховує ефективність використання траси розповсюдження інформації в цифровому форматі.

4. Вперше розроблено методику оцінки щільності розподілення ймовірності пропускної здатності та живучості самоорганізованої мережі нової генерації.

5. Вдосконалено алгоритм маршрутизації самоорганізованих радіомереж, який, на відміну від відомих, дозволяє усунути перевантаженість мережі через постійну передачу даних.

6. Вперше розроблено методику з виконання вимірювання параметрів якості послуг фіксованого зв'язку методом випробування на реальному трафіку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сайко В.Г., Бреславский В.А., Лисенко Д.А., Плющ А.Г. Развитие широкополосных систем беспроводного доступа нового поколения: технико-экономический анализ // Телекомунікаційні та інформаційні технології. -- №4. – 2015. -- С.49-55.
2. Сайко В.Г., Бреславский В.А., Лисенко Д.А., Окснюк А.Г. Технико-экономический анализ динамики развития рынка мобильных услуг широкополосного доступа // Сучасний захист інформації. -- №4. – 2015. -- С.44-55.
3. Сайко В.Г., Бреславский В.А., Лисенко Д.А., Плющ А.Г. Анализ состояния и перспектив развития рынка услуг широкополосных систем беспроводного доступа // Зв'язок. -- №1. – 2016. -- с.20-23.
4. Інформаційні матеріали електронного видання TheInquirer// theinquirer.net
5. Інформаційні матеріали електронного видання Unstrung // unstrung.com.
6. Тихвинский В.О., Терентьев С.В. Управление и качество услуг в сетях GPRS/UMTS м.: Эко-Трендз, 2007. - 400с.
7. Тихвинский В.О., Володина Е.Е. Подвижная связь третьего поколения: экономика и качество услуг. М.: Радио и связь, 2005.
8. Теорія і практика управління використанням радіочастотного ресурсу. Навчальний посібник / Слободянюк П.В., Сайко В.Г., Наритник Т.М., Благодарний В.Г./ К.: ДУІКТ, 2012.—596 с.
9. Сайко В.Г. Системи та мережі цифрового радіозв'язку: інженерно-технічний довідник/ Сайко В.Г., Олійник В.Ф., Кривуца В.Г./ -- Ніжин: ТОВ «Видавництво «Аспект-Поліграф», 2011. – 612.
10. Скрынников В.Г. Радиосистемы UMTS/LTE. Теория и практика. – М.: Издательство «Спорт и Культура -- 2000», 2012. – 864 с.
11. Сайко В.Г. Системи бездротового цифрового радіозв'язку нового покоління: монографія. / В.Г. Сайко. - К.: ПП “Золоті ворота”, 2011.-300 с.

12. Гольдштейн Б.С., Кучерявый А.Е. Сети связи пост- NGN. – СПб.: БХВ - Петербург, 2014. – 160с.
13. Тихвинский В.О. MWC-15: Поиск границ мобильных инноваций // Электросвязь. – 2015. -- № 4. – с. 32-34.
14. Тихвинский В.О., Архипкин В.Я. LTE World Summit-2013: На пути к 5G // Электросвязь. – 2013. --№ 7.
15. Rehan M.M., Morsi R.A., ElNaggar A. Technical analysis on future challenges and opportunities in live P2P streaming // Proc. of the 2014 International Conference on Engineering and Technology (ICET). – 2014. – Pp. 1-5.
16. *Yi-Cheng Tu, Jianzhong Sun, Mohamed Hefeeda, Sunil Prabhakar. An Analytical Study of Peer-to-Peer Media Streaming Systems // in Proc. ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications and Applications. – 2005. – Vol. 1. – № 4. – P. 354-376.*
17. Самоорганизующиеся радиосети со сверхширокополосными сигналами: Монография / [Ильченко М.Е., Бунин С.Г., Войтер А.П., Романюк В.А.] – К.: НПП Издательство “Наукова думка” НАН Украины. – 2013.
18. Рихтер С.Г. Обеспечение мобильного приема на физическом уровне // T-Comm/ -- 2012/ --№ 10.
19. Рихтер С.Г., Смирнов А.В. Оценка скорости абонента системы MobileWiMAX // T- Comm/ -- 2013. --№ 9.
20. ETSI TR 102 377 v.1.4.1(2009-06). Digital Video Broadcasting (DVB): DVB-H Implementation Quidelines.
21. Розанов Ю.А. Теория вероятностей, случайные процессы и математическая статистика. – М.: Наука, 1989.
22. Мальцев А.А., Рубцов А.Е. Исследование характеристик OFDM систем радиосвязи с адекватным отключением поднесущих // вестник ННТУ им. Н.И. Лобачевского. – 2007. -- № 5, с.43-49.
23. Сайко В.Г. Дослідження характеристик завмирань багатопроменевого сигналу на основі подвійного вейвлет-аналізу // Зв’язок. – 2012. -- № 4, с. 35-39.

24. Сайко В.Г. Методика оцінки якості радіолінії OFDM-систем радіозв'язку в умовах багатопроменевого поширення // Вісник ДУІКТ. – 2012. -- № 3, с. 20-24.
25. Y. Nakasha, M. Sato, T. Tajima, Y. Kawano, T. Suzuki, T. Takahashi, K. Makiyama, T. Ohki, and N. Hara, “W-band transmitter and receiver for 10-Gb/s impulse radio with an optical-fiber interface,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 57, no. 12, pp. 3171–3180, 2009.
26. M. Maeda, Y. Shishikui, F. Suginoshta, Y. Takiguchi, T. Nakatogawa, M. Kanazawa, K. Mitani, K. Hamasaki, M. Iwaki, and Y. Nojiri, “Steps toward the practical use of Super Hi-Vision,” in *Proc. NAB Broadcast Engineering Conf.*, 2006, pp. 450–455.
27. D. Dawn, S. Pinel, S. Sarkar, P. Sen, B. Perumana, D. Yeh, and J. Laskar, “Development of CMOS based circuits for 60GHz WPAN applications,” in *Proc. ICUWB Dig.*, 2007, pp. 129–133.
28. K. Okada, L. Ning, K. Matsushita, K. Bunsen, R. Murakami, A. Musa, T. Sato, H. Asada, N. Takayama, S. Ito, W. Chaivipas, R. Minami, T. Yamaguchi, Y. Takeuchi, H. Yamagishi, M. Noda, and A. Matsuzawa, “A 60-GHz 16QAM/8PSK/QPSK/BPSK direct-conversion transceiver for IEEE802.15.3c,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 46, no. 12, pp. 2988–3004, 2011.
29. C. Marcu, D. Chowdhury, C. Thakkar, J.-D. Park, L.-K. Kong, M. Tabesh,
30. W. Y. Wang, B. Afshar, A. Gupta, A. Arbabian, S. Gambini, R. Zamani, E. Alon, and A.M. Niknejad, “A 90 nm CMOS low-power 60 GHz transceiver with integrated baseband circuitry,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 44, no. 12, pp. 3434–3447, 2009.
31. A. Siligaris, O. Richard, B. Martineau, C. Mounet, F. Chaix, R. Ferragut, C. Dehos, J. Lanteri, L. Dussopt, S. D. Yamamoto, R. Pilard, P. Busson, A. Cathelin, D. Belot, and P. Vincent, “A 65-nm CMOS fully integrated transceiver module for 60-GHz wireless HD applications,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 46, no. 12, pp. 3005–3017, 2011.
32. S. Emami, R. F. Wiser, E. Ali, M. G. Forbes, M. Q. Gordon, G. Xiang, S. Lo, P. T. McElwee, J. Parker, J. R. Tani, J. M. Gilbert, and C. H. Doan, “A 60GHz CMOS phased-array transceiver pair for multi-Gb/s wireless communications,” in *Proc. ISSCC Dig.*, 2011, pp. 164–166.

33. A. Valdes-Garcia, S. Reynolds, A. Natarajan, D. Kam, D. Liu, J.-W. Lai, Y.-L.O. Huang, P.-Y. Chen, M.-D. Tsai, J.-H. C. Zhan, S. Nicolson, and B. Floyd, "Single-element and phased-array transceiver chipsets for 60-ghz Gb/s communications," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 4, pp. 120–131, 2011.
34. NEC Corp. Homepage [Online]. Available: <http://www.nec.com/en/global/prod/nw/pasolink/products/epaso.html/>
35. Loea Corp. Homepage [Online]. Available: http://www.loeacom.com/pages/products_12250.htm
36. BridgeWave Communications, Inc. Homepage [Online]. Available:
37. http://www.bridgewave.com/downloads/BridgeWave_products_at_a_glance_brochure.pdf
38. V. Dyadyuk, J. D. Bunton, J. Pathikulangara, R. Kendall, O. Sevimli, L. Stokes, and D. A. Abbott, "A multigigabit millimeter-wave communication system with improved spectral efficiency," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 55, no. 12, pp. 2813–2821, 2007.
39. E. Laskin, P. Chevalier, B. Sautreuil, and S. P. Voinigescu, "A 140-GHz double-sideband transceiver with amplitude and frequency modulation operating over a few meters," in *Proc. IEEE BCTM*, 2009, pp. 178–181.
40. R. Fujimoto, R. M. Motoyoshi, U. Yodprasit, K. Takano, and M. Fujishima, "A 120-GHz transmitter and receiver chipset with 9-Gbps data rate using 65-nm CMOS technology," in *Proc. A-SSCC Dig.*, 2010, pp. 1–4.
41. Fujimoto, R. M. Motoyoshi, K. Takano, and M. Fujishima, "A 120 GHz / 140 GHz dual-channel ASK receiver using standard 65 nm CMOS technology," in *Proc. EuMC 41st European Dig.*, 2011, pp. 1189–1192.
42. I. Kallfass, J. Antes, T. Schneider, F. Kurz, D. Lopez-Diaz, S. Diebold, H. Massler, A. Leuther, and A. Tessmann, "All Active MMIC-based wireless communication at 220 GHz," *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, vol. 1, no. 2, pp. 477–487, 2011.
43. H.-J. Song, K. Ajito, A. Wakatsuki, Y. Muramoto, N. Kukutsu, Y. Kado, and T. Nagatsuma, "Terahertz wireless communication link at 300 GHz," in *Proc. MWP Dig.*, 2010, pp. 42–45

44. T. Nagatsuma, T. Takada, H.-J. Song, K. Ajito, N. Kukutsu, and Y. Kado, "Millimeter- and THz-wave photonics towards 100-Gbit/s wireless transmission," in *Proc. IEEE Photonics Society Dig.*, 2010, pp. 385–386.
45. M. Weiss, A. Stohr, F. Lecoche, and B. Charbonnier, "27 Gbit/s photonic wireless 60 GHz transmission system using 16-QAM OFDM," in *Proc. MWP Dig.*, 2009, pp. 1–3.
46. A. Kanno, K. Inagaki, I. Morohashi, T. Sakamoto, T. Kuri, I. Hosako, T. Kawanishi, Y. Yoshida, and K. Kitayama, "40 Gb/s W-band (75–110 GHz) 16-QAM radio-over-fiber signal generation and its wireless transmission," in *Proc. ECOC Dig.*, 2011, pp. 1–3.
47. Кравчук С.О., Наритник Т.М. Телекомунікаційні системи терагерцевого діапазону. – Житомир: ФОП «Євенок О.О.», 2015. – 208 с.
48. Кучерявый А.Е. Самоорганизующиеся сети и новые услуги / Кучерявый А.Е. // *Электросвязь*. -- № 1. – 2009. -- с. 19-23.
49. Палий А.И. Радиоэлектронная борьба. -- М.: Воениздат, 1989. -- с. 350.
50. Доровских А.В. Сети связи с подвижными объектами / Доровских А.В., Сикарев С.С. -- К.: Техніка, 1989. – 158 с.
51. Вишнеvский В.М. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / Вишнеvский В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В. -- М.: Техносфера, 2005. – 455 с.
52. Дубинов А. Е., Дубинова И. Д., Сайков С. К. W-функция Ламберта и ее применение в математических задачах физики: Учеб. пособие для вузов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2006. – 160 с.
53. Takagi K, Kleinrock L. Optimal Transmission Range for Randomly Distributed Packet Radio Terminals. *IEEE Trans, on Comm.*, 32(3):246-57, 1984.
54. Nelson R., Kleinrock L. The spatial capacity of a slotted ALOHA multihop packet radio network with capture. *IEEE Transactions on Communications* (ISSN 0090-6778), vol. COM-32, June 1984, p. 684-694.

55. G Bianchi, "Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function," IEEE Journal on selected areas in communications, vol. 18, pp.535-547, March 2000.
56. L. Wu, P. Varshney. Performance Analysis of CSMA and BTMA Protocols in Multihop Networks (I). Single Channel Case. Information Sciences, Elsevier Sciences Inc., 120:159-77, 1999.
57. Информационные технологии и телекоммуникации: Электронный журнал. Выпуск 3. – 2014 //www.itt.sut.ru.
58. Степанов С.Н.. Теория телетрафика: концепции, модели, приложения. - М.: Горячая линия-Телеком, 2015. – 868 с.
59. Волков Л.Н., Немировский М.С., Шинаков Ю.С. Системы цифровой радиосвязи: базовые модели и характеристики. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 392 с.
60. Прокис Дж. Цифровая связь. Пер. с англ. Под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. – 800с.
61. Мальцев А.А., Рубцов А.Е. Исследование характеристик OFDM систем радиосвязи с адекватным отклонением поднесущих // Вестник ННТУ им. Н.И. Лобачевского. – 2007. -- № 5. – с. 43-49.
62. Рубцов А.Е. Анализ методов адаптации к случайному частотно-селективному каналу для систем радиосвязи с ортогональными поднесущими: автореферат. Дис...канд. Физ-мат наук: 01.04.03. ННТУ. – Нижний Новгород, 2007. – 19 с.
63. Сайко В.Г. Исследование помехоустойчивости режимов работы OFDM систем радиосвязи // Зв'язок. – 2009. -- № 4, с. 51-55.
64. Сайко В.Г. Оцінка впливу глибини замирання сигналу на завадостійкість OFDM-систем радіозв'язку в умовах багатопроменевого поширення // Зв'язок. – 2011. -- № 1, с. 29-33.
65. Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). – М.: Наука, 1973. С. 432.
66. Дэйвид Г. Порядковые статистики. М.: Наука, 1979. – 322 с.

67. Сайко В.Г., Бреславський В.О., Грищенко Л.М. Математична модель розрахунку мобільності децентралізованої бездротової мережі // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2016. -- № 2. -- с. 23-26.
68. ETSI, EG 202 057-3 "Обробка мови, передачі та аспекти якості : Параметри QoS, визначення та вимірювання, що відносяться до користувача ; Частина 3: Параметри QoS для мереж стільникового наземного зв'язку". –2005.
69. ETSI, TS 102 250-2 "Обробка мови, передачі та аспекти якості : Аспекти QoS для популярних послуг в GSM і 3G мережах ; Частина 2 : Визначення якості обслуговування параметрів та їх обчислення". – 2006.
70. МСЕ-Р "Вимоги до продуктивності і якості сервісу мереж доступу ІМТ-2000". – 2003.
71. ARCEP "Якість передачі голосу і даних мобільних мереж (2G і 3G) у Франції" (La qualité des services de voix et de data des réseaux mobiles (2G and 3G) en France métropolitaine). – 2010.
72. TRAI "Стандарти якості послуг основних телефонних сервісів і правила для послуг мобільних телефонних мереж". – 2009.
73. IDA "Стандарти якості телефонних мобільних мереж 2G".
74. OFCOM "Звіт про надання користувачам інформації про якість послуг". – 2004.
75. "Обробка мовлення, передачі та аспекти якості : Параметри QoS, визначення і вимірювання, що відносяться до користувача ; Частина 2 : Голосова телефонія, факс, модем, передача даних і SMS". – 2005.
76. ETSI, EG 201769 "Обробка мови, передачі та аспекти якості : Параметри QoS, визначення та вимірювання ; параметри для голосових телефонних сервісів". – 2000.
77. OFCOM, "Консультації по параметрам якості". – 2004.
78. МСЕ-Т, Рекомендація E.802 "Принципи і методики визначення та застосування параметрів QoS". – 2007.

79. ETSI, EG 202 057-1 "Обробка мови, передачі та аспекти якості : Параметри QoS, визначення та вимірювання, що відноситься до користувача ; Частина 1 : Загальне. – 2005.
80. ETSI, EG 202 057-2 "Обробка мови, передачі та аспекти якості : Параметри QoS, визначення та вимірювання, що відноситься до користувача ; Частина 2: Голосова телефонія, факс, модем, передача даних і SMS". – 2005.
81. ETSI, EG 202 057-4 "Обробка мови, передачі та аспекти якості : Параметри QoS, визначення та вимірювання, що відноситься до користувача ; Частина 4 : Доступ в Інтернет". – 2005.
82. ARCEP "Якість передачі голосу і даних мобільних мережах (2G і 3G) у Франції". – 2010.
83. Pattuelli R. Точність оцінки зони покриття інструментами для планування в системах стільникового зв'язку / R. Pattuelli, V. Zingarelli // Журнал персональних телекомунікацій інституту інженерів електротехніки та електроніки (IEEE Personal communications). – №. 7, № 3. – 2000. – Р. 50–53.
84. Sarraf С. Вимірювання параметрів якості для мобільних мереж GPRS / С. Sarraf, L. Khazan // 4 міжнародна конференція телекомунікацій та інформатики – USA, Wisconsin, 2005. – 99 с.
85. Ali M. Аудит та оптимізація мережі радіодоступу GSM / Ali M., Shehzad A., Akram A. // Міжнародний журнал інженерії та технологій. – Т. 10, № 1. – 2010. – Р. 75–79.
86. ETSI, EN 300 911 "Цифрові стільникові системи (Фаза 2 +) ; Управління радіопідсистеми". – 1997.
87. ETSI, TS 100 910 : "Digital cellular telecommunications system (Phase 2 +) ; Radio transmission and reception (3GPP TS 05.05)".
88. МСЕ. Довідник по радіоконтролю. – 1995.
89. Величко В. В. Телекоммуникационные системы и сети: Учебное пособие в 3 томах. Том 3. Мультисервисные сети / В. В. Величко, Е. А. Субботин, В. П. Шувалов, А. Ф. Ярославцев; под ред. профессора В. П. Шувалова. – М. Горячая линия-Телеком, 2005 – 592 с.

90. Сайко В. Г. Практичні аспекти впровадження сучасних радіотехнологій WiMAX та радіорелейних систем / В. Г. Сайко, Ю. М. Літвінов // II науково-практична конференція «Актуальні питання регулювання у сфері телекомунікацій та користування радіочастотним ресурсом України». Київ, «Укрчастотнагляд», 11-13 червня 2008 р.). – С. 86.
91. Гольдштейн Б. С. Обеспечение безопасности сетей ОКС-7 / Б. С. Гольдштейн, И. М. Ехриель, Р. Д. Рерле [Електроний ресурс]. – Режим доступу : http://www.ccc.ru/magazine/depot/03_02/read.html?0302.htm (10.02.2014).
92. Инструменты мониторинга и анализа сети [Електроний ресурс]. – Режим доступу : // http://citforum.ru/nets/optimize/locnop_07.shtml (10.02.2014).
93. Сайко В. Г. Методичні та технічні аспекти визначення впливу електромагнітного випромінювання сучасних мобільних та безпроводових засобів цифрового зв'язку на здоров'я людини / В. Г. Сайко, Д. О. Дьомін, Д. О. Лисенко // Зв'язок. – 2010. – №1. – С.12-15.
94. Сайко В. Г. Особенности современных методов измерения удельной мощности излучения SAR, поглощаемой человеческим телом / В. Г. Сайко, Д. О. Лисенко // VI наукова конференція «Сучасні тенденції розвитку технологій в інфокомунікаціях та освіті», Київ, 05-06 листопада 2009 р. – С. 264.
95. Битнер В. И. Принципы та стандарты межсетевое взаимодействия. Учебное пособие / В. И. Битнер. – Новосибирск, «ВЕДИ», 2006. – 239 с.
96. Сапсан система контроля и измерений сети ОКС [Електроний ресурс]. – Режим доступу : // http://innovinn.com/downloads/innovinn_ss7.pdf (10.02.2014).
97. Системы мониторинга телекоммуникационных сетей [Електроний ресурс]. – Режим доступу : // <http://www.innovinn.com/SolutionsMonitoring.aspx> (10.02.2014).
98. Спайдер. Система распределенного мониторинга сетей связи [Електроний ресурс]. – Режим доступу : // <http://niits.ru/products/?spider> (10.02.2014).
99. Voice packetization – Packetized voice protocols // Recommendation ITU-T G.764 (12/90).

100. Packet circuit multiplication equipment // Recommendation ITU-T G.765 (09/92).
101. Signalling between circuit multiplication equipment's (CME) and international switching centers (ISC) // Recommendation ITU-T Q.50 (07/01).
102. Signalling system No.7 – Application transport mechanism: Bearer Independent Call Control (BICC) // Recommendation ITU-T Q.765.5 (04/04).
103. Мак Вильямс Ф. Дж., Слоэн Н.Дж.А.. Теория кодов, исправляющих ошибки. -М.- Связь .-1979, 74.
104. Дикарев А.В. Коды на основе двоичных колец /Дикарев А.В. // Системи управління, навігації та зв'язку. -2014.- Випуск 1(29) - С.50-53.
105. Дикарев А.В. Постулаты кольцевых кодов /Дикарев А.В.// Зв'язок.-2013- Випуск №5(105)-С.53-56.
106. Сайко В.Г., Дикарев О.В., Грищенко Л.М. Властивості кільцевих кодів // Телекомунікаційні та інформаційні технології.—2016. -- № 2. С. 52-54.
107. Мікрохвильова інтегрована телерадіоінформаційна система мультисервісного радіодоступу. Патент України на корисну модель №71488, дата публікації 10.07.2012р. Бюл.№13 з пріоритетом від 30.01.2012 Наритник Т.М., Казіміренко В.Я. ті інші.
108. Мікрохвильова інтегрована телерадіоінформаційна система мультисервісного радіодоступу з підвищеною пропускною здатністю UMDS-K. Патент України на корисну модель №79483, дата публікації 25.04.2013р., Бюл.№8 з пріоритетом від 15.10. 2012. Наритник Т.М., Ременець М.І., Казіміренко В.Я., Войтенко О.Г. Свириденко В.М.
109. Патент України на корисну модель «Приймально-передавальний формувач для інформаційного потоку для каналу зв'язку із підвищеною спектральною ефективністю та пропускною здатністю» №84923 від 26.03.2013р.
110. Канал безпроводового широкосмугового абонентського доступу до інформаційних ресурсів із використанням каналу терагерцового діапазону. Патент України на корисну модель № 104299, дата публікації 25.01.2016 р., Бюл.№ 2 з

пріоритетом від 25.01.2016 р. Сайко В.Г., Наритник Т.М., Казіміренко В.Я., Лутчак О.В.

111. Бугай А. В., Калинина И. В., Ретинская В. В., Скуратов А.К. Моделирование некоторых характеристик научно-образовательных сетей методами математической статистики. Труды Всероссийской научно - методической конференции "Телематика-2002". 3-6 июня 2002, Санкт - Петербург.

112. Бугай А. В., Калинина Е. В., Ретинская В. В., Скуратов А.К. Статистический анализ информационных потоков в глобальных сетях // Информационные технологии . -- №1. -- 2002.

113. Васильев В. Н., Гугель Ю. В., Гуров В. П., Шалаев М. П. Анализ характеристик информационного трафика в компьютерных сетях на основе моделей Марковских процессов. Труды Всероссийской научно - методической конференции Телематика '2003, 14-17 апреля 2003 года, Санкт-Петербург, изд-во СПбГТУ.

114. Дженкинс Г., Ватта Д. Спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1972, вып 2.

115. Домрачев В. Г., Безрукавный Д. С., Калинина Е. В., Ретинский В. В., Скуратов А.К. Нечеткие методы в задачах мониторинга сетевого трафика // Информационные технологии. -- №3. -- 2006.—с. 23-26.

116. Сайко В.Г. Спосіб адаптивного вибору режимів роботи засобів радіозв'язку нового покоління // Наукові записки УНДІЗ. -- № 2 (22). – 2012. – с. 16-20.

117. Галкин В.А. Основы программно-конфигурируемого радио. М.: Горячая линия- Телеком. – 2013. – 372 с.

118. Сайко В.Г., Оксіюк О.Г., Дікареєв О.В. Основы цифрового оброблення сигналів в системах цифрового радіозв'язку. К.: ДУТ, 2016. – с. 282.

119. Бреславський В.О. Створення комплексної системи моніторингу з використанням аналізаторів сигналізації телекомунікаційних мереж. Київ, Наукові записки УНДІЗ. 2014. № 1. с. 69-76.

120. Бреславський В.О. Вимірювання якості передачі мови в телефонних системах. Використання алгоритму PESQ, як оцінки сприйняття якості передачі мови. Київ. Наукові записки УНДІЗ 2014.№ 3. с. 53-61

121. Бреславський В.О. Методи і процедури первинної обробки значень параметрів телекомунікаційної мережі. Кременчук. Вісник Кременчуцького національного університету. 2015.№ 2(91). с. 64-70.

122. Бреславський В.О. Оцінка якості надання послуг в мережах стільникового зв'язку. Житомир. Вісник Житомирського державного університету. 2015.№ 1(79). с. 264-271

123. Плющ О.Г., Бреславський В.О., Грищенко Л.М. Методика оцінки щільності радіовузлів в само організованих мережах. Київ. Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2016. № 1. с.5-10.

124. Сайко В. Г., Плющ А. Г., Бреславський В.О., Лисенко Д. О. Анализ состояния и перспектив развития рынка услуг широкополосных систем беспроводного доступа. Науково-практичний журнал «Зв'язок», Київ. ДУТ. 2016.№ 1. с.20-23.

125. Сайко В. Г., Бреславський В.О., Лисенко Д.О. Спосіб підвищення завадостійкості каналів радіозв'язку для мобільних мереж нового покоління. Науково-практичний журнал «Зв'язок», Київ. ДУТ.2015. №4. с.29-32.

126. Сайко В. Г., Бреславський В.О., Лисенко Д.О. Спосіб вимірювання відношення сигнал/шум для адаптивних радіоліній мобільного зв'язку. Науково-практичний журнал «Зв'язок», Київ. ДУТ.2014. №6. с.49-51.

127. Плющ О.Г., Бреславський В.О., Грищенко Л.М. Развитие широкополосных систем беспроводного доступа нового поколения: технико-экономический анализ. Київ. Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2015. № 4. с.49-55.

128. Сайко В.Г., Оксіюк О.Г., Бреславський В.О., Лисенко Д.О. Техничко-экономический анализ динамики развития рынка мобильных услуг широкополосного доступа. Київ. Сучасний захист інформації. 2015. № 4. с.44-55.

129. Сайко В.Г., Бреславський В.О., Грищенко Л.М., Кравченко В.І. Математична модель розрахунку мобільності децентралізованої безпроводової мережі. Київ. Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2016. № 2. с.17-22.
130. Бреславський В.О. Лаптев О.А. International Journal of Science and Engineering Investigations (IJSEI)" Denmark. vol. 9. issue 107. 2020. с 46-50.
131. Бреславський В.О. Лаптев О.А. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering (IJATCSE) Scopus Indexed - ISSN 2278 – 3091
132. Бреславський В.О. Типові методи вимірювання якості в телекомунікаційних мережах. XI Всеукраїнська конференція студентів і молодих науковців «Інформатика, інформаційні системи та технологій» 28.03. 2014 р. Тези доповідей. Одеський національний університет, Одеса, 2014. с.10-12.
133. Бреславський В.О., Сайко В.Г. Использование алгоритма PESQ в измерениях качества речевой связи в телефонных системах. 4 міжнародна наукова конференція студентів та молодих вчених. Одеса. 2014, с.147-148.
134. Бреславський В.О. Оцінка якості надання послуг в мережах стільникового зв'язку. 7 Всеукраїнська конференція студентів і молодих науковців. Дніпро. 2015. с.61-62.
135. Казимиренко В.Я., Кравченко В.І., Бреславський В.О., Наритник Т.Н. Аналіз розвитку мереж широкосмугового бездротового зв'язку через призму сталого економічного розвитку. Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології» том 2 Актуальні питання побудови сучасних телекомунікаційних систем і мереж. 17-20 листопада 2015 року. Київ: ДУТ, с. 34-36.
136. Казимиренко В.Я., Кравченко В.І., Бреславський В.О. , Наритник Т.Н. Использование терагерцового диапазона при развертывании мультисервисной сети широкополосного сети широкополосного доступа. Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології» том 2 Актуальні питання побудови сучасних телекомунікаційних систем і мереж. 17-20 листопада 2015 року. Київ: ДУТ, с. 27-30.
137. Бреславський В.О., Лисенко Д.О. Методика розрахунку мобільності децентралізованої бездротової мережі. П'ята міжнародна науково-технічна

конференція «ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАТИЗАЦІЇ» 22-23 грудня 2015 р. Тези доповідей четвертої міжнародної науково-технічної конференції. Київ-Полтава-Китовище-Париж-Орел-Харків. с. 34

138. Бреславський В.О. Вимірювання рівнів випромінювання при контролі електромагнітних завад в самоорганізованих радіомережах. VI Наукова Практична конференція: «СВІТОВИЙ РОЗВИТОК НАУКИ ТА ТЕХНІКИ» 7.12.2020.Запоріжжя.с 31-34.

Додаток 1

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
ДП «ТЕЛЕГРУП-УКРАЇНА»

«03» вересня 2020 року

АКТ про використання результатів кандидатської дисертаційної роботи Бреславського Владислава Олександровича на тему «Моделі та методики підвищення ефективності функціонування самоорганізованих радіомереж», яку подано на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – «Телекомунікаційні системи та мережі»

Комісія у складі директора ДП «ТЕЛЕГРУП-УКРАЇНА» Варламовса Романа та Інженера-технічного фахівця Баженова Павла Олеговича

Цим актом підтверджується використання результатів дисертаційних досліджень Бреславського В.О., а саме:

1. На підприємстві, спільно з ДП «Український державний центр радіочастот» впроваджено оцінку якості надання послуг в телекомунікаційних мережах. Якість послуг зв'язку є тим фактором, який впливає на рівень конкурентоспроможності серед операторів зв'язку. Єдині показники якості надання послуг зв'язку будуть використовуватися як оператором зв'язку, так й представниками офіційної влади, фізичними та юридичними особами. Розроблено та прийнято до використання систему показників якості послуг з урахуванням світових стандартів та досвіду міжнародних організацій.
2. Визначені основні задачі та підстави для створення комплексної системи моніторингу телекомунікаційної системи підприємства для забезпечення надання високої якості послуг у мережі Підприємства.
3. З метою здешевлення та спрощення існуючих систем моніторингу прийнято рішення застосовувати в якості базового елементу універсальний аналізатор сигналізацій телекомунікаційних систем на базі АСТС з різним програмним забезпеченням і єдиним центром обробки інформації про стан мережі.

Члени комісії:
Директор Варламовс Роман

Інженер-технічний фахівець Баженов П.О.



A handwritten signature in blue ink, likely belonging to the director Roman Varlamov, is written below the stamp.

Додаток 2

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
ТОВ «ТЕЛЕГРУП-КИЇВ»

«05» жовтня 2020 року

АКТ про використання результатів кандидатської дисертаційної роботи Бреславського Владислава Олександровича на тему «Моделі та методики підвищення ефективності функціонування самоорганізованих радіомереж», яку подано на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – «Телекомунікаційні системи та мережі»

Комісія у складі директора ТОВ «ТЕЛЕГРУП-КИЇВ» Драудзиньш Арніса, та системного адміністратора Супруненко Олександра Сергійовича

Цим актом підтверджується використання результатів дисертаційних досліджень Бреславського В.О., а саме:

- Для вирішення завдань з надання високих стандартів якості у телекомунікаційних системах підприємства, з метою розробки принципово нових методів аналізу, які спрямовано на поліпшення їх технічних характеристик і забезпечення контролю та діагностики телекомунікаційного обладнання, розглянуто методи математичного моделювання, засновані на статистичних методах аналізу багатовимірних даних.
- Розглянуті особливості процесу статистичного моніторингу характеристик телекомунікаційної мережі.
- Розглянута методологія збору первинної інформації про телекомунікаційну мережу підприємства та процедури перетворення первинних значень характеристик телекомунікаційної мережі у часовий ряд і випадкову послідовність, що дозволяють здійснювати безперервний моніторинг характеристик телекомунікаційної мережі Товариства статистичними методами. Отримані результати будуть покладені в основу рішень щодо врахування динаміки змін пропускної здатності з обсягом переданих даних, що передаються у телекомунікаційних каналах підприємства.

Члени комісії:

Директор Драудзиньш Арніс

Системний адміністратор Супруненко О.С.



Додаток 3

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор
ТОВ «Атлантіс Телеком»
Копійка О.В.



15 вересня 2020 року

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

Бреславського Владислава Олександровича

Комісія у складі Генерального директора ТОВ «Атлантіс Телеком» доктора технічних наук Копійки Олега Валентиновича, технічного директора Калбукова Армена Джоровича, директора по роботі з операторами Деркача Миколи Петровича склала даний акт про те, що результати, які отримані у дисертаційній роботі здобувача Бреславського В.О., реалізовані при удосконаленні процесу визначення параметрів якості телекомунікаційних послуг під час проведення вимірювань на телекомунікаційній мережі ТОВ «Атлантіс Телеком».

Перелік результатів впровадження:

1. Розроблено методика з виконання вимірювання параметрів якості послуг фіксованого телефонного зв'язку методом випробування на реальному трафіку. Зазначений результат дозволяє здійснювати обробку отриманих результатів у напівавтоматичному режимі, що підвищує швидкість обробки інформації.

2. Впроваджено новий алгоритм проведення вимірювань на телекомунікаційних мережах за допомогою Аналізатора сигналізації телекомунікаційних систем, що дозволяє проводити вимірювання з більш високим рівнем достовірності отриманих результатів, що дозволяє відстежувати рівень надання телекомунікаційних послуг на новому рівні.

Члени комісії:

Генеральний директор

О.В. Копійка

Технічний директор

А.Д. Калбуков

Директор по роботі з операторами

М.П. Деркач