Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Шмігель Богдан Олегович

УДК 621.391

ДИСЕРТАЦІЯ

ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ НИЗЬКОЕНЕРГЕТИЧНИХ БЕЗПРОВОДОВИХ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ СЕНСОРНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

172 Телекомунікації та радіотехніка
Електроніка та телекомунікації

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ Б. О. Шмігель

Науковий керівник: Уривський Леонід Олександрович, доктор технічних наук, професор

Київ 2023

АНОТАЦІЯ

Шмігель Б. О. Підвищення продуктивності низькоенергетичних безпроводових каналів зв'язку сенсорних телекомунікаційних систем. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2022.

В сучасному світі, життя людини нерозривно пов'язане з обміном інформацією. Надзвичайно швидкими темпами зростають і вимоги користувачів до якості, швидкості і безпеки прийому та передачі даних, зберігаючи при цьому можливість вільного пересування. Задовольняти ці потреби – власне і є ціллю безпроводових мереж.

Сенсорні мережі займають ключову роль у разі необхідності оперативного розгортання, мобільності, гнучкості організації мережі і широті можливих додатків, у багатьох випадках будучи єдиним економічно виправданим рішенням. Однією із ключових задач забезпечення функціонування сенсорної мережі є забезпечення надійного та продуктивного передавання інформації в умовах обмежених ресурсів, зокрема, енергетичних.

Враховуючи розмір сенсора, основною вимогою до сенсорних мереж – є забезпечення низького енергоспоживання та достовірного прийому. Автономність роботи залежить від енергії, що споживається вузлами системи.

Для досягнення достовірного зв'язку, мають місце наступні компоненти:

- достатня енергетика (обмежена для сенсорних мереж)
- мала швидкість передачі (обмежена вимогами до сенсорних мереж)
- інструменти для підтримання достовірності (завадостійке кодування)

Під низькою енергетикою будемо вважати відношення сигнал-шум $h^2 < 10$. Параметр h^2 є результатом взаємодії трьох незалежних параметрів:

- потужністю сигналу в точці прийому

- спектральної щільності шуму
- швидкості передачі символів

Продуктивність – це фактична швидкість передачі інформації джерела. Ключ до вирішення задачі отримання максимальної продуктивності лежить у площині теорії інформації, засновником якої є К. Шеннон.

Інструментом досягнення максимальної продуктивності, як міри наближення швидкості передачі повідомлень джерела до границі Шеннона є вибір оптимальних сигнально-кодових конструкцій, які дозволяють передавати повідомлення з максимально можливою швидкістю і заданою якістю.

Міра наближення продуктивності каналу зв’язку до його пропускної здатності характеризує інформаційну ефективність системи передачі інформації.

Метою роботи є синтез сигналів, що максимально наближають продуктивність каналу зв’язку до пропускної здатності при обмежених ресурсах каналу.

У роботі досліджена актуальна задача підвищення продуктивності низькоенергетичних безпроводових каналів зв’язку. На відміну від традиційних систем безпроводового зв’язку, сенсорна мережа включає велику кількість пристроїв, які повинні передавати інформацію до базової станції. Сенсорні вузли можуть встановлюватися стаціонарно або мати можливість довільно пересуватися в певному просторі, тому вони повинні бути автономними, самоорганізованими та не потребують установки. Область покриття такої мережі вкрай обмежена і може досягати десятки та сотні метрів. Тому однією з головних умов до такої мережі – це забезпечення мінімального енергоспоживання та достовірного прийому в умовах низької енергетики. Основною задачею при побудови сенсорної мережі є достовірна оцінка енергетичних характеристик безпроводового каналу зв’язку.

Виходячи із вищесказаного, для розгортання сенсорних мереж актуальним питанням є ефективне проектування сенсорної мережі: необхідна кількість пристроїв, їх характеристики, розміщення, енергетичні характеристики каналів, траси розповсюдження, тощо.

Для вирішення обмежень ресурсу каналу зв’язку, перспективним являється пошук нових методів передачі інформації, вибору ефективного виду модуляції та завадостійкого кодування.

Основним інструментом для передачі інформації є сигнали багатопозиційної маніпуляції. Вибір поєднання типу модуляції і швидкості завадостійкого коду, забезпечує максимально можливу ефективність, забезпечуючи відповідну надійність каналу зв’язку. В якості розглянутих сигналів обрано сигнали багатопозиційної маніпуляції BPSK, QPSK, QAM16. Високошвидкісні види модуляції не розглядаються, так як сенсорна мережа не передбачує передачу великих масивів інформації, а також має обмежену енергію сигналу.

Широкосмугові сигнали є одним з відомих методів для підвищення завадостійкості каналу, але властивості таких сигналів в умовах обмеженого ресурсу та енергії сигналу не досліджені. Для визначення найбільш оптимального способу передачі сигналів в умовах низької енергетики, проведено дослідження властивостей ШСС на основі моделей оцінки якості каналів зв’язку, а також порівняння характеристики завадостійкості з ВСС та еквівалентною енергією сигналу.

Для визначення максимальної продуктивності передачі в безпроводових низькоенергетичних каналах зв’язку, необхідно дослідити показники продуктивності використання сигналів заданого виду модуляції та порівняти їх з широкосмуговими сигналами з різними значеннями бази сигналу B. Виявилося, що широкосмугові сигнали не забезпечують кращої достовірності в порівнянні з вузькосмуговими при однаковій потужності випромінювання та способі обробки.

Класичні формули для оцінки завадостійкості багатопозиційних сигналів достовірні для високої енергетики, однак для $h^2 \to 0$ не є точними. Тому для точного визначення точної достовірності прийому для таких умов, пропонується використання векторно-фазового методу. Векторно-фазовий метод дозволяє отримати точні розрахунки при будь-якій енергетиці, на відміну від формул

Прокіса, що можуть використовуватись тільки для високої енергетики.

Загальним підсумком дослідження є оцінка продуктивності СКК, яка дозволяє в каналі з заданими частотно-енергетичними параметрами визначити ефективність використання визначеного виду модуляції та кодування за критерієм наближення до границі Шеннона, або максимуму інформаційної ефективності при заданій достовірності сигналу в точці прийому. Методика дозволяє оцінити ефективність використання ресурсів каналів зв'язку з багатопозиційною маніпуляцією та завадостійким кодуванням, а також кількісно оцінити витрати на реалізацію заходів щодо підвищення достовірності або продуктивності у вимірі запропонованих показників.

Дослідження питань підвищення продуктивності низькоенергетичних безпроводових каналів зв'язку забезпечить побудову сенсорних телекомунікаційних систем для успішного виконання поставлених завдань.

Новими в дисертації є наступні результати:

1. Вдосконалено використання векторно-фазового методу для визначення завадостійкості багатопозиційних сигналів в умовах низької енергетики. Класичні формули Прокіса не є точними для низької енергетики.
2. Вдосконалено методику синтезу сигналу, яка дозволяє знайти екстремум продуктивності каналу зв'язку та наблизити до його пропускної здатності – границі Шеннона.
3. Вдосконалено методику оцінки ефективності використання ресурсів каналу зв'язку.

Ключові слова: завадостійкість, ефективність, широкосмугові сигнали, багатопозиційні сигнали, сигнально-кодові конструкції, частотна, енергетична, інформаційна ефективності.

ABSTRACT

Shmihel B. Increasing the performance of low-power wireless communication channels of sensor telecommunication systems – Scientific qualification work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the Doctor of Philosophy degree in technical sciences, specialty 172 - Telecommunications and radio engineering. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2022.

In the modern world, human life is inextricably connected with the exchange of information. User requirements for the quality, speed, and security of receiving and transmitting data are also growing extremely fast while maintaining the possibility of mobility. Satisfying these needs is the purpose of wireless networks.

Sensor networks play a key role in the need for rapid deployment, mobility, networking flexibility and a variety of possible applications, in many cases being the only cost-effective solution. One of the key tasks of functioning in the sensor network is to ensure reliable and efficient data transmission in conditions of limited resources.

Given the size of the sensor, the main requirement for sensor networks is to provide low power consumption and reliable reception. Their autonomy depends on the energy consumed by the nodes of the system.

To achieve the necessary reliability, the following components take place:

- sufficient energy (limited for sensor networks)
- low transmission rate (limited by requirements for sensor networks)
- tools for maintaining reliability (noise-correcting coding)

By low energy, we will consider the signal-to-noise ratio $h^2 < 10$. Parameter h^2 is the result of the interaction of three independent parameters:

- signal strength at the receiving point
- noise spectral density
- symbol rate

Performance is the actual speed of information transfer of the source. The key to solving the problem of obtaining maximum performance lies in the plane of the theory of information, founded by K. Shannon.

The tool for achieving maximum performance, as the approach of the channel performance to its bandwidth, is the choice of optimal signal-code constructions that allow messages to be transmitted at the highest possible speed and with a given quality.

The approach of the channel performance to its bandwidth characterizes the information efficiency of the information transmission system.

The research aims to synthesize signals that bring the channel performance as close as possible to the throughput with limited channel resources.

The research contains the actual problem of increasing productivity in low-energy wireless communication channels. Unlike traditional wireless communication systems, a sensor network includes many devices that should transmit information to a base station. Sensor nodes can be placed permanently or be able to move in a certain space, so they must be autonomous, self-organized and do not require installation. The coverage area of such a network is extremely limited and can reach tens and hundreds of meters. The main task in building a sensor network is a reliable assessment of the energy characteristics of a wireless communication channel.

Based on the foregoing, for the deployment of sensor networks, an important issue is the effective design of a sensor network: the required number of devices, their characteristics, placement, energy characteristics of channels, propagation paths, etc.

To solve the limitations of the communication channel, it is promising to search for new methods for transmitting information, choosing an effective type of modulation and error-correcting coding.

The basic tool for transmitting information is the signals of multi-position modulation. The choice of a combination of modulation type and error code rate provides the highest possible efficiency while providing adequate reliability to the communication channel. The multi-position modulation signals BPSK, QPSK and QAM16 were chosen as the considered signals. High-speed modulation types are not considered, since the sensor network does not involve the transmission of large amounts of information and has limited signal energy.

Broadband signals are one of the well-known methods for improving the noise immunity of a channel, but the properties of such signals under conditions of limited

resources and signal energy have not been studied. To determine the most optimal method of signal transmission in low energy conditions, research on the properties of the narrowband signals was carried out based on models for assessing the quality of communication channels and comparing the noise immunity characteristic of wideband signals with equivalent signal energy.

To determine the maximum transmission performance in wireless low-energy communication channels, it is necessary to investigate the performance indicators of a given type of modulation signals and compare them with wideband signals with different values of the signal base B. It turned out that wideband signals do not provide better reliability compared to narrowband signals with the same transmission power and processing method.

The classical formulas for estimating the noise immunity of multi-position signals are accurate for high energy, but for $h^2 \rightarrow 0$ they are not accurate. Therefore, to determine the exact reliability for such conditions, it is proposed to use the vector-phase method. The vector-phase method helps to obtain accurate calculations for any energy, in contrast to the Prokis formulas, which can only be used for high energy.

The overall result of the research is performance evaluation of signal-code construction, that allows determining the efficiency of using a certain type of modulation and coding in a channel with given frequency and energy parameters according to the criterion of maximum approach to the Shannon bound, or the maximum of information efficiency for given signal reliability. Using this technique, it possible to evaluate the efficiency of using the resources of communication channels with multi-position modulation and error-correcting coding and calculate the costs of implementing measures to improve the reliability or performance of the proposed indicators.

Research on improving the performance of low-energy wireless communication channels will help to build sensor telecommunication systems for the successful completion of tasks.

Research contains the following new results:

1. The use of the vector-phase method for determining the noise immunity

of multi-position signals under low energy conditions has been improved. The classic Prokis formulas are not accurate for low energy.

2. The method of signal synthesis has been improved, which makes it is possible to find the extremum of the communication channel performance and bring it closer to its capacity – the Shannon bounds.
3. The methodology for evaluating the effectiveness of the communication channel resources has been improved.

Keywords: noise immunity, efficiency, wideband signals, multi-position signals, signal-code construction, frequency, energy, information efficiency.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. **Шмігель Б. О.** Високоефективна безпроводова мережа на основі гнучкої архітектури IEEE 802.1. Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2021. № 4 (73), с. 79-86.
2. **Уривський Л.О, Шмігель Б.О.** Оцінка ефективності використання ресурсів безпроводових каналів зв'язку. Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 33 (72) № 5 2022. – С. 27-32.
3. **Шмігель Б.О., Боднарчук А.П.** Оцінювання цифрових каналів зв'язку із заданими характеристиками вірогідності. «Зв'язок». 2022. № 1 (155), с. 59-62.
4. **Уривський Л.О, Шмігель Б.О.** Аналіз продуктивності систем мобільного зв'язку з нано- і пікосотами. Науково-виробничий збірник «Наукові записки УНДІЗ». – К.: УНДІЗ, 2014, № 4(32), с. 5-10.
5. **Uryvsky L., Shmihel B.,** Boundary parameters for a qualitative assessment of digital communication channels with specified reliability characteristics/ 2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)
6. **L. Uryvsky, A. Moshynska, V. Solianikova, B. Shmigel**. Application of the Classical Noise Immunity Theory for Prediction of the Parameters of Perspective Multiservice Telecommunications in Accordance with Modern Digital Standards / Current Trends in Communication and Information Technologies: 2020 Springer Nature Switzerland AG, pp 38-59.
7. **Osypchuk S., Shmigel B., Moshynska A., Solyanikova V.** Emergency ground communications system using 802.11xx technology / Conference: 2019 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo).
8. **Luchanin M., Chepkov I., Shmigel B.** Analysis of spatial and energy limitations on the influence of multipath factors in the VHF radio channel model

/ Conference: 2019 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo).

9. **Uryvsky L., Moshynska A., Osypchuk S., Shmihel B.** Comparison of methods for determining noise immunity indicators of a multiservice transmission system, Springer, 2019. – p. 38-47.
10. **L. Uryvsky, S. Osypchuk, B. Shmigel.** The 802.11 Protocols Usage for Wireless Systems Construction with Flexible Architecture. TCSET'2016, February 23–26, 2016, Lviv-Slavske, Ukraine. pp. 918-921.
11. **Uryvsky L.O., Moshynska A.V., Shmihel B.O.** Analysis of properties of the wideband signals in the low energy conditions / SCIENCES OF EUROPE VOL 1, Praha, 2019, № 37 – p. 60-63.
12. **Osypchuk S., Moshynska A., Pieshkin A., Shmihel B.** The effect of the features of signal-code constructions forming on indicators of functionality and reliability of communication systems based on the 802.11 n/ac standards / SCIENCES OF EUROPE VOL 2, Praha, 2018, № 26 – p. 38-47.
13. **Uryvsky L., Shmihel B.,** Complex methodology for efficiency evaluation of discrete information transmission systems/ SCIENCES OF EUROPE VOL 2, Praha, 2020, № 53 – p. 55-61.
14. **Uryvsky L., Moshynska A., Shmihel B., Solianikova V..** The ability to overcome the multipath factor in the radio channels of the microwave range based on OFDM technology / The scientific heritage VOL 1, Budapest, Hungary, 2019, № 37 – p. 51-55.
15. **Уривський Л.О, Шмігель Б.О.** Порівняння систем мобільного зв’язку з нано- і пікосотами за показниками продуктивності/ Третя міжнародна конференція молодих вчених «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє»/ / Збірка тез, ч.3. — Одеса: ОНАЗ, 2014 – с. 101-103.
16. **Уривський Л.О., Осипчук С.О., Шмігель Б.О.** Особливості способів оцінки продуктивності мережі на основі 802.11ac, Науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій»: Матеріали конференції. К.: НТУУ «КПІ», 2016. – с. 28-30.

17. **Уривський Л.О., Шмігель Б.О.** Дослідження властивостей широкосмугових сигналів зв’язку в умовах низької енергетики. Науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій»: Матеріали конференції. К.: НТУУ «КПІ», 2019. – с.46-49.
18. **Уривський Л.О., Шмігель Б.О.** Порівняння завадостійкості широкосмугових та вузькосмугових сигналів зв’язку в умовах низької енергетики. Науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій»: Матеріали конференції. К.: НТУУ «КПІ», 2020. – с.37-40.
19. **Уривський Л.О., Шмігель Б.О.** Визначення завадостійкості СКК в умовах низької енергетики. Науково-технічна конференція «Перспективи телекомунікацій»: Матеріали конференції. К.: НТУУ «КПІ», 2021. – с.53-55.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ 16
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ 17
ВСТУП 18
1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ КАНАЛІВ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ СЕНСОРНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ 24
1.1 Особливості функціонування сенсорних телекомунікаційних систем (СТС) та характеристика каналів передачі інформації СТС 24
1.2 Особливості оцінки продуктивності каналів передачі інформації СТС 37
1.2.1 Вимоги щодо якості функціонування та продуктивності каналів передачі інформації СТС 39
1.2.2 Взаємозв’язок показників достовірності та продуктивності каналів передачі інформації СТС 43
1.2.3 Методика оцінки продуктивності каналів передачі інформації при використанні сигнально-кодових конструкцій. 46
1.3 Критерії та показники оцінки ефективності функціонування СТС з багатопозиційними сигналами 47
1.4 Цілі і постановка задачі дослідження 50
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1 52
2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ ЗВ’ЯЗКУ (ШСС) В УМОВАХ НИЗЬКОЇ ЕНЕРГЕТИКИ 54
2.1. Дослідження властивостей ШСС 54
2.2. Розробка методики оцінки граничних показників достовірності ШСС 59
2.3. Доцільність використання ШСС 63
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2 64

3 ВИЗНАЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СИГНАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ВЕКТОРНО-ФАЗОВОГО МЕТОДУ 65

3.1 Аналіз методів визначення показників завадостійкості сигналів зв'язку 65

3.2 Порівняльний аналіз методик визначення завадостікості для сигналів багатократної Phase-Shift Keying 68

3.3 Аналіз методики визначення завадостікості для сигналів багатократної Quadrature Amplitude Modulation 70

3.4 Вдосконалення методики оцінки завадостійкості багатопозиційних сигналів на основі векторно-фазового методу 73

3.5 Визначення завадостійкості СКК в умовах низької енергетики 80

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3 91

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ПРОДУКТИВНІСТІ КАНАЛІВ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ СТС В УМОВАХ НИЗЬКОЇ ЕНЕРГЕТИКИ 93

4.1 Аналіз методики визначення параметрів продуктивності каналів передачі інформації СТС 93

4.2 Аналіз енергетичних границь використання сигналів каналів передачі інформації СТС за критерієм продуктивності 96

4.3 Методика визначення екстремумів продуктивності в різних енергетичних умовах 98

4.4 Особливості забезпечення необхідної продуктивності каналів передачі інформації СТС в умовах низької енергетики 104

4.5 Оцінка інформаційної ефективності використання каналів передачі інформації СТС в умовах низької енергетики 107

4.5.1 Аналіз методики оцінки ефективності каналів передачі інформації 107

4.5.2 Модифікація методики оцінки ефективності з урахуванням особливостей каналів передачі інформації СТС 109

4.5.3 Оцінка показників інформаційної ефективності безпроводових

каналів зв’язку СТС 111
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4 119
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 121
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ..... 126

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

BPSK	Binomial Phase-Shift Keying, – квадратурно-фазова модуляція
LAN	Локальна мережа (Local Area Network)
MAC	Управління доступом до середовища（Media Access Control)
PAN	Персональна мережа (Personal Area Network)
PHY	Фізичний рівень моделі OSI
QAM	Quadrature Amplitude Modulation, – квадратурно-амплітудна модуляція
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying, – квадратурно-фазова модуляція
WAN	Глобальна мережа (Wide Area Network)
АБГШ	Адитивний білий гаусівський шум
БПМ	Багатопозиційна модуляція
БСМ	Безпродовова сенсорна мережа
ВСС	Вузькосмугові сигнали зв’язку
СКК	Сигнально-кодова конструкція
ШСС	Широкосмугові сигнали зв’язку

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

$C_н$	Пропускна здатність неперервного каналу зв’язку
E_c	Енергія символу
ΔF	Полоса частот
h^2	Енергетичний параметр каналу зв’язку в точці прийому
H	Ентропія одиночного двійкового символу джерела
m	Кількість біт у символі БПМ
M	Кількість позицій в сузір’ї БПМ
N_0	Спектральна щільність потужності шуму
$p_б$	Ймовірність помилкового прийому біту в точці прийому
P	Необхідна ймовірність помилки в точці прийому
$p_с$	Ймовірність помилкового прийому символу в точці прийому
R	Продуктивність дискретного каналу зв’язку
T_0	Тривалість символу
V_c	Швидкість передачі символів у каналі зв’язку
V_s	Швидкість передачі символів джерела інформації
β	Енергетична ефективність
η	Інформаційна ефективність
γ	Частотна ефективність

ВСТУП

Актуальність теми. В сучасному світі життя людини нерозривно пов’язане з обміном інформацією. Надзвичайно швидкими темпами зростають і вимоги користувачів до якості, швидкості і безпеки прийому та передачі даних, зберігаючи при цьому можливість для користувачів вільного пересування. Задовольняти ці потреби – власне і є ціллю безпроводових мереж.

Актуальність роботи – стрімкий розвиток сенсорних телекомунікаційних систем (СТС), різновидом яких є технології IoT, та необхідність забезпечення стійкого зв’язку в умовах низької енергетики ліній зв’язку, завад та багатопроменевого розповсюдження.

Сенсорні мережі займають ключову роль у разі необхідності оперативного розгортання, мобільності, гнучкості організації мережі і широті можливих додатків, у багатьох випадках будучи єдиним економічно виправданим рішенням. Однією із ключових **задач забезпечення функціонування** сенсорної мережі є забезпечення **надійного та продуктивного** передавання інформації в умовах обмежених ресурсів, зокрема, **енергетичних**.

Сенсорний датчик (або сенсор) – це мініатюрний пристрій, що має певні властивості. Він може зондувати навколишній простір і збирати інформацію у вигляді інформаційних сигналів. Наявність у сенсорі радіопередавача дозволяє передавати інформаційні сигнали на базову станцію через безпроводові засоби зв'язку. Враховуючи розмір сенсора, радіопередавач має обмежену енергетику і дальність передачі (наприклад, до 10м.). Цей недолік можна компенсувати за рахунок використання великої кількості таких сенсорів, для того, щоб сигнали були відправлені до базової станції (шляхом ретрансляції через інші вузли), навіть якщо вона знаходиться дуже далеко.

Сенсорні мережі займають ключову роль у разі необхідності оперативного розгортання, мобільності, гнучкості організації мережі і широті можливих додатків, у багатьох випадках будучи єдиним економічно виправданим рішенням

Однією із ключових задач побудови сенсорної мережі є *достовірна оцінка енергетичних характеристик безпроводового каналу зв’язку* та підвищення

продуктивності низькоенергетичних безпроводових каналів зв’язку сенсорних телекомунікаційних систем.

Це дозволить проектувати СТС із використанням теоретичної моделі оцінки енергетичних параметрів безпроводового каналу зв’язку з високою точністю, без попереднього тестування в польових умовах, та значним зниженням ризику необхідності залучення додаткових матеріальних ресурсів на доробку та покращення роботи мережі згідно поставлених задач.

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

Дослідження даної роботи проводились згідно з планами науково-дослідних робіт кафедри Інформаційно-комунікаційних технологій та систем Навчально-наукового Інституту телекомунікаційних систем:

- в рамках держбюджетної теми: «Дослідження характеристик сучасних цифрових станцій радіорелейного зв’язку на основі стандарту IEEE 802.11ac та рекомендації щодо їх покращення» (номер державної реєстрації 0116U004885);
- в рамках держбюджетної теми: 2869п «Розробка уніфікованого пристрою завадостійкої передачі інформації у високошвидкісних каналах радіорелейного та супутникового зв’язку» (номер державної реєстрації 0115U000259);
- в рамках держбюджетної теми: № 2316-П «Інтелектуалізація систем управління високопродуктивними сенсорними мережами на основі використання роботизованих об’єктів та обчислювальної FOG-інфраструктури» (номер державної реєстрації 0120U102181).

Мета та задачі дослідження.

Метою роботи є максимальне наближення **продуктивності** каналу зв'язку до **пропускної здатності** за рахунок синтезу відповідних сигнально-кодових конструкцій **при обмежених ресурсах каналу**.

Згідно з метою основними задачами дослідження є:

1. Обгрунтування критеріїв та показників продуктивності та ефективності функціонування при використанні СТС.
2. Оцінка завадостійкості багатопозиційних сигналів на основі векторно-фазового методу.

3. Дослідження властивостей щодо завадостійкості та продуктивності широкосмугових сигналів зв’язку в умовах низької енергетики.

4. Порівняльний аналіз граничних показників завадостійкості широсмугових та вузькосмугових сигналів зв’язку.

5. Формулювання рекомендацій щодо підвищення продуктивності та ефективності НЕКЗ.

Об’єктом дослідження є передача інформації через низькоенергетичні безпроводові канали зв’язку.

Предметом дослідження є показники продуктивності безпроводових каналів низькоенергетичних сенсорних системи зв’язку

Апаратом дослідження є математичний аналіз, теорія інформації, теорія потенційної завадостійкості, методи і методики імітаційного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів.

В дисертації отримано наступні наукові результати:

1. Вдосконалено векторно-фазовий метод для визначення завадостійкості багатопозиційних сигналів, при цьому відмінність полягає в тому, що реалізовано можливості використання методу в умовах низької енергетики каналу (при значеннях відношення сигнал/шум до 10 дБ). Завдяки цьому підвищено точність оцінці показників завадостійкості сигналів при значеннях відношення сигнал шум до 10 дБ, доведена суттєва похибка при використанні традиційного аналітичного оцінювання достовірності передавання інформації в умовах низької енергетики, що суттєво позначилося на точність розрахунків показників продуктивності каналу зв’язку в цих умовах. Усунена похибка визначення ймовірності помилки P_b складає до **90%** при зміні відношення сигнал/шум в діапазоні **2-5 дБ** та до **25%** в діапазоні **5-10 дБ** у порівнянні із використанням традиційних аналітичних формул.

2. Вдосконалено методику визначення умов підвищення показників продуктивності на основі зміни швидкості передавання інформації від джерела, при цьому відмінність полягає в тому, що за рахунок синтезу параметрів багатопозиційних сигнально-кодових конструкцій визначено умови досягнення

екстремумів продуктивності каналу зв’язку. Завдяки вдосконаленій методиці продуктивність каналу зв’язку наближено до його пропускної здатності – границі Шеннона та доведено можливість підвищення продуктивності каналу зв’язку на **30%** в порівнянні з каналом зв’язку із незмінною швидкістю передавання інформації при еквівалентному відношенню сигнал/шум.

3. Вдосконалено методику оцінки ефективності використання ресурсів каналу зв’язку, при цьому відмінність полягає в тому, що оцінка ефективності передавання дискретних сигналів дозволяє наочно відображає динаміку зміни відношення потужності сигнал шум на вході демодулятора одночасно для показників енергетичної, частотної та інформаційної ефективності. Завдяки вдосконаленій методиці досягнуто можливість порівняння динаміки зміни показників ефективності при використанні різних багатопозиційних сигнально-кодових конструкцій та обрання доцільного сполучення виду модуляції та способу кодування в залежності від обмежень в каналі зв’язку.

Практична цінність отриманих результатів.

Практичне значення отриманих в дисертаційній роботі результатів полягає в тому, що:

1. Результати досліджень використані у держбюджетних НДР № 0116U004885 «Дослідження характеристик сучасних цифрових станцій радіорелейного зв’язку на основі стандарту IEEE 802.11ac та рекомендації щодо їх покращення», НДР № 0115U000259 «Розробка уніфікованого пристрою завадостійкої передачі інформації у високошвидкісних каналах радіорелейного та супутникового зв’язку», НДР № 0120U102181 «Інтелектуалізація систем управління високопродуктивними сенсорними мережами на основі використання роботизованих об’єктів та обчислювальної FOG-інфраструктури».
2. Отримані результати використані в учбовому процесі: підготовка докторів філософії – «Потенціальна завадостійкість сигналів в низькоенергетичному каналі зв'язку».

3. Визначені теоретичні та практичні границі застосування класичних формул для визначення завадостійкості, що важливо для оцінки низькоенергетичних систем зв'язку.
4. Запропонована комплексна методика синтезу сигналу, яка дозволяє максимально наблизити продуктивність каналу зв'язку до його пропускної здатності – границі Шеннона.

***Зміст роботи* складається з 4 розділів:**

В *першому розділі* розглянуто основи побудови сенсорних телекомунікаційних систем, зроблено огляд стандартів безпроводового зв'язку та архітектуру та класифікацію сенсорних мереж. Розглянуто показники якості функціонування каналів зв'язку СТС та критерії підвищення продуктивності систем з використанням цих стандартів, сформульовано цілі і зроблена постановка задачі дослідження якості зв'язку в каналах систем сенсорного зв'язку. Описано методологію оцінки продуктивності каналів зв'язку при використанні широкосмугових сигналів та сигнально-кодових конструкцій.

В *другому розділі* розглянуто властивості ШСС та проведено порівняння характеристик завадостійкості з ВСС при однаковій потужності випромінювання та способі обробки. Проведено аналіз використання ШСС при незмінній енергії сигналу та описано доцільність використання в умовах низької енергетики каналу.

В *третьому розділі* проведено розробку методики оцінки достовірності передачі сигналів в СТС. Зроблено аналіз методів оцінки достовірності передачі сигналів. Розроблено методику оцінки граничних показників достовірності широкосмугових сигналів зв'язку та сигнально-кодових конструкцій. Дано рекомендації щодо вдосконалення методики оцінки завадостійкості на основі векторно-фазового методу.

В *четвертому розділі* проведено дослідження показників продуктивності каналів зв'язку СТС в умовах низької енергетики. Зроблено аналіз енергетичних границь використання сигналів каналів зв'язку СТС за критерієм продуктивності. Описано методику визначення екстремумів продуктивності в

різних енергетичних умовах. Визначено особливості забезпечення необхідної продуктивності каналів зв'язку СТС в умовах низької енергетики.

Проведено оцінку інформаційної ефективності використання каналів зв'язку СТС в умовах низької енергетики. Зроблено аналіз методики оцінки ефективності каналів зв'язку. Модифіковано методику оцінки ефективності з урахуванням особливостей каналів зв'язку СТС. Проведена оцінка показників інформаційної ефективності безпроводових каналів зв'язку СТС.

Особистий вклад здобувача. Робота виконана на кафедрі телекомунікаційних систем ІКТС КПІ ім. Ігоря Сікорського. Основні результати, отриманні в роботі, опубліковані в спеціалізованих фахових виданнях.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертації пройшли апробацію на 11-ти конференціях, в тому числі матеріали 5-х конференцій індексовані в системі Scopus: 2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T); «International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)», м. Одеса, Україна; 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine.

Результати досліджень опубліковані в професійних виданнях: «SCIENCES OF EUROPE», Praha, Czech Republic; «The scientific heritage», Budapest, Hungary.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 19 наукових робіт, в тому числі 4 статті у наукових фахових виданнях України, 1 монографія та 5 тез доповідей у періодичних наукових виданнях проіндексованих у базах WoS та/або Scopus, 4 статті у періодичних наукових виданнях, 5 тез доповідей у збірниках матеріалів міжнародних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 106 найменувань, Загальний обсяг роботи 137 сторінок, з яких 106 сторінок основного тексту та 12 сторінок використаних джерел. Робота містить 42 рисунка, 8 таблиць.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ КАНАЛІВ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ СЕНСОРНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

1.1 Особливості функціонування сенсорних телекомунікаційних систем (СТС) та характеристика каналів передачі інформації СТС

Безпроводова сенсорна мережа (БСМ) — це розподілена мережа мініатюрних вузлів, що не обслуговуються, які здійснюють збір даних про параметри зовнішнього середовища і передачу їх на базову станцію за допомогою ретрансляції від вузла до вузла за допомогою безпроводового зв'язку. Вузол мережі, що називається сенсором, містить датчик, що сприймає дані від зовнішнього середовища (сенсор), мікроконтролер, пам'ять, радіопередавач, автономне джерело живлення та інколи виконавчі механізми.

Основною сферою застосування сенсорної мережі є контроль та моніторинг вимірюваних параметрів фізичних середовищ та об'єктів і в деяких випадках – керування цими об'єктами.

Сенсорні мережі будуються на основі протоколів IEEE 802.15.4, ZigBee та DigiMesh. За допомогою радіозв'язку, що здійснюється між вузлами мережі на основі стандарту ZigBee, створюються мережі, що самоорганізуються і самовідновлюються. Для багатьох сенсорних мереж характерна мобільність не окремо кожного вузла (як це має місце у MANET), а окремої групи вузлів. Основна вимога до протоколів сенсорних мереж – мале споживання енергоресурсів. У сенсорних мережах час їхньої життєдіяльності прямо залежить від вирішення питань енергоспоживання вузлів мережі. У сенсорних мережах час їхньої життєдіяльності прямо залежить від вирішення питань енергоспоживання вузлів мережі.

Приклади сенсорних мереж: всепроникні сенсорні мережі (USN – Ubiquitous Sensor Network), мережі для транспортних засобів (VANET – Vehicular Ad Hoc Network), муніципальні мережі (HANET – Home Ad hoc

Network), медичні мережі (MBAN (S) – Medicine Body Area Network (services)) та ін.

Архітектура пропонує чотири основні шари (або ступені), які використовуються як основа для класифікації на Рис. 1.1.

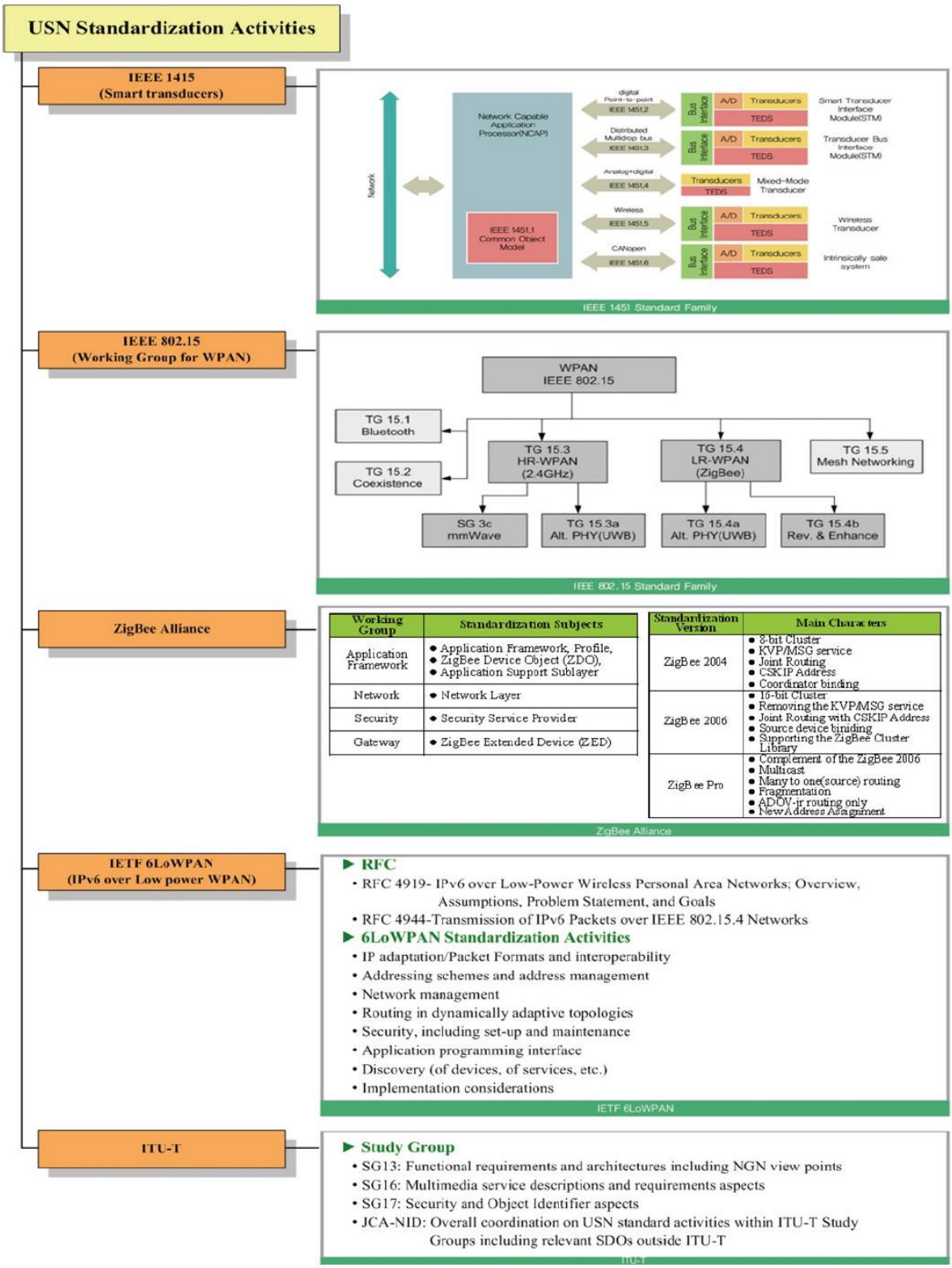


Рис. 1.1 Стандарти сенсорних мереж

Інтернет речей охоплює практично всі галузі з величезною кількістю пристроїв, пов'язаних один з одним під час підключення до хмарної системи в режимі реального часу.

Рис. 1.2 Архітектура стандарту IEEE 802.15.4

На Рис. 1.2 показано архітектуру стандарту IEEE802.15.4. Фізичний рівень (PHY) в основному включає прийомопередавач і відповідний низькорівневий механізм управління. Рівень MAC визначає параметри передачі даних шляхом доступу до рівня PHY. Через характерний обмежений ресурс застосування бездротових сенсорних мереж зазвичай вимагає, щоб протокол, що використовується, був якомога простішим, щоб знизити накладні витрати системи. Архітектура IEEE 802.15.4 проста та дозволяє розробникам розробляти прикладне програмне забезпечення на низькому рівні, що забезпечує пряму взаємодію з передачею даних. Більш традиційні стандарти, які відповідають стандартам еталонної моделі взаємодії відкритих систем (OSI), можуть надати надійні та великі послуги, але 7-рівневе визначення моделі робить таку архітектуру надто складною для застосування при розробці БСС [6].

Якщо розглядати бездротові сенсорні мережі з низькою вартістю, низьким енергоспоживанням, низькою швидкістю передачі даних та малим радіусом дії, то стандарт IEEE 802.15.4 є найчастіше використовуваним стандартом зв'язку при розробці таких бездротових сенсорних мереж. ZigBee і LPWAN – два найбільш поширені стандарти IEEE. Вбудоване програмне забезпечення бездротових сенсорних мереж повинно покладатися на деякі стандарти, що

гарантують, що мережа працюватиме на різних апаратних платформах [6].

В дисертації розглядається тільки фізичний та транспортний рівень. Цей рівень відповідає за з’єднання гетерогенних пристроїв у мережі IoT. В основному пристрої IoT працюють, використовуючи низьку потужність за наявності каналів зв’язку між пристроями з перешкодами та втратами. Для зв’язку доступні різні протоколи:

- Bluetooth: використовується для зв'язку на невеликі відстані. У цьому типі зв'язку різні типи пристроїв можуть спілкуватися один з одним за допомогою радіохвиль. Нова ера Bluetooth, доступна для мережі IoT, відома як BLE або Bluetooth Low Energy. Перспектива дизайну Bluetooth ґрунтується на економії енергоспоживання.
- Zigbee: це малопотужний пристрій із дуже низькою швидкістю передачі даних під час зв’язку, який спеціально використовується в промисловій частині.
- LPWAN: LPWAN – глобальна мережа з низьким енергоспоживанням (LPWAN – low power wide area network), яка призначена для передачі невеликих повідомлень через мережу під час зв'язку між пристроями. У LPWAN кожен пристрій отримує невеликий об’єм даних в різних часових інтервалах.

Таблиця 1.1 Параметри сенсорних мереж

Стандарт	**802.15.4 Zig Bee™**			**LoRaWAN**	**802.15.1 Bluetooth**	**802.15.3 High Rate WPAN, WiMedia**	**802.11ac Wi-Fi**	**802.11ah Wi-Fi**
Додатки	Моніторинг, управління, мережі датчиків, домашня/промислова автоматика			Передача даних в автономних датчиках, моніторинг, екологія,	Голос, дані, заміна кабелів	Потокове мультимедіа, заміна кабелів аудіо/відеосистем	дані, відео, LAN	Передача даних в автономних датчиках, моніторинг, екологія,
Переваги	Ціна, енергозбереження, розміри мережі, менш завантажені діапазони		Ціна, енерго-збереження, розміри мережі, глобальний діапазон	Ціна, дальність, енерго-збереження	Ціна, енерго-збереження, передача голосу, перескоки частоти	Висока швидкість, енергозбереження	Швидкість, гнучкість	Швидкість, гнучкість, покриття, енергозбереження
Частота, ГГц	0,868	0,915	2,4	0.433 0.470 0.780 0.867 0.915 2.4	2,4	2,4	2,4	0.900
Модуляція	BPSK	BPSK	OQPSK	CSS (chirp spread spectrum)	GFSK π/4 DQPSK 8DPSK	BPSK QPSK 16-QAM 32-QAM 64-QAM	BPSK QPSK 16-QAM 64-QAM 256-QAM 1024-QAM	BPSK QPSK 16-QAM 64-QAM 256-QAM
Кодування	FEC 1/2, 3/4, 2/3, 5/6	FEC 1/2, 3/4, 2/3, 5/6	FEC 1/2, 3/4, 2/3, 5/6	FEC 4/5, 4/6, 4/7, 4/8	FEC 1/3, 2/3	FEC 1/2, 3/4, 2/3, 5/6	FEC 1/2, 3/4, 2/3, 5/6	FEC 1/2, 3/4, 2/3, 5/6
Макс. швидкість	20 Кбіт/с	40 Кбіт/с	250 Кбіт/с	0.3 Кбіт/с - 50 Кбіт/с	V1 – 1 Мбіт/с V2 – 2.1 Мбіт/с v3 – 24 Мбіт/с	22 Мбіт/с (дод. 11,33, 44, 55 Мбіт/с)	2.34-3.47 Гбіт/с	150Кбіт/с – 347 Мбіт/с
Вихідна потужність (ном.), дБм	0			14	0 (клас 3) 4 (клас 2) 20 (клас 1)	0	20	30
Дальність, м	10-100			2-5 км (міська) 5-15 км (сільська місцевість)	10 (класс 3) 100 (класс 1)	5-50	35	1000
Чутливість, дБм	-92		-85	-137	-70	-75	-76	-92
Розмір стека, Кбайт	4-32			19-250	>250	-	> 1000	> 1000
Срок служби батареї, днів	100- 1000+			1000+	1-7	теоретично понад 1000	0,5-5	100-1000+
Розмір мережі	65536 (16-бітні адреса), 2^{64} {64-бітні адреса)			65536 (16-бітні адреса), 2^{64} {64- бітні адреса)	мастер +7	до 127 на хост	65536 (16-бітні адреса), 2^{64} {64- бітні адреса)	65536 (16-бітні адреса), 2^{64} {64-бітні адреса)

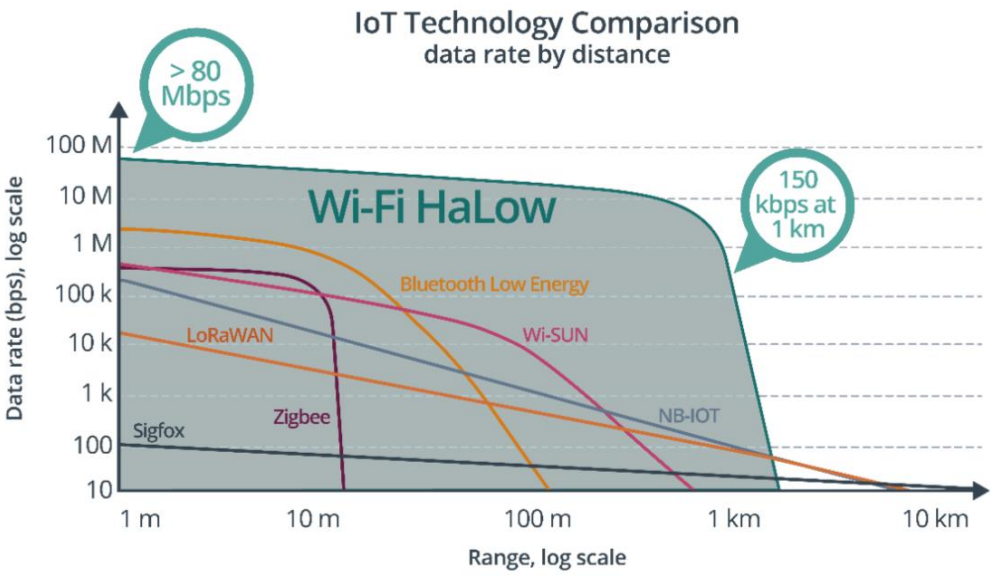


Рис. 1.3 Порівняння IoT технологій по швидкості та дальності

Сенсор – елемент технічної системи, що перетворює контрольований параметр (температуру, тиск, вібрацію, переміщення) в електричний сигнал. Безпроводові сенсорні мережі складаються з мініатюрних обчислювальних пристроїв — мотів, забезпечених датчиками (наприклад, температури, тиску, освітленості, рівня вібрації, розташування тощо) і передавачами, що працюють у заданому радіодіапазоні.

Мот – мініатюрний обчислювально-комунікаційний пристрій, який являє собою невелику плату, до складу якої входить модуль збору і обробки даних (процесор, оперативна пам'ять, флеш-пам'ять), приймально-передавальний модуль, а також джерело живлення і датчики. Типи датчиків можуть відрізнятися за призначенням сенсорного вузла (температури, тиску, вологості, освітлення, вібрації тощо) [79] (Рис. 1.4).

Рис. 1.4 Склад сенсорного вузла

Сенсорні вузли працюють автономно (мають власну систему управління) та здійснюють збір інформації моніторингу: параметри навколишнього середовища (вологість, температура, шум, тиск, рівень забруднення, радіації тощо) або параметри об’єктів моніторингу (трубопроводів, мостів тощо).

Сукупність сенсорних вузлів створюють безпровідні сенсорні мережі. Характерними особливостями БСМ є значна розмірність (сотні, тисячі вузлів), обмеженість ресурсів вузлів (енергія батареї, продуктивність процесора, обсяг пам'яті, потужність передавача, пропускна спроможності радіоканалу), концентрація трафіка біля шлюзу тощо. У загальному, функціонування БСМ ґрунтується на спільній роботі великої кількості мотів, які можуть бути розташовані на значній географічній території, здійснюючи одночасний моніторинг великої кількості параметрів навколишнього середовища, в якому вони знаходяться, з подальшою передачею інформації моніторингу на спеціальні шлюзи, а від них – на центри обробки інформації. На відміну від традиційних датчиків, моти оснащені процесором, тому, замість передачі всіх даних моніторингу, можуть їх обробляти, виконуючи прості обчислення, і передавати в радіомережу тільки необхідну інформацію, економлячи при цьому вузлові та мережеві ресурси.

Мережа може бути призначена для роботи протягом декількох місяців або навіть років в важкодоступних районах. При цьому заміна батарей вузлів мережі може бути непрактичною або навіть не можливою. Отже, управління споживанням енергії сенсорними вузлами (зменшення, збереження, перерозподіл між вузлами) має вирішальне значення для збільшення часу їх функціонування.

Розміри мотів дозволяють розташовувати їх у важкодоступних місцевостях або використовувати для операцій, які вимагають швидкого реагування без присутності людини. Це означає, що мережеві протоколи та алгоритми роботи мота повинні мати можливість самоорганізації сенсорних вузлів у мережу.

Сенсорні вузли можуть встановлюватися стаціонарно або мати можливість довільно пересуватися в певному просторі, не порушуючи логічної зв'язаності мережі, у цьому випадку БСМ не має фіксованої топології і має самоорганізовану структуру. Під самоорганізацією (Self Organizing) розуміється автоматичний вибір топології мережі, автоматичне підключення нових пристроїв до мережі, автоматичний вибір маршрутів передачі пакетів в мережі без участі людини.

До числа основних функціональних і експлуатаційних переваг БСМ слід віднести:

- можливість самоорганізації та самовідновлення мережі; масштабованість мереж з щільним розміщенням вузлів в просторі;
- високі показники надійності і відмовостійкості за рахунок комунікаційної надлишковості і наявності альтернативних маршрутів передачі даних;
- низька вартість та малі масогабаритні показники вузлів;
- висока енергетична ефективність;
- стійкість до модифікації топології мережі та змін характеристик середовища в якому поширюються радіохвилі;
- здатність вузлів спільно обробляти отримані дані і приймати рішення на базі розподілених алгоритмів;
- можливість швидкого і, за необхідності, прихованого розгортання мережі.

Гнучка архітектура, зниження витрат при монтажі виділяють бездротові мережі інтелектуальних сенсорів серед інших бездротових та провідних інтерфейсів передачі даних, особливо коли йдеться про велику кількість з'єднаних між собою пристроїв, сенсорна мережа дозволяє підключати до 65 000 пристроїв. Постійне зниження вартості бездротових рішень, підвищення їх експлуатаційних параметрів дозволяють поступово перейти з провідних рішень у системах збирання телеметричних даних, засобів дистанційної діагностики, обміну інформацією на безпроводові. «Сенсорна мережа» є сьогодні усталеним терміном, що означає розподілену, самоорганізовану, стійку до відмови окремих вузлів мережу з пристроїв, які не обслуговуються і не потребують спеціальної установки [36]. Кожен вузол сенсорної мережі може містити різні датчики для

контролю довкілля, мікроконтролер та радіоприймач. Це дозволяє пристрою проводити вимірювання, самостійно проводити початкову обробку даних та підтримувати зв'язок із зовнішньою інформаційною системою.

Прийнятий стандарт IEEE 802.15.4 описує контроль доступу до безпроводового каналу та фізичний рівень для низькошвидкісних бездротових особистих мереж, тобто два нижні рівні відповідно до мережної моделі OSI.

Комплексна система зв’язку повинна складатися з транспортної і розподільчої компонент, з метою високошвидкісного розподілу інформації з використанням стандартів безпроводового зв’язку IEEE 802.11, засобів цифрової комутації та криптографічного захисту інформації, для забезпечення своєчасного передавання великих об’ємів інформації з високою швидкістю та заданою достовірністю інформації, у заданій зоні виникнення НС та з можливістю організації зв’язку як на території НС, так і з можливістю здійснення зв’язку з центром керування мережі.

На Рис. 1.5 наведено базову схему зазначеної і реалізованої експериментальної мережі, де буквами А, Б, В, Г позначено основні вузли мережі. Мережа має наступні показники та якісні характеристики: автономність; мобільність; комплексність; транспортна компонента: радіорелейні лінії виду точка-точка, та розподільча компонента виду точка-багатоточка; живучість; гнучкість; масштабованість; захищеність.

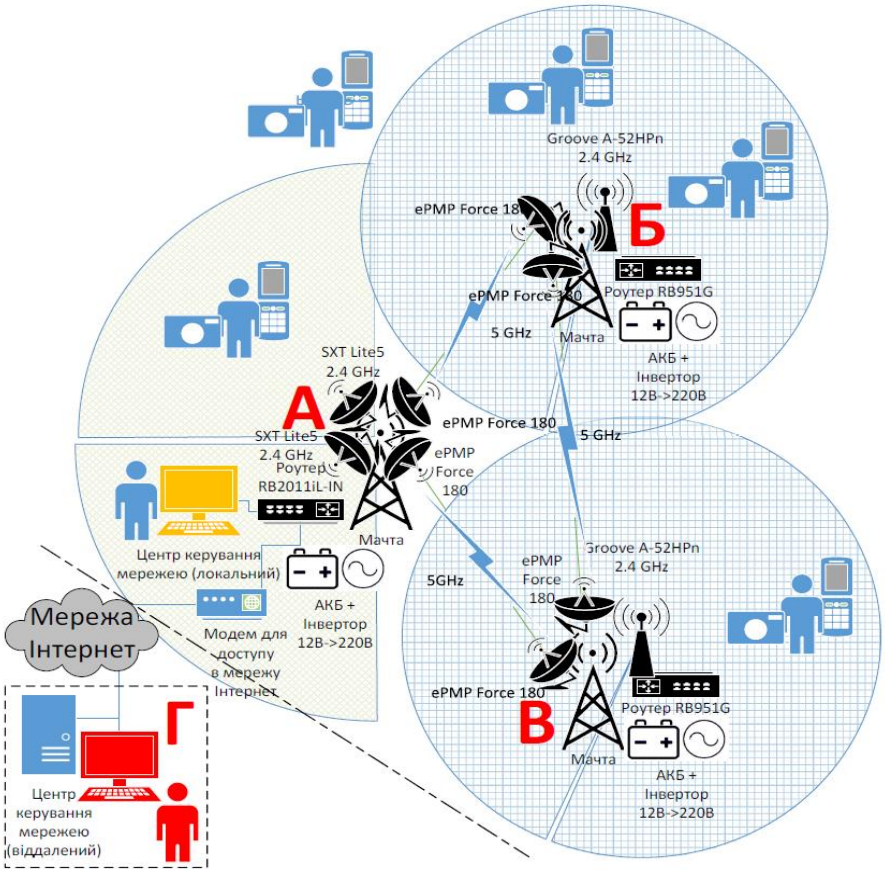


Рис. 1.5 Схема комплексної системи передавання інформації, з наявністю транспортної та розподільчої компонент на основі безпроводових засобів стандарту 802.11xx, та підключенням сенсорів і абонентів сенсорної мережі

Структура сенсорної мережі відповідає умовам досліджень НДР:

НДР №2020-П. Методи та системи управління безпроводовими сенсорними мережами із мобільними сенсорами, телекомунікаційними наземними вузлами та аероплатформами у зоні надзвичайної ситуації

НДР № 2316-П. Інтелектуалізація систем управління високопродуктивними сенсорними мережами на основі використання роботизованих об’єктів та обчислювальної FOG-інфраструктури

Архітектура БСМ включає такі модулі:

• радіотракт;

• процесорний модуль;

• елемент живлення;

• різні датчики.

Характеристики безпроводових сенсорних мереж:

1. Дальність покриття.

Область покриття сенсорної мережі може становити від кількох метрів до кількох кілометрів за рахунок можливості ретрансляції повідомлень від одного елемента до іншого. До складу мотів зазвичай входять автономні мікрокомп'ютери (контролери) з живленням від батарей та приймопередавач, що дозволяє мотам самоорганізовуватися в спеціалізовані мережі, зв'язуючись один з одним і обмінюючись даними за допомогою радіозв'язку. У цьому випадку моти виступають як компоненти бездротових сенсорних мереж. Дані від окремих вузлів передаються по мережі від вузла до вузла на шлюз, і зазвичай опиняються на сервері, що має більш високу обчислювальну потужність.

2. Вихідна потужність.

Одним з головних вимог до БСМ є її автономність, виконати яке можна, забезпечити мінімальне енергоспоживання кожного вузла. У зв'язку з цим вузол БСС повинен споживати гранично малу потужність (50 мкВт і нижче).

Для вирішення даної проблеми використовують такі методи:

- визначення і оптимізація часу включення передачі;
- багатозіркова передача, тобто відправка повідомлень через проміжні вузли замість прямої далекої передачі;
- попередня обробка і скорочення обсягу даних, необхідних для передачі.

Пристрої без внутрішніх джерел живлення можуть отримувати енергію безпосередньо з навколишнього середовища. Деякі пристрої такого роду забезпечені сонячними батареями, інші перетворюють в електроенергію механічні коливання. У випадку з бездротовими пристроями ZigBee найбільш перспективним є використання енергії радіохвиль. Енергоспоживання — ключовий параметр якості роботи БСМ, тому питання про його розрахунку при створенні подібних систем виникає одним з перших.

3. Вид переданого сигналу.

В зв’язку з необхідністю забезпечення максимальної автономності і зменшенням енергоспоживання, при передачі даних між використовуються

сигнали з максимальною енергоефективністю. Варто зауважити, що не має необхідності в передачі великих масивів інформації від сенсору. Тому прикладом такого сигналу може бути сигнал з фазовою маніпуляцією BPSK.

Основними характеристиками БСМ є:

1. розмірність: сотні, тисячі (залежить від області застосування);
2. принципи організації і побудови: самоорганізація мережі, комутація пакетів, кожен вузол може бути маршрутизатором
3. мобільність: мобільні БСМ є окремим випадком MANET;
4. тип і спосіб управлінні: ієрархічний, розподілений;
5. потужність передачі терміналу: визначається типом сенсора;
6. дальність зв'язку: в залежності від потужності та виконання конкретної задачі; швидкість передачі: швидкість передачі в радіоканалі залежить від відстані між абонентами, потужності передавача та інших параметрів фізичного рівня [79].

Застосування сенсорних мереж не обмежене для зв'язку на короткі відстані між Ad-Hoc та користувацькими пристроями через точку доступу (AP). При проектуванні також використовуються стандарти для будівництва магістрального зв’язку (backbone, CB) лінії, яких дозволяють будувати гнучку мережеву архітектуру разом з APs. Перевага такого підходу виражається в наступних функціях [34]:

- будівництво точок безпроводового доступу AP (access point) для користувачів в зоні обслуговування, сотні метрів;
- магістральна мережа (backbone) – зв’язок для підключення віддалених частинах мережі, на десятки кілометрів і більше;
- з'єднання різних елементів мережі (точок доступу, маршрутизаторів, магістралі) на основі єдиного і сумісного обладнання;
- можливість швидкого розгортання і налаштування мережі, як для довгострокового, так і короткострокового використання.

Вказані елементи і характеристики безпроводових мереж дозволяють будувати системи з гнучкою архітектурою, яка може бути корисною для широкого кола користувачів і організацій.

Щоб задовольнити попит як на ємність, так і на покриття безпроводових сенсорних мереж, введена нова парадигма дизайну гетерогенна мережа (HetNet).

Мобільні сенсорні мережі - сенсорні мережі, що самоорганізуються, вузли яких рухливі. Кластер – елемент ієрархії сенсорної мережі, що самоорганізується. Самоорганізовані мережі – мережа, де число вузлів є випадковою величиною у часі і може змінюватися від 0 до деякого значення N_{max}. Взаємозв'язки між вузлами в такій мережі також випадкові в часі і утворюються передачі інформації між подібними вузлами і в мережу зв'язку загального користування.

Ідея гетерогенної мережі полягає в тому, щоб розгорнути кілька менших сот під покриттям макросот. Використання гетерогенних мереж в проектуванні сенсорних мереж дозволяє збільшення пропускної спроможності мережі та розширення покриття. HetNet відноситься до мережі з множинним доступом, коли доступ до різних стандартів радіодоступу здійснюється за допомогою одного і того ж абонентського пристрою (наприклад, LTE з WiFi), і може відноситися до ієрархічних структур сот, в яких використовується кілька класів сот з одним і тим самим стандартом радіодоступу (макросоти з пікосотами).

Ad-Hoc мережі – децентралізовані сенсорні мережі, що самоорганізуються, не мають постійної структури (точка-точка). Mesh-мережі – децентралізовані сенсорні мережі, що самоорганізуються, мають постійну структуру (коміркова мережа).

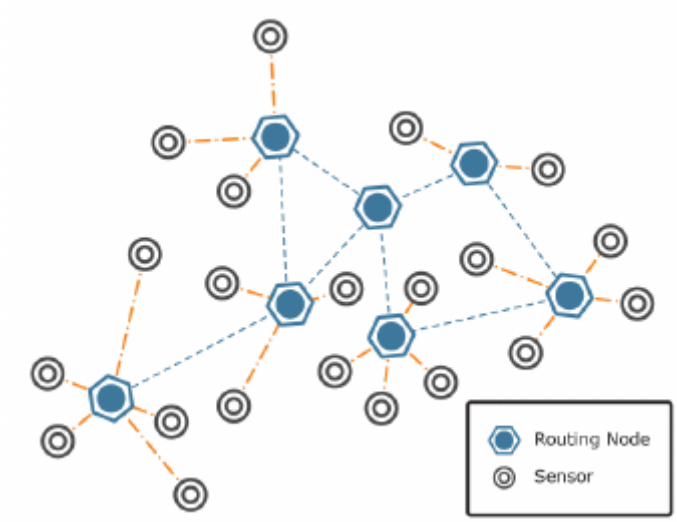


Рис. 1.6 Безпроводова сенсорна мережа Ad-Hoc

1.2 Особливості оцінки продуктивності каналів передачі інформації СТС

Завдання оцінки продуктивності є однією з найважливіших задач при проектуванні бездротових сенсорних мережах. Тут будуть розглянуті особливості оцінки продуктивності каналів передачі інформації сенсорних телекомунікаційних систем.

Сенсори мають наступні характеристики:

- низькоенергетичні умови кінцевого обладнання
- енергоекономічні умови кінцевого обладнання
- короткі повідомлення
- множинний доступ (ШПС и OFDM, TDMA- Frame Relay)
- низьки вимоги до своєчасності
- гетерогенність мережі (СКК), зокрема, безпроводовість
- складна централізована інфраструктура
- гетерогенність та багатонаправленість повідомлень
- задана площина покриття за рахунок безпроводових каналів передачі інформації

При дослідженні оцінки продуктивності каналів в сенсорних мережах слід

керуватися такими факторами:

• Обсяг даних: деяким споживачам потрібно збирати мегабіти даних за секунду, іншим достатньо декількох біт інформації за добу.

• Час відклику: коли пристрій є частиною ланцюга, отримання команди в даний момент є суттєвим критерієм. Необхідний час реакції може становити кілька мікросекунд.

• Надійність відгуку: чи буде повідомлення отримано правильно і яка ймовірність помилки.

• Дистанція зв'язку: чи розташовані вузли мережі на великій території чи зосереджені в одному місці? Дистанція може становити від кількох метрів до кількох кілометрів.

• Число вузлів зв'язку: чи потрібний зв'язок тільки між двома вузлами, чи в ньому бере участь безліч вузлів, що вимагатиме використання більш досконалої структури зв'язку.

- Спосіб розміщення вузлів: детермінований або випадковий.
- Обмежена ємність батарей вузлів: час роботи кожного вузла сильно залежить від ємності його батареї та способів їх функціонування.
- Спосіб збору даних: почасовий спосіб (постійний моніторинг або в задані інтервали часу), на підставі подій, на підставі запиту і гібридний спосіб.
- Гетерогенність функцій сенсорів вузлів: можливість використання різних типів сенсорів в залежності від області застосування (контроль температури, тиску, вологості або виявлення вторгнення в зону, що охороняється).
- Відмовостійкість: вузли можуть вийти з ладу внаслідок відсутності живлення, фізичних пошкоджень, екологічних втручань або втручань супротивника.
- Розмірність: кількість вузлів, розгорнених в заданій області може досягати сотень тисяч або десятків тисяч.
- Динамічна топологія: архітектура сенсорної мережі припускає статичну топологію або динамічну, яка передбачає використання мобільних (наземних або повітряних)сенсорних вузлів.

- Параметри фізичного та канального рівня Еталонної Моделі взаємодії відкритих Систем (ЄМ ВВС): низька пропускна спроможність радіоканалів вузлів (від 1 до 100 кБайт/с) та обмежена дальність радіозв’язку.
- Покриття: кожен сенсор може здійснювати моніторинг певної обмеженої фізичної області.
- Якість обслуговування (Quality of Service, QoS): необхідність передавати різний тип трафіку та відповідні вимоги до необхідного набору параметрів до параметрів маршруту передачі (пропускна спроможність, затримка доставки пакетів та її варіація та ін.) для певного класу трафіка.

1.2.1 Вимоги щодо якості функціонування та продуктивності каналів передачі інформації СТС

У теорії інформації вивчають властивості процесів, які мають місце при передачі інформації на відстань за допомогою сигналів. При цьому важливе значення мають поняття якості і швидкості передачі інформації. Якість передачі інформації тим вище, чим менше спотворення інформації на приймальній стороні. Із збільшенням швидкості передачі інформації потрібно використовувати спеціальні заходи, що перешкоджають втратам інформації та зниженню якості передачі інформації.

У класичній теорії телекомунікацій якість передачі сигналу обумовлюється завадостійкістю каналу зв’язку та визначається достовірністю передачі інформації. Показниками достовірності виступають ймовірність помилки символу в каналі зв'язку p_c і ймовірність помилки інформаційного біта $p_б$.

У сучасних стандартах і рекомендаціях міжнародних організацій у галузі телекомунікацій існує своя ієрархія показників якості безпроводового цифрового каналу зв’язку, не пов’язана з класичною теорією завадостійкості. Наприклад, до таких можна віднести коефіцієнт помилкових блоків, секунд з помилками, секунд з численними помилками, секунд с фоновими помилками.

Відповідно, поняття «якість обслуговування» для безпроводових

сенсорних мереж та його характеристики дещо відрізняються від класичного уявлення [61, 5] і вимагають визначення. Необхідно провести класифікацію завдань, які вирішуються за допомогою безпроводових сенсорних мереж, та встановити відповідні їм вимоги щодо якості обслуговування.

Виділимо характерні для безпроводових сенсорних мереж особливості, які визначаються умовами їх функціонування, що впливають визначення якості обслуговування [81].

- Обмежені ресурси. Оскільки вузол мережі повинен бути мінімізований за розміром і вартістю, він володіє невеликими обчислювальними можливостями, розміром буфера, потужністю передачі, а також обмеженим часом функціонування. У зв'язку з цим одним із завдань якості обслуговування є ефективне використання наявних ресурсів для більш тривалого підтримання функціонування мережі.
- Стійкість. Бездротові сенсорні мережі складаються з великої кількості сенсорів і повинні бути стійкими до змін топології – додавання нового вузла, виходу з ладу або переміщення наявного вузла, перерозподілу за кластерами тощо. доступність мережі.
- Різні види трафіку. Залежно від призначення бездротової сенсорної мережі до переданого трафіку можуть пред'являтися певні вимоги. Наприклад, затримка передачі пакета може грати різну роль різних додатках. Вимоги до якості обслуговування варіюються в залежності від класу завдань.
- Модель передачі. Безпроводова сенсорна мережа може мати одну з трьох моделей передачі даних: вузли передають дані на базову станцію з певним періодом; станція сама ініціює передачу даних, запитуючи інформацію про стан певного вузла або їх групи; вузол посилає пакет даних за певної події.
- Характер збору даних. У бездротових сенсорних мережах дані, отримані від кожного окремо взятого вузла, як правило, не відіграють великої ролі. Зазвичай дані приймаються з кількох датчиків, які розташовані всередині певної області, а передається їхнє усереднене значення. Оскільки ресурси, що витрачаються на передачу даних, порівняно великі, попередня обробка даних

може бути здійснена в самих вузлах для зменшення кількості даних, що передаються. Гарантія доставки окремого пакету має невелике значення для якості обслуговування при зборі інформації з регіону.

- Мобільність. Для деяких програм вузли сенсорної мережі не встановлюються статичними, їх місцезнаходження може змінюватися. Це вносить додаткові складності при маршрутизації, визначенні координат та ін.

Таким чином, якість обслуговування в безпроводових сенсорних мережах – це інтегральна характеристика, яка визначає можливість мережі виконувати збір, обробку та передачу даних за тих чи інших заданих умов (обмеженість ресурсів, мобільність вузлів, модель передачі даних та ін.).

Виділимо критерії, що стосуються передачі даних у безпроводових сенсорних мережах, за якими можна оцінювати якість обслуговування. [81]

Продуктивність. Пропускна здатність мережі, яка визначає кількість даних, які можуть бути передані в одиницю часу, та вимірюється в бітах за секунду. Продуктивність залежить від типу сигналу, енергії, модуляції та ін.

Затримка. Аналізуючи затримку в безпроводових сенсорних мережах, необхідно враховувати використовувану в мережі модель передачі даних. Затримка в бездротових сенсорних мережах залежить від часу передачі та обробки даних на вузлах, а також від алгоритму маршрутизації та механізму доступу до середовища.

Втрати. Втрати пакетів даних у безпроводових сенсорних мережах на канальному рівні можуть виникати через колізій, але в рівні маршрутизації – через неправильно побудованого маршруту чи виході з ладу будь-якого вузла. Втрати виражаються через відношення втрачених пакетів до загальної кількості.

Час життя мережі. Один з параметрів якості обслуговування для бездротових безпроводових мереж – час, протягом якого мережа зможе забезпечувати передачу даних. Оскільки час роботи датчиків обмежений, необхідно мінімізувати витрати при встановленні мережі, обробці і, що особливо важливо, при передачі даних. На енергетичні витрати впливають енергія сигналу, обсяг даних, режим роботи каналу (сплячий або активний режим роботи

сенсора) та ін.

Покриття заданої області. Якість обслуговування безпроводової сенсорної мережі оцінюється щодо того, яка частина області, з якою збираються дані чи ведеться контроль, перебуває у радіусі дії сенсорів. Таким чином визначається повнота інформації, яку потенційно має система. Цей параметр може бути виражений у кількості n сенсорів, необхідних покриття області площею S з мінімально допустимим рівнем сигналу.

Стійкість до зміни топології. Як уже згадувалося, безпроводова сенсорна мережа повинна функціонувати в умовах зміни топології: при виході вузла з ладу, після закінчення терміну його дії, при додаванні нових або переміщенні існуючих вузлів. Для безпроводових сенсорних мереж стійкість є одним з основних критеріїв якості обслуговування, оскільки вони можуть бути розподілені таким чином, що контроль кожного вузла, заміна батареї або ремонт неможливі або сильно ускладнені.

Забезпечення якості обслуговування залежить від особливостей протоколу кожному рівні мережевої моделі [49]: фізично якість обслуговування залежить від рівня шуму, енергії сигналу, модуляції, кодування та ін., на канальному – від часу доступу до середовища та надійності доставки пакетів.

Якість обслуговування в безпроводових сенсорних мережах визначається здатністю мережі забезпечити певний рівень сервісу по збору, обробці та передачі даних у заданих умовах. Для ефективного використання безпроводових сенсорних мереж необхідно застосовувати технології, що дозволяють забезпечити необхідний рівень якості обслуговування. З цією метою було визначено характеристики якості обслуговування, суттєві для бездротових сенсорних мереж, та проаналізовано їхню залежність від використання технологій та протоколів на тих чи інших рівнях мережної моделі. Залежно від специфіки завдання пріоритетними є ті чи інші показники якості обслуговування. Проведена класифікація задач дозволяє визначити необхідний клас обслуговування для кожної конкретної задачі, що вирішується за допомогою бездротових сенсорних мереж.

1.2.2 Взаємозв'язок показників достовірності та продуктивності каналів передачі інформації СТС

Основним функціональним призначенням будь-якої системи електрозв'язку є передача інформації за допомогою електричних сигналів. У процесі передачі каналами електрозв'язку сигнали піддаються численним перетворенням, які суттєво змінюють їхні фізичні характеристики.

Припустимо, що на вхід каналу зв'язку можна подавати сигнали від різних джерел, які характеризуються різними розподілами ймовірностей $p_{\text{пом}}(X)$. Кожне з таких джерел передає каналом деяку кількість інформації. Максимальне за всіма багатовимірними розподілами ймовірностей вихідного сигналу $p_{\text{пом}}$ (X) значення швидкості передачі інформації каналом зв'язку при відповідному узгодженні джерела з каналом називається *пропускною здатністю:*

$$C = \max_{p(X)} V_i = max\left[\lim_{T\to\infty} \frac{I(X,Y)}{T}\right], \tag{1.1}$$

або

$$C = \max_{p(X)} \frac{1}{n\tau_i}\big(H(X) - H(X/Y)\big) = \max_{p(X)} \frac{V_c}{n}\big(H(Y) - H(Y/X)\big). \tag{1.2}$$

Пропускна здатність M-позиційного каналу зв'язку із завадами дорівнює

$$C = V_c\left[\log_2 M + p_{\text{сим}} \log_2 \frac{p_{\text{сим}}}{M-1} + (1 - p_{\text{сим}}) \log_2(1 - p_{\text{сим}})\right]. \tag{1.3}$$

Для двійкового каналу зв'язку (M = 2):

$$C = V_c[1 + p_{\text{сим}} \log_2 p_{\text{сим}} + (1 - p_{\text{сим}}) \log_2(1 - p_{\text{сим}})]. \tag{1.4}$$

З (1.2) – (1.4) випливає, що пропускна здатність каналу цілком визначається основою коду M, швидкістю передачі символів V_c та ймовірністю помилкового прийому символів $p_{\text{сим}}$. [82]

Під продуктивністю джерела дискретних повідомлень розуміють кількість інформації, що створюється за одиницю часу:

$$R = \frac{H(X)}{T_{\text{дж}}} = V_s H(X), \tag{1.5}$$

де V_s – швидкість формування дискретних символів,

$T_{дж}$ – середній час, відведений на передачу одного символу.

$$R = V_S[1 + p_{біт}\log_2 p_{біт} + (1 - p_{біт})\log_2(1 - p_{біт})], \quad (1.6)$$

де V_S – швидкість формування символів;

$p_{біт}$ – ймовірність бітової помилки.

Очевидно, що ніяке джерело не здатне передати каналом зв'язку кількість інформації більшу ніж C, тому що пропускна здатність визначає гранично можливу швидкість передачі інформації, тобто виконується нерівність:

$$\frac{H(X)}{T_{дж}} = R < C. \quad (1.7)$$

Нерівність (1.7) відображає основну теорему Шеннона, яка формулюється наступним чином: якщо продуктивність джерела R менша пропускної здатності C за одиницю часу дискретного каналу з завадами, то існує спосіб кодування та декодування джерела та каналу, при якому повідомлення передаються отримувачу з як завгодно малою ймовірністю помилки і в середньому без зростаючих затримок у часі. Якщо $R > C$, то такого способу кодування не існує. Важливою особливістю теореми Шеннона є та обставина, що вона не розглядає практичні способи реалізації процедур кодування та декодування [72].

Оцінка пропускної здатності та продуктивності проводиться в умовах поступового збільшення швидкості передачі символів. Розглянемо завадостійкість каналів передачі дискретних повідомлень. Потенційна завадостійкість оцінюється мінімально можливим значенням ймовірності помилки p у каналі передачі зі сталими параметрами при впливі флуктуаційної завади типу білого гауссового шуму (БГШ).

Наведемо формули для знаходження ймовірності помилки при когерентному способі обробки сигналів.

Вираз для ймовірності помилки при ФМ-2 має вигляд:

$$p_{сим\ ФМ-2} = \frac{1}{2}\left[1 - \Phi\left(\sqrt{2h^2}\right)\right], \quad (1.8)$$

де *Ф(x)* – інтеграл ймовірності або функція Крампа.

При прийманні багатопозиційних сигналів розрізняють помилку приймання символу на виході демодулятора (який містить M символів джерела

у M – позиційному сигналі) та помилку приймання символу на виході декодера (власне поодинокого символу джерела). При прийомі бінарних сигналів ці помилки збігаються.

Ймовірність помилки символу багатопозиційного сигналу на виході демодулятора при QPSK визначається за формулою:

$$p_{\text{сим QPSK}} = \frac{3}{4} - \frac{1}{2}\Phi\left(\sqrt{h^2}\right) - \frac{1}{4}\Phi^2\left(\sqrt{h^2}\right), \quad (1.9)$$

а ймовірність помилки символу джерела (біта) для цього випадку становить:

$$p_{\text{біт QPSK}}(h^2) = \frac{1}{2}\left[1 - \Phi\left(\sqrt{2h^2}\cos\frac{\pi}{4}\right)\right]. \quad (1.10)$$

Розглянемо, як саме ймовірність помилки залежить від швидкості передачі символів. Для прикладу оберемо фазову маніпуляцію. З (1.8) відомо, як розраховується ймовірність помилки для ФМ-2. α візьмемо рівним 32 $с^{-1}$. Розглянемо графік зміни ймовірності помилки при зміні швидкості передачі символів у діапазоні $0 < V_C < 1000$ біт/с:

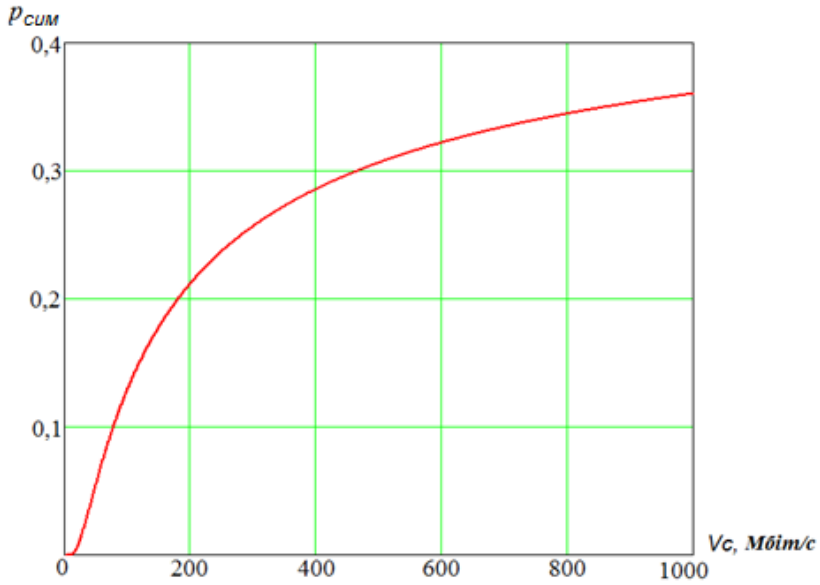


Рис. 1.7 Зміна ймовірності помилки при зміні швидкості передачі символів для ФМ-2 при когерентному способі обробки сигналів

Ймовірність помилки має логарифмічний характер зміни. При збільшенні V_C графік наближається до значення $p_{сим}=0,4$.

Розглянемо випадок передачі багатопозиційного сигналу, а саме QPSK. Ймовірність помилки на виході демодулятора (символьна помилка) знаходиться

за формулою (1.9), а ймовірність бітової помилки – за формулою (1.10).

Побудуємо сумісний графік цих ймовірностей помилок при аналогічних попереднім випадкам вихідних даних.

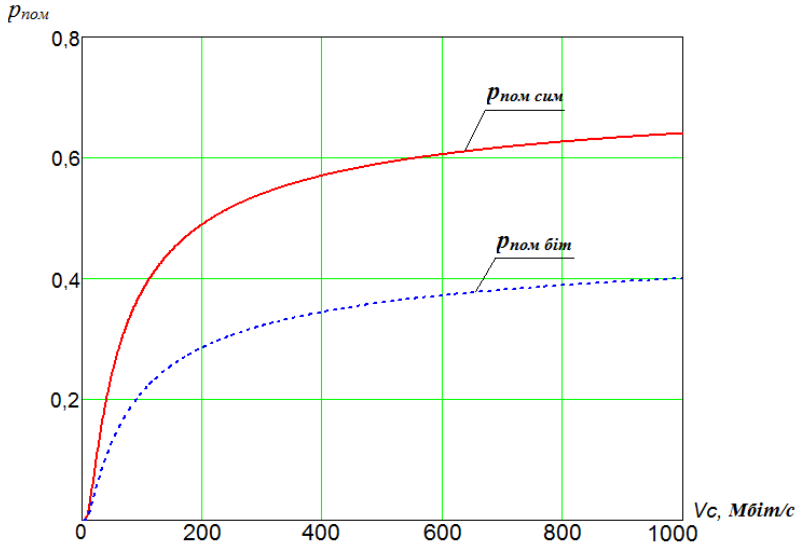


Рис. 1.8 Зміна ймовірності помилки при зміні швидкості передачі символів для QPSK

Бачимо, що зі збільшенням швидкості передачі символів збільшується й символьна, й бітова ймовірності помилки. Проте при фіксованому значенні швидкості V_C бітова помилка менша за символьну.

1.2.3 Методика оцінки продуктивності каналів передачі інформації при використанні сигнально-кодових конструкцій.

Сигнально-кодові конструкції (СКК) протягом кількох останніх років є об'єктом інтенсивного теоретичного дослідження. У той самий час вони швидко знаходять практичне застосування у реальних системах зв'язку. Причина такого пильного інтересу теоретиків і практиків до цих конструкцій – необхідність одночасного підвищення і надійності, і швидкості передачі при суттєвих обмеженнях на енергетику і смугу частот.

Як зазначалося в попередньому розділі, при заданій енергетиці каналу і передачі інформації можна знайти завадостійкий код, який забезпечив би

передачу інформації із заданою необхідною достовірністю. У разі застосування СКК, додається ступінь багатопозиційної маніпуляції, яка робить свій внесок у зміну завадостійкості каналу зв'язку. При цьому досягаються нові величини продуктивності та пропускної здатності каналу зв'язку.

Вихідними даними задачі формування сигнально-кодових конструкцій, які забезпечують максимальне наближення продуктивності джерела повідомлень до пропускної здатності є наступні параметри:

1. h^2 – енергетичний параметр каналу зв’язку в точці прийому, який залежить від потужності сигналу в точці прийому P_S, спектральної щільності завади N та швидкості передачі символів джерела повідомлень V_C;
2. ΔF – полоса частот переданого сигналу;
3. P – необхідна достовірність передачі даних, визначається ймовірністю помилки на виході декодера.

В основі методики, що розробляється, основним критерієм вибору найкращого поєднання СКК буде інформаційний показник – продуктивність. При однакових ресурсах – частотному і енергетичному, буде вибиратися оптимальний набір маніпуляції та блочного коду, для забезпечення найбільшої продуктивності.

Критерієм оптимальності СКК є досягнення максимуму інформаційної ефективності. Оскільки h^2 є вихідним параметром і не може бути зміненим, то інструментом підвищення інформаційної ефективності є теорія завадостійкого кодування, що дозволяє задовільнити вимоги до достовірності прийому, а з іншого боку, теорія потенційної завадостійкості, що дозволяє збільшувати інформаційну ємність одного символу.

1.3 Критерії та показники оцінки ефективності функціонування СТС з багатопозиційними сигналами

Основними параметрами ресурсу системи, яку вона може використовувати для передачі повідомлень, є: і достовірність прийому символів P_b при відомій

швидкості передачі сигналів, смуга частот F, а також потужність сигналу P_c у точці прийому, у тому числі відношення $\alpha = P_c/N_0$, де N_0 – спектральна щільність шуму.

В якості показників, що використовуються для порівняння телекомунікаційних систем на фізичному рівні, проф. Зюко О.Г. запропоновано [72] коефіцієнти енергетичної β та частотної ефективності γ, які кількісно дають оцінку питомої енергетичної та частотної ефективності систем передачі інформації (СПІ):

$$\beta = \frac{R}{\alpha}, \gamma = \frac{R}{F}, \tag{1.11}$$

α – відношення потужності сигналу до спектральної густини шуму, F- смуга частот каналу, які надається, R – швидкість передачі символів.

Як узагальнений показник ефективності СПІ вводиться коефіцієнт використання пропускної здатності безперервного каналу (інформаційна ефективність):

$$\eta = \frac{R}{C} = \frac{F_m \, log(1+gQ)}{F_m k \, log(1+Q)} = \frac{\gamma}{log(1+Q)} = \frac{\gamma}{log\left(1+\frac{\gamma}{\beta}\right)}, \tag{1.12}$$

де C – пропускна здатність безперервного каналу, g(M) = q / Q – виграш модуляції, Q =α/ F = Pс/Pш – відношення потужності сигналу до потужності шуму на вході демодулятора, q – відношення потужності сигналу до потужності шуму на виході демодулятора; k = F/Fm – відношення смуг частот на вході та виході приймача при заданому вигляді модуляції.

$$C = F \, log(1+Q) = F_m k \, log(1+Q). \tag{1.13}$$

Тоді

$$\eta = \frac{\gamma}{log\left(\frac{\gamma}{\beta}+1\right)}, \tag{1.14}$$

$$\gamma = \frac{R}{F} = \frac{F_m \, log(1+gQ)}{F_m k} = \frac{log(1+gQ)}{k} \gamma = \frac{\mathrm{R}}{\mathrm{F}} = \frac{\mathrm{F_m log(1+gQ)}}{\mathrm{F_m k}} = \frac{\mathrm{log(1+gQ)}}{\mathrm{k}}, \tag{1.15}$$

- частотна ефективність для безперервного каналу,

$$\beta = \frac{R}{\alpha} = \frac{F_m \, log(1+gQ)}{QF_m k} = \frac{log(1+gQ)}{Qk} = \frac{\gamma}{Q}, \tag{1.16}$$

- енергетична ефективність безперервного каналу.

Відповідно до теореми Шенона при відповідних способах передачі (кодування та модуляції) і прийому (демодуляції та декодування) значення η_{max} може бути близьким до одиниці. При цьому значення помилки можуть бути скільки завгодно малим. В такому випадку, з умови η=1 [72] запропонована наступна гранична залежність між β і γ:

$$\beta = \frac{\gamma}{2^{\gamma}-1}. \tag{1.17}$$

Методика побудови межі Шенона та визначення координат точок систем, що використовуються, наведена у площині енергетичної та частотної ефективності.

Формула (1.17) є граничною і показує найкращий обмін між β і γ. Слід зауважити, що γ- ефективність може змінюватись у широких межах (від 0 до ∞), в той час як β – ефективність обмежена зверху: $\beta_{max} = 1/\ln 2$ при $F \to \infty$

Отримана номограма дозволяє провести вибір за однією із двох стратегій: максимізувати β при $P_b = const$, або отримати максимальний γ при $P_b = const$, тобто дозволяє проводити порівняння систем між собою за принципом «найкраща за частотною ефективністю» або «найкраща за енергетичною ефективністю» система в порівнянні з іншою системою [71].

У той же час, порівняння систем за узагальненим показником інформаційної ефективності η є проблематичним. Тому, одним із завдань модифікації існуючої методики є введення шкали узагальненої ефективності для визначення її числових значень в області яка обмежена межею Шенона [71].

Наступним обмеженням відомої методики є порівняння систем за єдиного значення достовірності помилки. При цьому наведене відображення не дає повного уявлення про вплив цього параметра. Тому другим завданням є розширення діапазону параметрів, що відображаються (достовірності помилки) при оцінці інформаційної ефективності різних систем.

Третє завдання випливає із штучного використання площини відображення {β; γ} для оцінки інформаційних можливостей безперервних та дискретних сигналів.

Побудуємо еквіпотенційні криві, які відображали б точки з однаковою інформаційною ефективністю безперервного каналу. Для цього скористаємося формулою (1.14), де замість інформаційної ефективності підставимо значення 0,5; 0,25; 0,125; 0,0625. Результати подано на Рис. 1.9.

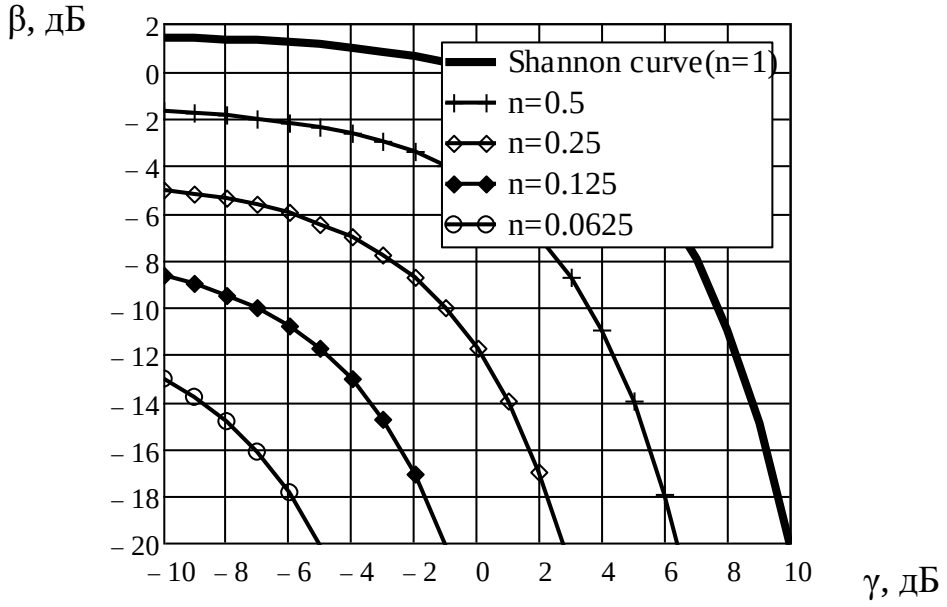


Рис. 1.9 Границя Шенона та еквіпотенційні криві, що відображають рівну інформаційну ефективність

Згідно із запропонованою шкалою інформаційна ефективність зростає з наближенням до межі Шенона, де вона наближається до 1.

При цьому слід зауважити, що однакова інформаційна ефективність може бути досягнута як за низької частотної ефективності, чи за низьких показників енергетичної ефективності. Отже, автономно розглядати параметри інформаційної ефективності не доцільно, а сумісно з іншими показниками ефективності.

1.4 Цілі і постановка задачі дослідження

Метою даної дисертації є визначення шляхів підвищення продуктивності на основі моделей оцінки якості та продуктивності каналів передачі інформації СТС, покликаних вирішити проблему безпроводового доступу для

низькоенергетичних сенсорних мереж передачі даних.

Для вирішення даної задачі, необхідно зробити оцінку безпроводових низькоенергетичних систем в умовах низької енергетики – оцінити ефективність і енергетичні характеристики каналу зв’язку для ШСС та ВСС сигналів.

В літературі ШСС розглядається як один з методів підвищення завадостійкості, однак дослідження властивостей таких сигналів в умовах низької енергетики – не досліджено. Тому для визначення доцільності використання ШСС, необхідно побудувати модель оцінки каналів передачі інформації та порівняти характеристики завадостійкості з ВСС та еквівалентною енергією сигналу.

Пропонується розглянути характеристики сигнали багатопозиційної маніпуляції BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM в умовах низької енергетики, та порівняти ефективність використання СКК та ШСС.

Класичні формули для оцінки завадостійкості багатопозиційних сигналів достовірні для високої енергетики, однак для $h^2 \to 0$ не є точними. Тому для точного визначення достовірності прийому для таких умов, пропонується використання векторно-фазового методу. Векторно-фазовий метод отримати точні розрахунки при будь-якій енергетиці, на відміну від формул Прокіса, що можуть використовуватись тільки для високої енергетики.

Взаємозв'язок між достовірністю прийому канальних символів (ймовірністю помилки символу P_S) і достовірністю прийому символів джерела (ймовірністю помилки біта P_b) досить складна. У даній роботі такий взаємозв'язок розкритий для того, щоб використовувати показники достовірності саме символів джерела (P_b) для оцінки ефективності систем безпроводового зв’язку.

Після отримання показників достовірності сигналів, необхідно дослідити показників продуктивності в умовах низької енергетики. Для цього пропонується використати показники ефективності, що запропоновані проф. Зюко А. Р.. Однак порівняння систем за узагальненим показником інформаційної ефективності η з використанням єдиної границі для $\eta = 1$ є

недостатньо повним і об'єктивним. Тому пропонується модифікувати існуючу методику і відобразити відобразити ефективність викорситання сигналів на додатковій шкалі відношення сигнал-шум, накладеної на простір частотної, енергетичної та узагальненої (інформаційної) ефективності.

За отриманими показниками необхідно оцінити вплив використання широкосмугових сигналів на показники функціонування, а також обробка результатів досліджень та формування пропозицій щодо їх впровадження та подальшого використання.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Дослідження, проектування і побудова безпроводових сенсорних мереж (БСМ) є актуальним напрямом розвитку у галузі телекомунікацій сьогоднішній день. Сенсорні мережі займають ключову роль у разі необхідності оперативного розгортання, мобільності, гнучкості організації мережі і широті можливих додатків, у багатьох випадках будучи єдиним економічно виправданим рішенням.
2. Однією із ключових задач побудови сенсорної мережі є достовірна оцінка енергетичних характеристик безпроводового каналу зв’язку та підвищення продуктивності низькоенергетичних безпроводових каналів передачі інформації сенсорних телекомунікаційних систем. Це дозволить проектувати СТС із використанням теоретичної моделі оцінки енергетичних параметрів безпроводового каналу зв’язку з високою точністю, без попереднього тестування в польових умовах, та значним зниженням ризику необхідності залучення додаткових матеріальних ресурсів на доробку та покращення роботи мережі згідно поставлених задач.
3. Однією з головних вимог до БСМ є її автономність, виконати яке можна, забезпечити мінімальне енергоспоживання кожного вузла. В зв’язку з необхідністю забезпечення максимальної автономності і зменшенням

енергоспоживання, при передачі даних між використовуються сигнали з максимальною енергоефективністю.

4. У першому розділі розглянуто основи побудови БСМ, зроблено огляд архітектури та проведений аналіз факторів, які необхідно враховувати при досліджені оцінки продуктивності каналів в сенсорних мережах. Визначено вимоги щодо якості функціонування та продуктивності каналів передачі інформації СТС, а також взаємозв’язок показників достовірності та продуктивності каналів передачі інформації СТС.
5. Описано ціль та зроблено постановку задачі підвищення продуктивності низькоенергетичних безпроводових каналів передачі інформації сенсорних телекомунікаційних систем, вказано об’єкт, предмет, вхідні і вихідні дані для дослідження.
6. Тому першим кроком є дослідження властивостей широкосмугових сигналів зв’язку в умова низької енергетики, та визначення доцільності використання ШПС в СТС, що досліджується в розділі 2.

2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ (ШСС) В УМОВАХ НИЗЬКОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

2.1. Дослідження властивостей ШСС

Вирішення низки проблем розвитку радіотехнічних систем різного призначення призвело до ідеї широкосмугових сигналів (ШСС). У вітчизняній та зарубіжній науці достатнього досліджені окремо умови використання ШСС, але немає досліджень властивостей цих сигналів в умовах низької енергетики. До того ж, тематика досягнення необхідної достовірності в низькоенергетичних каналах не досліджено. Тому тема дослідження є актуальною.

Перша проблема стала на шляху розвитку радіолокаційних систем. Вона полягала в нерозв'язних протиріччях між вимогами високої роздільної здатності по дальності і дальністю виявлення цілей в імпульсних РЛС, бажанням збільшити дальність виявлення цілей при обмеженнях на пікову потужність передавача. Оригінальне вирішення перелічених протиріч було запропоновано Ф. Вудвордом [70].

Він показав, що форма сигналу є додатковим параметром при розробці радіолокатора. Тривалість сигналу може бути обрана настільки великою, наскільки це необхідно для забезпечення енергетичних вимог при фіксованій пікової потужності передавача, а дозвіл за дальністю і точність вимірювань визначаються шириною смуги частот сигналу. Вони забезпечуються шляхом стиснення імпульсу приймальній стороні [70].

Таким чином, Ф. Вудворд сформулював два основні принципи:

1. Зондуючий імпульс радіолокатора повинен мати складну внутрішню структуру, добуток ширини спектра F на тривалість елементу сигнала T багато більше одиниці, тобто база сигналу B:

$$B = FT >> 1. \tag{2.1}$$

2. Принцип стиснення імпульсу. Внутрішня структура зондувального сигналу повинна бути такою, щоб допускати на приймальній стороні стиснення

розподіленого в часі сигналу в короткий імпульс, що відповідає смузі F. Сигнали, що задовольняють цим двом вимогам, отримали назву складних широкосмугових сигналів.

Інша проблема пов'язана з розвитком систем передачі інформації. Тут виник конфлікт між бажанням, з одного боку, передати з граничною швидкістю якнайбільше інформації, а з іншого боку забезпечити високу достовірність прийому. Принципове вирішення цієї суперечності належить К. Шеннону, який ввів поняття пропускної спроможності каналу C і показав:

$$C = F \cdot log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right), \tag{2.2}$$

де F – смуга частот, що відводиться передачі інформації, F=1/T, S і N – потужності сигналу та шуму, відповідно. Слід зазначити, що з S/N << 1 формула (2.2) перетворюється на (2.1). Дійсно, співвідношення (2.2) можна переписати у такому вигляді:

$$\frac{1}{log_2\left(1+\frac{S}{N}\right)} = F \cdot T. \tag{2.3}$$

При $\frac{S}{N} << 1$ ліва частина рівності спрямовується до нескінченності, що рівносильно (4.1). Таким чином, застосування складних широкосмугових сигналів дозволяє забезпечити теоретично будь-яку достовірністьність передачі інформації.

Звідси випливає ще одна дуже важлива властивість систем з ШСС – здатність працювати «під шумами» (S << N). З одного боку, це скритність роботи радіотехнічної системи, з іншого – можливість ущільнення діючих каналів зв'язку і передачі інформації. Отже, найбільш серйозні проблеми радіолокації, передачі інформації та зв'язку вирішуються складних широкосмугових сигналів.

Широке застосування отримали дискретно-кодові сигнали (ДКС), в яких параметри, що маніпулюються (амплітуда, фаза і частота) змінюються через строго фіксовані інтервали часу (такти). Такі сигнали формуються та обробляються на базі сучасної цифрової обчислювальної техніки. Закон зміни маніпулюваного параметра в ДКС задається дискретно-кодованими послідовностями (ДКП), які повністю визначають властивості ДКС і часто

ототожнюються з ними. Тому увага дослідників ШСС виявилася сфокусованою на аналізі, синтезі та обробці ДКП [70]. Відомі послідовності Баркера, Хаффмена, Зінгера, Голда, Касамі, Холла, Френка, Велті, Костаса та ін, в яких правило кодування (ПК) ототожнюється з прізвищем його автора або автора різної множини, покладеної в основу ПК.

З літератури [68, 85] відомо, що одним із запропонованих методів підвищення завадостійкості є застосування систем з широкосмуговими сигналами. Пояснюється це тим, що широкосмуговий радіозв'язок в порівнянні зі вузькосмуговими сигналами (ВСС) має багато цінних (особливо для військової радіозв'язку) властивостей: високою достовірністю передачі інформації в каналах з багатопроменевим поширенням і в перевантажених ділянках діапазону, більшою стійкістю по відношенню до прицільних перешкод і кращою скритністю.

Також відомо, що ШСС можуть забезпечити високу достовірність прийому з невеликими коливаннями ймовірності помилок, в той час як при ВСС іноді (при відсутності перешкоди на даній частоті) достовірність зв'язку буде дуже високою, а іноді дуже низькою. Це обумовлено тим, що в смузі частот вузькосмугового сигналу спектральна щільність перешкод може сильно флуктувати, а в смузі частот ШСС вона змінюється мало. З розширенням смуги відбувається усереднення діючих в цій смузі перешкод. [85]

Метою є визначення властивостей ШСС на основі моделей оцінки якості каналів зв’язку, а також порівняти характеристики завадостійкості з ВСС та еквівалентною енергією сигналу.

В багатьох випадках зручно представити ШСС як сигнальну конструкцію, що складається із певної кількості n «елементів» $S_e(t)$, кожен з яких може розглядатися як простий сигнал тривалістю T з власним значенням амплітуди, фази або частоти.

Якщо джерело повідомлень формує символи тривалістю τ_S , відповідно, із швидкістю $V_S = 1/\tau_S$, то при заданій потужності сигналу в точці прийому P_C енергетичний фактор h^2 для ВСС складає:

$$h^2 = \frac{E_S}{N_0} = \frac{P_C \cdot \tau_S}{N_0}. \quad (2.4)$$

Відповідно, такий сигнал займає смугу частот $\Delta F_C \approx V_S$.

Якщо енергію ВСС поділити між n елементами ШСС з такою ж потужністю, то тривалість елемента складатиме: $T = \tau_S / n$, а смуга частот сигналу:

$$\Delta F \approx \frac{1}{\mathrm{T}} = n \cdot \left(\frac{1}{\tau S}\right) \approx n \cdot \Delta FC. \quad (2.5)$$

Добуток $\Delta F \cdot T = B$ має назву бази ШСС и чисельно співпадає з $n = B$. Результуюча енергія всіх n «елементів» S_e(t) дорівнює енергії ВСС E_S.

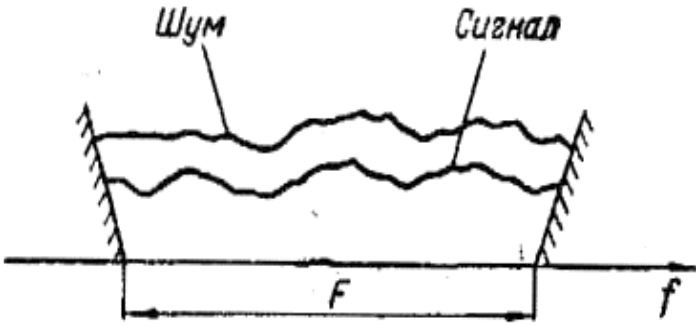


Рис. 2.1 Прийом ШСС при потужності сигналу, меншої від потужності флуктуаційних перешкод у використовуваній смузі частот.

Широкосмуговими сигналами (ШСС) називають такі сигнали, у яких добуток ширини спектра F на тривалість елементу сигнала T багато більше одиниці. Для широкосмугових сигналів характерним база сигнала **значно більше одиниці** (частіше значення В досягає 1000 і більше).

Отже, широкосмугові сигнали можна розглядати як похідні від відповідних вузькосмугових сигналів з рівною еквівалентною енергією. Відношення сигнал-шум h^2 для вузькосмугового сигналу ділиться на B для кожного окремого символу ШСС S_e(t): $h_e^2 = h^2/ B$. Саме це є фактором скритності ШСС.

В основу ШПС покладено регулярні правила їх формування, які, з одного боку, забезпечують тимчасові та кореляційні характеристики, близькі до характеристик флуктуаційного шуму, а з іншого – забезпечують простоту

технічної реалізації пристроїв формування та обробки ШПС, наприклад формування ШПС у класі циклічних сигналів.

Зазначимо можливості, які відкривають ШПС у безпроводових каналах зв’язку [78]:

Кодове розділення (селекція) сигналів. Кожен сигнал з ансамблю ШПС займає, як правило, ту саму смугу частот і має хороші кореляційні властивості. При цьому сигнали ансамблю відрізняються формою. Отже, селекція сигналів формою (коду) є новим видом селекції, що узагальнює амплітудну, частотну, фазову та імпульсну селекції. Аналіз широкосмугових систем радіозв'язку показує, що максимально допустиме число одночасно працюючих радіостанцій в даному діапазоні практично те ж, що і при традиційному поділі цього діапазону на частотні канали і селекції їх за допомогою частотних фільтрів.

Боротьба з багатопроменевістю. Наявність багатопроменевого поширення призводить до спотворення сигналів, що ускладнює прийом і знижує достовірність передачі інформації. Спроби подолання шкідливого впливу багатопроменевості вирішуються вже давно. До них можна віднести рознесений прийом, селекцію сигналів за часом і кутом приходу, коригувальне кодування і деякі інші методи. ШСС завдяки своїм хорошим кореляційним властивостям може бути «згорнутий» (або стиснутий) у вузький імпульс, тривалість якого обернено пропорційно використовуваній ширині смуги частот — τ_s=1/ ΔF . Отже, вибираючи таку смугу сигналу, щоб тривалість стисненого імпульсу була менше часу запізнення променів – τ_s<$\tau_{\text{зап}}$, можна здійснити роздільний прийом одного або ряду променів, що запізнюються, при цьому, підсумовуючи їх енергію, можна підвищити завадостійкість прийому ШСС. Тим самим зазначена проблема набуває принципового вирішення.

Завадостійкість. ШСС дозволяють підвищити завадостійкість широкосмугових систем зв'язку.

Електромагнітна сумісність. ШСС забезпечують хорошу електромагнітну сумісність широкосмугових та вузькосмугових систем зв'язку. У цьому випадку уражені вузькосмуговими радіостанціями ділянки спектра

вирізаються (оператором або автоматом). Теоретичні та експериментальні дослідження показують, що виключення половини смуги частот ШСС, не порушує нормальної роботи системи. Цим і забезпечується ефективна боротьба широкосмугових систем з потужними вузькосмуговими перешкодами.

Адаптивні властивості. Цікавою особливістю системи зв'язку з ШСС є її адаптивні властивості – із зменшенням числа запізнюваних променів, при цьому, підсумовуючи їх енергію, можна підвищити завадостійкість прийому шумоподібних сигналів. Тим самим зазначена проблема набуває принципового вирішення.

Надлишковість. Надлишковість ШСС використовується для надання сигналам спеціальної структури, яка дозволяє зменшити складність технічної реалізації пристроїв їх формування та обробки, а також забезпечує ряд допоміжних властивостей, наприклад властивість самосинхронізації та ін. При обробці ШСС реалізується метод прийому в цілому всього сигналу за допомогою корелятора або узгодженого фільтра, в іншому випадку втрачаються кореляційні властивості ШСС. Обробка ШСС полягає у накопиченні відомостей про всі елементи корисного сигналу з урахуванням їхнього взаємозв'язку. Як правило, структура сигналу заздалегідь відома в місці прийому, при цьому структура завад, відрізняється від структури корисного сигналу, тому при обробці корисного сигналу елементи завад в середньому взаємокомпенсуються.

2.2. Розробка методики оцінки граничних показників достовірності ШСС

Розглянемо показники завадостійкості системи ШСС з активною паузою і протилежними сигналами, як одну із найбільш завадостійких [85]. Будемо вважати, що генератор шуму передавального пристрою генерує нормальний шум з рівномірним спектром в полосі частот F, а на вхід приймального пристрою, крім корисного сигналу, поступає адитивна завада в виді нормального білого шуму в смузі частот корисного сигналу.

Тоді вираз для залежності ймовірності помилки інформаційного біта p_b від

відношення потужності сигнал/шум (параметра h^2) у автокореляційній системі з активною паузою і протилежними сигналами має вигляд [85]:

$$P_b\,(h^2) = \frac{1}{2}\left[1 - \Phi\left(\frac{h^2}{\sqrt{\frac{5h^4}{2FT} + 4h^2 + 2FT}}\right)\right]. \tag{2.6}$$

Для порівняння показників ШСС з показниками достовірності ВСС при побудови графіків для сигналу з фазовою маніпуляцією, скористаємося співвідношенням [28]:

$$P_{b\,PSK}(h^2) = \frac{1}{2}\left[1 - \Phi(\sqrt{2h^2})\right]. \tag{2.7}$$

Відповідно до формул, побудуємо графіки залежності ймовірності бітової помилки p_b від енергетичного потенціалу в радіолінії h^2.

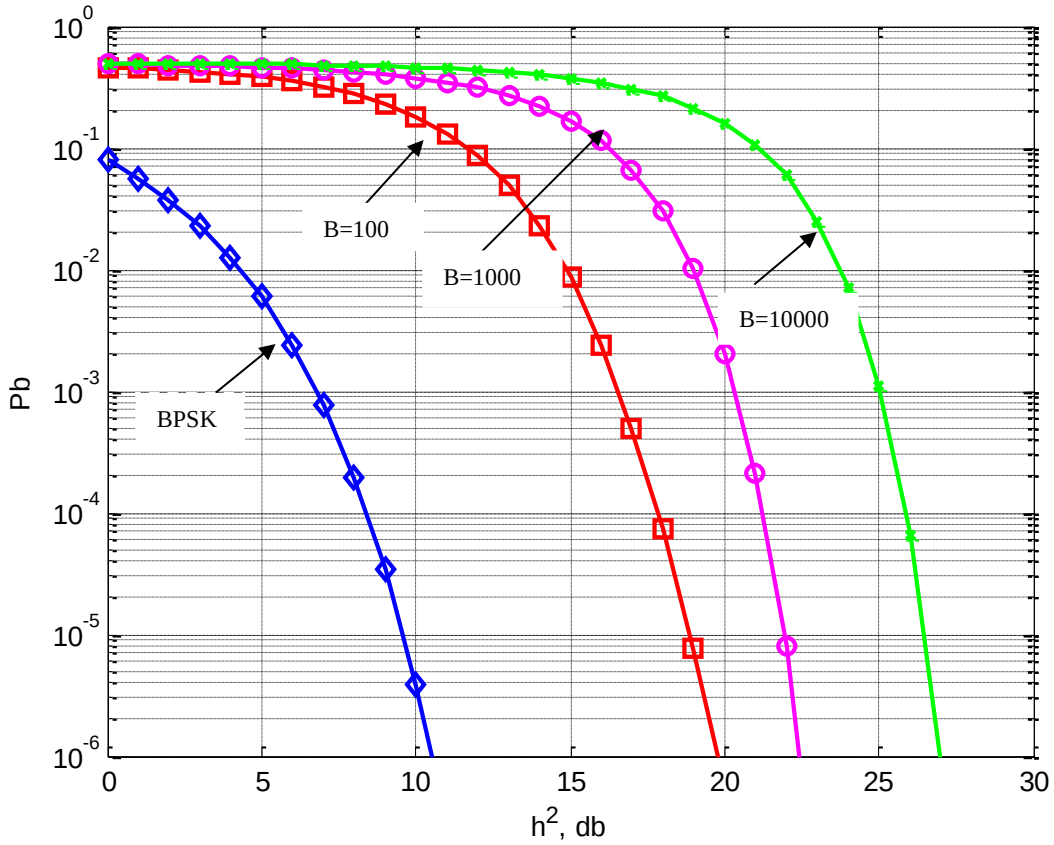


Рис. 2.2 Порівняння завадостійкості широкосмугового сигналу з активною паузою і протилежними сигналами та вузькосмугового сигналу ФМ з еквівалентною потужністю.

Проведемо аналіз поведінки виразу (2.6):

$$P_b\,(h^2) = \frac{1}{2}\left[1 - \Phi\left(\frac{h^2}{\sqrt{\frac{5h^4}{2FT} + 4h^2 + 2FT}}\right)\right] = \frac{1}{2}\left[1 - \Phi\left(\frac{1}{\sqrt{\frac{5}{2FT} + \frac{4}{h^2} + \frac{2FT}{h^4}}}\right)\right]. \quad (2.8)$$

З формули випливає, що при рості бази сигналу B, зростає аргумент функції Крампа і це призводить до збільшення ймовірності помилки. Аргумент функціїї є монотонно зростаючим і не має екстремумів для допустимих значень $h^2 > 0$. З ростом h^2, відбувається незначне покращення завадостійкості, що в свою чергу сповільнюється з ростом B. Тому при великих значеннях бази сигналу, приріст завадостійкості з ростом h^2є незначним.

При $h^2 \to \infty$, ймовірність помилки асимптотично наближається до значень:

$$P_b = \frac{1}{2}\left[1 - \Phi\left(\sqrt{\frac{2B}{5}}\right)\right]. \quad (2.9)$$

Оптимальне значення бази, при якому забезпечується мінімум ймовірності помилки, дорівнює:

$$(FT)_0 = \sqrt{\frac{2B}{5}}h^2 \approx 1{,}12h^2. \quad (2.10)$$

При цьому завадостійкість системи буде мати вигляд:

$$P_b = \frac{1}{2}\left[1 - \Phi\left(\frac{h}{2\sqrt{2}}\right)\right]. \quad (2.11)$$

Порівнюючи завадостійкість ШСС та ВСС, бачимо, що при однакових значеннях h^2 вузькосмугові сигнали мають кращу завадостійкість в порівнянні з широкосмуговими. Наприклад, для забезпечення достовірності 10^{-6} для ФМ достатньо значення h^2=10.5 дБ.

Одночасно, із графіків (Рис. 2.2) видно, що при зростанні бази B, необхідно збільшувати h^2 для досягнення еквівалентної достовірності сигналу.

Для широкосмугового сигналу для забезпечення достовірності 10^{-6} при B=100 необхідно забезпечити h^2 = 19.8 дБ, при B=1000 – h^2 = 22.4 дБ, а при B=10000 – h^2= 27 дБ. Це пояснюється тим, що потужність завад в смузі частот F при використанні ШСС накопичується, в цієї смузі в B раз більше шумів в порівнянні зі смугою вузькосмугового сигналу. Поряд з цим, ця закономірність

витікає також із виразу (2.6).

Подібну закономірність можна побачити й на прикладі іншого виду широкосмугового сигналу.

Для ймовірності помилки для сигналів з кореляційно-часовою модуляцією при автокореляційній системі обробки маємо наступний вираз [85]:

$$p = \frac{1}{2}\left[1 - \Phi\left(\frac{h^2\sqrt{FT}}{\sqrt{9h^4+16h^2FT+8(FT)^2}}\right)\right]. \qquad (2.12)$$

В автокореляційній системі ймовірність помилки залежить не тільки від відношення енергії сигналу до спектральної щільності флуктуаційної завади h^2, але і від значень бази $B = FT$ відповідних сигналів. Залежність ймовірності помилки від h^2 для різних значень бази сигналу подано на рис. 2.3.

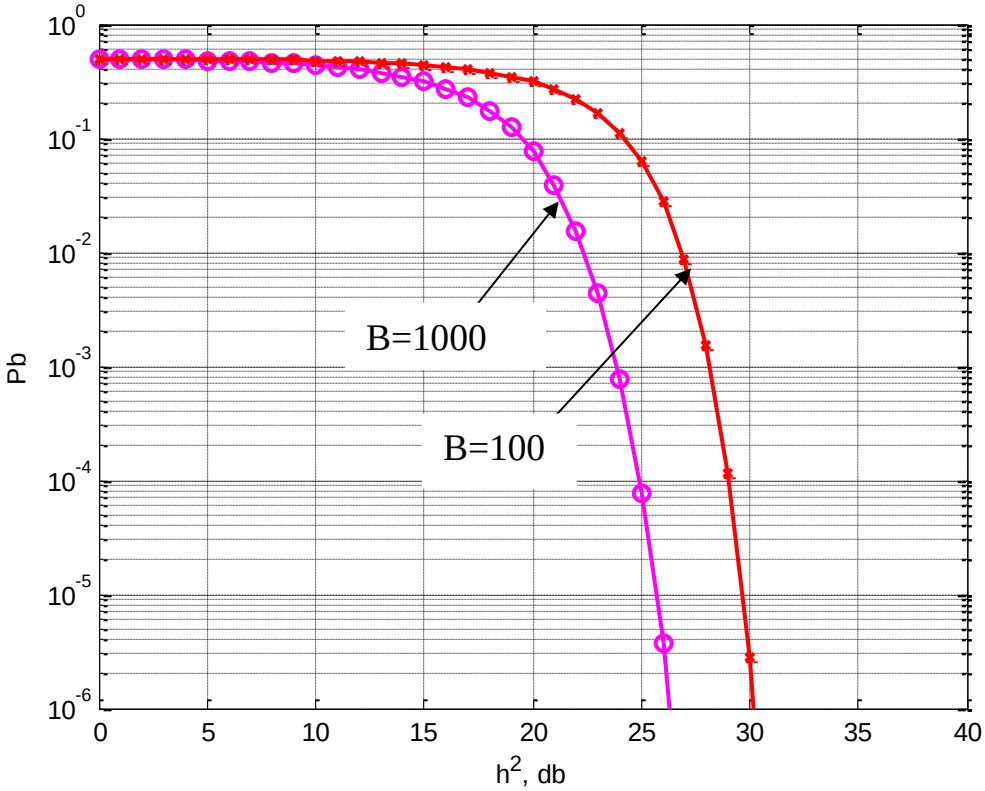


Рис. 2.3 Завадостійкість ШСС з АКФ з кореляційно-часовою модуляцією

Можна бачити, що й в цьому випадку зростання бази має наслідком зменшення завадостійкості системи передавання сигналів, хоча спосіб модуляції та спосіб обробки сигналу змінено.

2.3. Доцільність використання ШСС

Отже, системи з розширенням спектру не дають виграшу в завадостійкості при однакових значеннях енергії сигналу. Оскільки смуга частот є обмеженою і витратною, то розширювати її недоцільно при звичайному функціонуванні телекомунікаційної системи. У випадку, коли частоти регламентовані і регулюються, то не може йти річ про взаємні перешкоди в заданій смузі частот.

Використання ШСС доцільне тільки у випадку неорганізованої чи вразливої телекомунікаційної системи (наприклад, при загрозі дії потужних вузькосмугових завад). Тому використання ШСС має сенс з точки зору або досягнення підвищеної скритності (за рахунок зниження в В раз відношення сигнал/завада), або протидії потужній вузькосмуговій заваді. Прикладом такого використання є військова сфера, щоб отримати зв'язок в умовах перешкод з боку противника, а також забезпечити скритність електромагнітних сигналів при невеликій кількості випромінювачів.

Загальна вимога скритності радіозв'язку розпадається на три самостійних вимоги: по-перше, забезпечення скритності самого факту роботи радіолінії (передавача), по-друге, забезпечення скритності факту наявності в даному сигналі інформації; по-третє, забезпечення скритності самої інформації. [85]

Всім цим трьом вимогам широкосмугові системи радіозв'язку задовольняють, як правило, в дещо більшою мірою, ніж звичайні, вузькосмугові. Як вже говорилося вище, в широкосмугових системах застосовуються складні сигнали з базою FT>>1. Виявляється, що при використанні таких сигналів прийом дискретної інформації може здійснюватися при потужності сигналу, що припадає на одиницю смуги частот, меншою спектральної потужності флуктуаційних перешкод у використовуваній смузі частот, тобто передача під шумом. Іншими словами, виявляється можливим вести прийом, коли звичайний вузькосмуговий приймач просто не буде сприймати сигнал. [85]

Це визначає доцільність використання широкосмугових систем в тих випадках, коли швидкість передачі інформації не має вирішального значення, а

прихованість системи або вірність прийому сигналів в умовах каналу з сильно змінними параметрами грає особливо важливу роль.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Властивість широкосмуговості сигналів не забезпечує кращої достовірності в порівнянні з вузькосмуговими сигналами при однаковій потужності.
2. При розширенні спектру сигналу накопичується в В раз більше шумів в порівнянні з вузькосмуговими сигналами. Системи з розширенням спектру не дають виграшу в завадостійкості, а являються інструментом забезпечення функціонування системи зв’язку в особливих умовах.
3. Використання широкосмугових сигналів доцільне тільки для протидії вузько-смуговим завадам, які займають тільки частину смуги частот і для забезпечення скритності електромагнітних сигналів у спеціальних сферах використання.
4. Якщо ШСС має обмеження в ресурсі (обмежена енергія сигналу), то вони ведуть до втрати завадостійкості або розтрати ресурсу, коли є намагання відновити вихідну достовірність.
5. Засобом, що дозволяє підвищити достовірність прийому є завадостійке кодування, однак декодер не може розрізняти спосіб обробки сигналу до його входу, тому при рівній енергетиці і однаковій швидкості символів джерела, ВСС мають перевагу і на цьому етапі обробки сигналів.

3 ВИЗНАЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СИГНАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ВЕКТОРНО-ФАЗОВОГО МЕТОДУ

3.1 Аналіз методів визначення показників завадостійкості сигналів зв’язку

За останні десятиліття цифрові комунікації вступили в фазу бурхливого розвитку, яка активно продовжується і в теперішній час. На сьогоднішній день найшвидшого розповсюдження набули безпроводові широкосмугові мережі, що потенційно трансформуються від стратегій 4G до новітніх стратегій 5G. Невід’ємною частиною цих стратегій є мультисервісність, пов’язана з різноманіттям, одночасною множинністю, значним обсягом та високою швидкістю передавання інформації при наданні телекомунікаційних послуг. Наслідком цього є вимоги до значної продуктивності комунікацій. Традиційним інструментом реалізації високої продуктивності каналів передачі інформації є використання багатопозиційної модуляції (QAM-M: QAM-64, QAM-256, QAM-1024 й подібних). Але у безпроводових широкосмугових комунікаціях суттєвою перешкодою досягнення бажаної продуктивності є недостатня завадостійкість, яка обмежена енергетичними, динамічно-просторовими та іншими обмежуючими факторами.

Отже, актуальним є подальший розвиток фундаментальної теорії в області передавання інформації в складних енергетично-просторових умовах, а також розробка прогресивних методів на фізичному та канальному рівні OSI, таких як модуляція, кодування, тощо.

Пропускна здатність каналу зв'язку є однією з кількісних характеристик, що визначають міру ефективності використання наданих телекомунікаційної системи ресурсів на фізичному рівні: частотного та енергетичного. [97]

Багатопозиційні сигнали є одним із конструктивних засобів підвищення пропускної здатності каналів зв'язку. Суть полягає у можливості передачі кількох біт інформації в кожному одиночному маніпульованому сигналі на відміну від бінарної маніпуляції, де одиночний сигнал переносить не більше

одного біта інформації.

Як випливає з відомої формули для пропускної здатності C дискретного каналу з використанням сигналів маніпуляції заданої кратності M [67]:

$$C = V_C \cdot [\log_2 M + (1 - p_s) \cdot log_2(1 - p_s) + p_s \cdot log_2(p_s/(M - 1))]. \quad (3.1)$$

Пропускна здатність, з одного боку, збільшується зі зростанням швидкості передачі символів V_C в каналі, з іншого боку, її зростання обмежене неминучим збільшенням ймовірності помилки прийомі символу p_S в міру прискорення передачі символів V_C. Одночасно слід врахувати, що ймовірність помилки p_S зростає з підвищенням кратності маніпуляції M.

Таким чином, знання точного значення ймовірності помилкового прийому символів багаторазової маніпуляції p_s є необхідним етапом оцінки пропускної здатності каналу зв'язку.

Разом з тим реальний обсяг переданої інформації визначається продуктивністю каналу зв'язку:

$$R = Vs \cdot [1 + (1 - p_b) \cdot log_2(1 - p_b) + p_b \cdot log_2 p_b], \quad (3.2)$$

де p_b – ймовірність помилкового прийому інформаційного біта джерела повідомлення, а швидкість передачі інформаційних біт джерела повідомлення V_S пов'язана зі швидкістю передачі символів повідомлення каналом V_C співвідношенням:

$$V_S = V_C \cdot log_2 M. \quad (3.3)$$

оскільки один символ багатопозиційного сигналу переносить $\log_2 M$ біт джерела.

Співвідношення (3.1), (3.2), (3.3) показують, з одного боку, тісний зв'язок показників продуктивності та завадостійкості, з іншого боку, підкреслюють актуальність визначення взаємозв'язку між бажаною продуктивністю R та обмеженнями на показники достовірності передачі інформації p_sта p_b у міру зростання швидкості передачі джерела V_S та кратності модуляції M.

У літературі наводяться різні співвідношення, рекомендовані для визначення ймовірності помилки прийому символу багатопозиційних сигналів (Ps) і помилки прийому інформаційного біта джерела повідомлення (p_b).

Співвідношення, одержані Кантором Л.Я. [74] для сигналів БПМ Phase-

Shift Keying (PSK-M), і формули для оцінки помилок прийому символів і біт для сигналів Quadrature Amplitude Modulation (QAM-M), запропоновані Прокісом [28], слід розглядати як універсальні. Універсальність формул будується на вагомому аргументі про рівність евклідової відстані між позиціями символів багатопозиційному сигналі. Ці співвідношення побудовані припущенні у тому, що помилка настає через перешкоди внаслідок зміщення вектора істинного становища символу однією позицію. Однак це припущення справедливе при значному перевищенні енергії сигналу над перешкодою, коли ймовірність зміщення вектора інші, крім сусідньої, позиції вкрай мала. При малих значеннях відношеннях сигнал/шум повна група подій повинна враховувати можливість зміщення вектора сигналу на різні інтервали.

Отже, крім співвідношень, отриманих проф. Фінком Л.М. [75, 101], співвідношення у згаданих джерелах [28, 74] є приблизними, тобто. що забезпечують належну точність визначення ймовірностей помилок у певній обмеженій області значень енергетичного параметра h^2, і не задовольняють фізичному сенсу ймовірності поза цією областю (не зазначеної у джерелах).

В свою чергу, результати, отримані проф. Фінком Л.М. [101], відносяться тільки до двох видів маніпуляції: BPSK (Binary Phase Shift Keying або ФМ-2) та QPSK (Quadrature Phase Shift Keying або ФМ-4).

Для отримання точних аналітичних співвідношень для визначення ймовірностей p_S і p_b для більш широкого інтервалу значень відношень сигнал/шум, а також для обґрунтування методології побудови статистичних моделей для обчислення тих же ймовірностей при надмірному ускладненні аналітичного апарату пропонується оригінальний метод, що ґрунтується на фізичні процеси взаємодії сигналу та завад. При цьому сигнал, завада та їх взаємодія відображаються у векторній формі, що зумовило назву векторно-фазового методу.

3.2 Порівняльний аналіз методик визначення завадостікості для сигналів багатократної Phase-Shift Keying

Формула, наведена у книзі Кантора Л.Я. [74] є універсальною для сигналів багаторазової фазової маніпуляції з різною позиційністю М, що дозволяє застосовувати її при значеннях М ≥2.

Співвідношення:

$$P_{b_{PSK-M}}(h^2) \approx \frac{2}{M} F\left(\sqrt{h^2}\, sin \frac{\pi}{2M}\right)$$
$$\mathrm{P_{бФМ\text{-}M}(h^2) \approx \frac{2}{M} F(\sqrt{h^2} \sin \frac{\pi}{2M})} \tag{3.4}$$

отримано в результаті апроксимацій точних формул, і є наміром запропонувати універсальну формулу, придатну для розрахунків.

Разом з тим, найбільш точною та коректною методикою для визначення показників завадостійкості сигналів багаторазової фазової маніпуляції є методика визначення ймовірності помилки, запропонована Фінком Л.М.

Нижче наведено точні формули, запропоновані Фінком Л.М. [101], для бітової ймовірності помилки:

ФМ-2:

$$P_{б\,ФМ2}(h^2) = 0{,}5\left(1 - \Phi\left(\sqrt{2h^2}\right)\right), \qquad \text{где } \Phi(x) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\frac{\eta^2}{2}} d\eta \tag{3.5}$$

ФМ-4

$$P_{б\,ФМ4}(h^2) = 0{,}5\left(1 - \Phi\left(\sqrt{h^2}\right)\right), \qquad \text{где } \Phi(x) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\frac{\eta^2}{2}} d\eta \tag{3.6}$$

Знайдемо значення $h^2 = E_S/N_0$, необхідні для забезпечення $P_б = 10^{-4}/10^{-5}/10^{-6}$, при різних способів розрахунку.

На Рис. 3.1 представлені результати, отримані наступним чином:

1) розрахунок за формулою Кантора Л.Я., наведеною в [74] (лінії 1-3);

2) результати, наведені в [74] в таблиці 4.4 (лінії 4-6);

3) розрахунок по точній формулі Фінка Л.М. [101] (лінії 7-9).

$P_б$

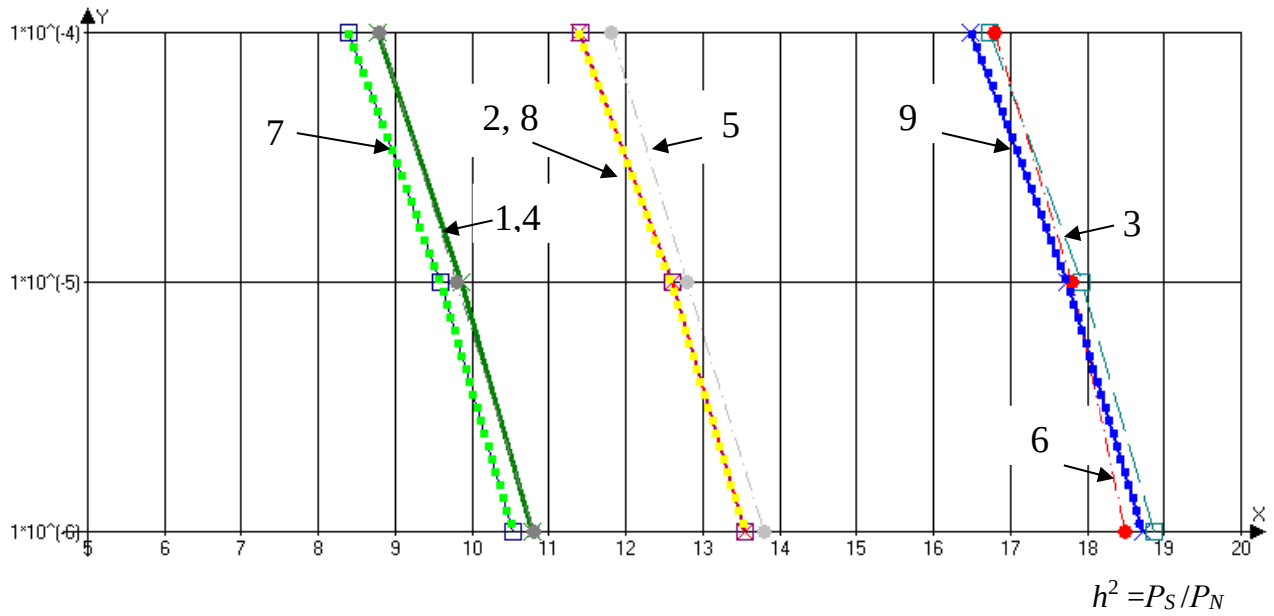


Рис. 3.1 Графічне відображення завадостійкості сигналів багатократної ФМ, отриманих різними способами розрахунку.

У нижченаведених таблицях представлені похибки значень, отриманих за формулою Кантора (лінії 1-3), які відрізняються від результатів, отриманих за точною формулою Фінка (лінії 7-9):

Таблиця 3.1 Похибки значень, набутих за наближеною формулою Кантора щодо точної формули Фінка

- Для ФМ-2:

Ймовірність	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
Різниця, h^2	-0,381	-0,279	-0,248

- Для ФМ-4:

Ймовірність	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
Різниця, h^2	0,0105	-0,0018	0,00131656

Виходячи з вищевикладеного, можна зробити наступні висновки.

Формула (3.4) з [74], викликає інтерес, оскільки аналітична залежність є універсальною для сигналів з різною позиційністю M, що дозволяє застосовувати її при значеннях M>2. Формула отримана в результаті

апроксимацій точних формул, і є спробою вивести універсальну формулу, придатну для розрахунків.

Оскільки формула є результатом апроксимацій, вона має обмежений діапазон, у якому її значення практично збігаються з точними значеннями, саме: для маніпуляцій виду ФМ-4 діапазон обчислюваних ймовірностей бітових помилок $10^{-4}\ldots10^{-6}$ (лінії 2-3).

Для випадку BPSK (лінія 1) у досліджуваному діапазоні ймовірностей помилки формула (3.4) показує результати з похибкою до 4,5% порівняно з точними формулами (3.5) та (3.6).

В той же час, в інших діапазонах ймовірності помилки формула (3.4) є непридатною, наприклад:

– при відношенні $h^2 = P_c/P_ш = 0$, $P_{b_BPSK}(0) = 1$ тоді як максимальне значення бітової ймовірності дорівнює 0,5.

Таким чином, універсальна формула (3.4) придатна для використання в діапазоні бітових ймовірностей 10^{-4}-10^{-6} із допустимою похибкою видів маніпуляції QPSK.

3.3 Аналіз методики визначення завадостікості для сигналів багатократної Quadrature Amplitude Modulation

Відомо, що забезпечення ефективності використання обмежених енергетичних та частотний ресурсів являється актуальною задачею в телекомунікаційних системах.

На сьогоднішній день QAM є однією з найефективніших методів модуляції, що дозволяє досягати максимально можливі швидкості передачі даних [28, 66, 75].

Отже, з одного боку ми прагнемо більш ефективно використовувати спектр, а з іншого, чим більше кратність маніпуляції *M*, тим більшій вплив завад на стан сигналу, що приймається сигналу [28, 66].

Дослідження достовірності сигналів багатократної Quadrature Amplitude Modulation, зокрема, здійснено за методикою, що запропонована Дж. Прокісом [28].

Вихідними даними для методики є наступні параметри:

h^2 – енергетичний параметр, який характеризує відношення середньої енергії сигналу в точці прийому E_S до односторонньої спектральної щільності потужності шуму N_0:

$$h^2 = \frac{E_S}{N_0} = \frac{P_S}{V_c \cdot N_0}, \tag{3.7}$$

де V_c – швидкість передачі символів в каналі зв'язку, P_S – потужність сигналу в точці прийому

Використовуючи ці параметри, можна визначити наявну бітову ймовірність помилки в каналі. Вона залежить від способу формування та обробки сигналу.

Для маніпуляції QPSK та QAM-M ймовірність символьної та бітової помилок будуть визначатися наступними формулами:

– ймовірність помилки символу для сигналу QPSK

$$p_{\text{сим}QPSK} = \frac{3}{4} - \frac{1}{2}\Phi\left(\sqrt{h^2}\right) - \frac{1}{4}\Phi^2\left(\sqrt{h^2}\right), \tag{3.8}$$

– ймовірність помилки біту для сигналу QPSK

$$p_{\text{біт}QPSK} = \frac{1}{2}\left[1 - \Phi\left(\sqrt{2h^2} cos\frac{\pi}{4}\right)\right], \tag{3.9}$$

– ймовірність помилки символу для сигналу QAM-M

$$p_{\text{сим}QAM} = 1 - \left(1 - \frac{2\left(1-\frac{1}{\sqrt{M}}\right)}{\sqrt{2\pi}} \int_{\sqrt{\frac{3}{M-1}h^2}}^{\infty} exp\left(\frac{-u^2}{2}\right) du\right)^2, \tag{3.10}$$

– ймовірність помилки біту для сигналу QAM-M

$$p_{\text{біт}QAM} = \frac{4\left(1-\frac{1}{\sqrt{M}}\right)}{\sqrt{2\pi}} \int_{\sqrt{\frac{3}{M-1}h^2}}^{\infty} exp\left(\frac{-u^2}{2}\right) du, \tag{3.11}$$

де M – це позиційність модуляції.

За допомогою вище вказаних формул, побудовані графіки залежності ймовірності **символьної** та **бітової** помилок від енергетичних параметрів каналу зв'язку **за формулами Дж. Прокіса**.

Графіки дослідження символьної помилки та відношення сигнал/шум для кожної модуляції розраховані та побудовані в програмі Matlab мають наступний вигляд:

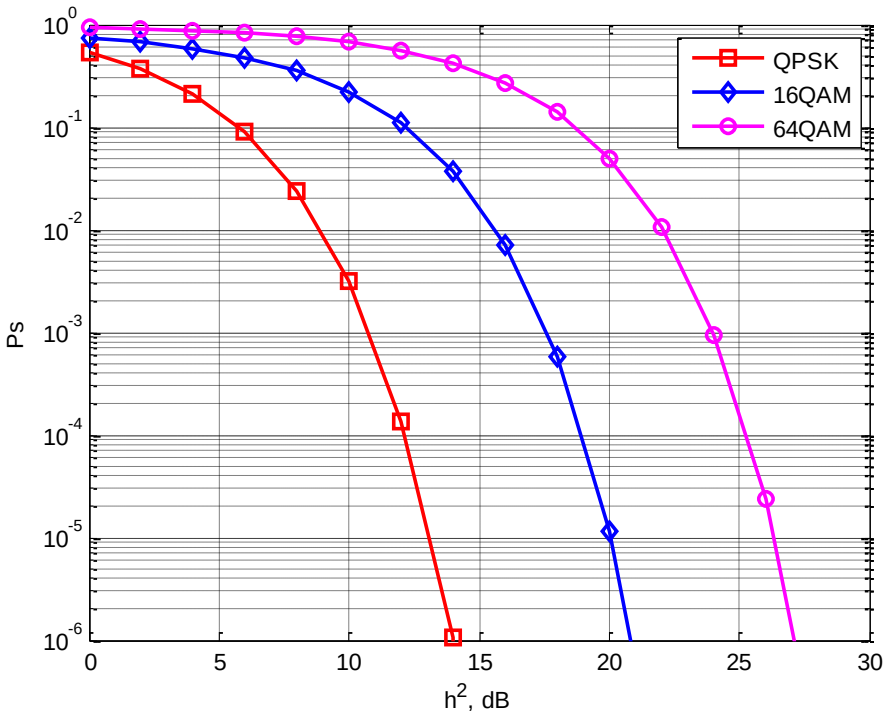


Рис. 3.2 Графік залежності ймовірності помилок символів від h^2 для QPSK, QAM-16, QAM-64

Ймовірність помилок біту багатопозиційних сигналів менше символьної ймовірності помилок, тому що не будь-яке спотворення символу призводить до неправильного прийому біта інформації. Графіки залежності бітової ймовірності помилки від енергетичного параметру h^2 представлена на рис. 3.3.

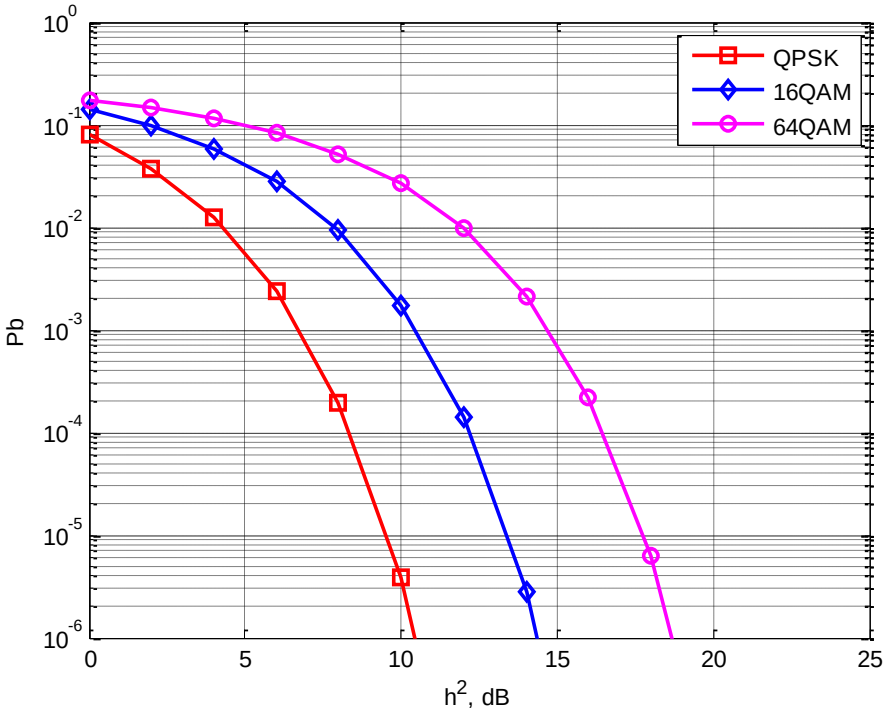


Рис. 3.3 Графік залежності ймовірності помилок біту від h^2 для QPSK, QAM-16, QAM-64

З представлених залежностей на рис. 3.2 та рис. 3.3 можна зробити висновок проте, що в каналах з більшою позиційністю виникає більша кількість помилок у порівнянні з каналами з меншою позиційністю, отже евклідова відстань між символами, яка визначає можливість їх розрізнення суттєво зменшується.

3.4 Вдосконалення методики оцінки завадостійкості багатопозиційних сигналів на основі векторно-фазового методу

В основі методу [97] лежить визначення ймовірності попадання результуючого (сумарного) вектору сигналу та завади в деяку просторово-фазову область, при якій завада призводить до неправильного прийому символів багаторазової маніпуляції, і як наслідок, помилкового прийому бітів інформації.

Нехай канал зв'язку передається сигнал S. Під впливом перешкоди W сигнал S утворює результуючий сигнал r, який приходить на приймач. Якщо

результуючий сигнал потрапляє в область реєстрації сигналу, що передається, то сигнал приймається вірно, якщо ж результуючий сигнал знаходиться поза областю достовірної реєстрації переданого сигналу, то він приймається неправильно.

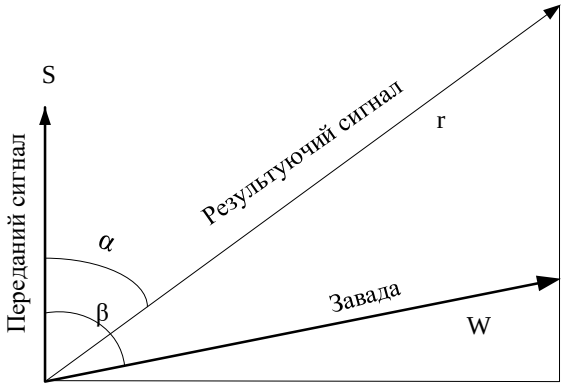


Рис. 3.4 Векторне представлення впливу завади на результуючий сигнал.

В даному випадку (сигнал BPSK) поведінка вектора завади визначається співвідношенням:

$$W(\beta) = \frac{S}{\sin\alpha(ctg\beta - ctg\alpha)} = \frac{S}{-\cos\alpha}. \quad (3.12)$$

В результаті розрахунку ймовірності попадання вектора завади в область неправильного прийому біта інформації (π/2 < α < π), отримуємо наступну формулу для BPSK:

$$P_{б_BPSK}(h^2) = \frac{1}{\pi}\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} e^{-\frac{h^2}{\cos^2\alpha}} d\alpha. \quad (3.13)$$

Розрахунки ймовірності помилки з використанням формули (3.13) **кількісно співпадають** з результатами, отриманими Фінком Л.М. [101].

Наступним, ефективнішим видом маніпуляції, ніж BPSK, є QPSK – квадратурна фазова маніпуляція. На відміну від BPSK, кожен сигнал, що передається при даній маніпуляції, передає 2 біти інформації. Вигляд сигнального простору для QPSK показано на рис. 3.5.

Двійкові цифри в передавачі групуються по дві, і в кожному інтервалі передачі символів дві послідовні цифри визначають, який із чотирьох можливих

сигналів генерує модулятор. Імовірність помилки на вході декодера визначається розташуванням сигнальних точок в ансамблі та шумом у каналі. Сузір'я сигналів QPSK являє собою набір що складається з чотирьох сигнальних точок (S0, S1, S2, S3), зміщених один щодо одного на 90° та 180°.

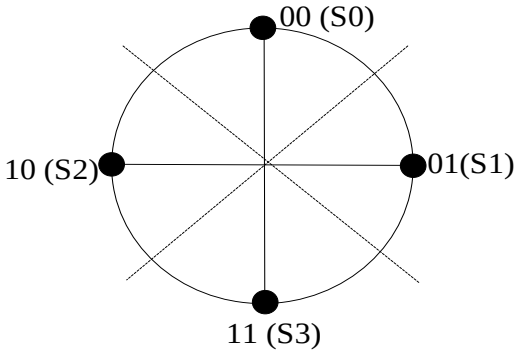


Рис. 3.5. Сигнальний простір QPSK з використанням коду Грея

Розглянемо випадок, коли символ S0 відповідає правильному прийому, тобто розташування вектора суми сигналу та перешкоди області переданого сигналу S0. Область правильного прийому сигналу S0 є променем з кутом 90°, що виходить з початку координат. Області правильного прийому, для кожного сигналу показані штрихпунктирними лініями, що є променями. При демодуляції виникне помилка, якщо прийнятий сигнал виявиться в області прийому інших 3-х сигналів. Так, при передачі S0 виникне помилка, якщо сигнал попаде в область прийому S1, S2, S3

Побудуємо векторну діаграму залежності амплітуди завади від її кута, яка призведе до невірного прийому переданого сигналу S0 (результуючий вектор суми переданого сигналу і завади потрапить в область прийому сигналів S1, S2, S3). Розглянемо вплив вектора завади на сигнал з амплітудою 1. Векторна діаграма амплітуд перешкоди наведена на рис. 3.4 Для того, щоб сигнал, що передається, був прийнятий невірно, необхідно, щоб вектор результуючого сигналу R, утвореного вектором переданого сигналу S і вектором перешкоди W, потрапив в область прийому «помилкового» сигналу.

Зробивши ряд математичних перетворень над векторами, отримаємо такі співвідношення між ними для сигналів QPSK:

$$W(\beta) = \frac{S}{\sin\beta(ctg\alpha - ctg\beta)}, \tag{3.14}$$

$$\text{Умова } \alpha = \frac{\pi}{4}, \tag{3.15}$$

для QPSK, описує граничний стан, при перевищенні якого сигнал, що передається, буде прийнятий неправильно. Скориставшись зазначеною умовою, отримуємо граничну умову для вектора завади:

$$W(\beta) = \frac{S}{\sin\beta(ctg\frac{\pi}{4} - ctg\beta)}. \tag{3.16}$$

Область вектора завади, що описується за допомогою (3.16) для сигналу S0, наведена на рис. 3.6. Заштрихована частина відповідає вектору завади, яка призведе до помилкового прийому сигналу S0.

Знаходження ймовірності попадання вектора перешкоди в область, яка призведе до неправильного прийому, зводиться до наступного

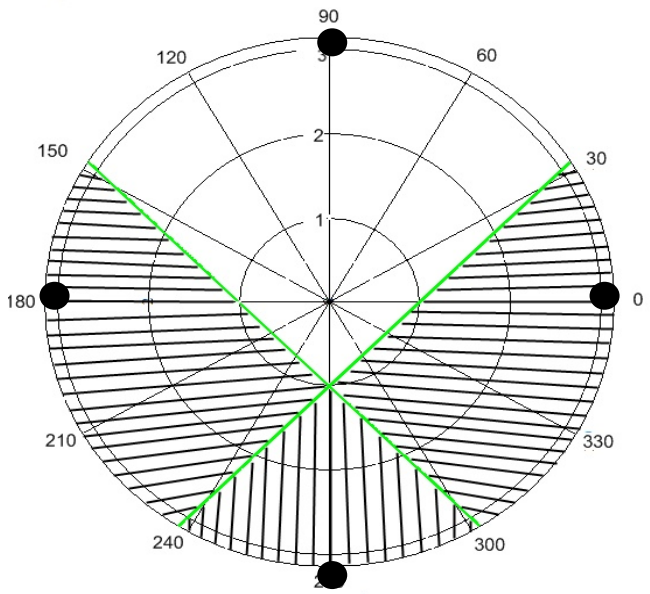


Рис. 3.6 Векторний простір завади сигналів QPSK.

Інтеграл для області неправильного прийому S0 збігається з інтегралом для областей неправильного прийому S1, S2, S3 і виглядає наступним чином:

$$P_{S_QPSK}(S,\sigma)$$

$$= \frac{1}{\pi\sigma^2}\int_{\frac{\pi}{4}}^{\pi}\int_{\frac{-S}{sin\beta(\frac{1}{\tan\left(\frac{\pi}{4}\right)}-\frac{1}{\tan(\beta)})}}^{\infty} e^{\frac{-(\eta)^2}{2\sigma^2}}\eta d\eta d\beta$$

$$= \left| \begin{array}{c} \frac{\eta^2}{2} = t \\ \eta = \mp\sqrt{2t} \\ d\eta = \mp\frac{2}{2\sqrt{2t}}dt \\ \eta = \frac{-S}{sin\alpha(1-ctg(\beta))} = \mp\sqrt{2t} \\ t = \frac{S^2}{2sin^2\beta(1-ctg(\beta))^2} \end{array} \right| =$$

$$= \frac{1}{\pi\sigma^2}\int_{\frac{\pi}{4}}^{\pi}\int_{\frac{S^2}{2\,sin^2\,\beta(1-ctg\beta)^2}}^{\infty} e^{\frac{-t}{\sigma^2}}\sqrt{2t}\frac{2}{2\sqrt{2t}}dtd\beta$$

$$= \frac{1}{\pi\sigma^2}\int_{\frac{\pi}{4}}^{\pi} -\sigma^2 e^{\frac{-t}{\sigma^2}}\Bigg|_{\frac{S^2}{2\,sin^2\,\beta\,(1-ctg\beta)^2}}^{\infty} d\beta =$$

$$= \frac{1}{\pi\sigma^2}\int_{\frac{\pi}{4}}^{\pi}(0+\sigma^2 e^{\frac{-S^2}{\sigma^2 2\,sin^2\,\alpha(1-ctg\alpha)^2}})d\alpha = \frac{1}{\pi}\int_{\frac{\pi}{4}}^{\pi} e^{\frac{-S^2}{\sigma^2 2\,sin^2\,\alpha(1-ctg\alpha)^2}}d\alpha. \quad (3.17)$$

Після заміни $S^2 = P_c$, $\sigma^2 = \frac{N_0}{T}$, $\frac{S^2}{2\sigma^2} = h^2$ отримаємо ймовірність символьної помилки сигналу QPSK:

$$P_{S_QPSK}(h^2) = \frac{1}{\pi}\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} e^{\frac{-h^2}{sin^2\,\beta(1-ctg\beta)^2}}d\beta. \quad (3.18)$$

Для QPSK розрахунок бітової ймовірності помилки зводиться до знаходження середньої ймовірності помилки для кожного біта. При використанні кода Грея розташування інформаційних біт представлено на рис. 3.7.

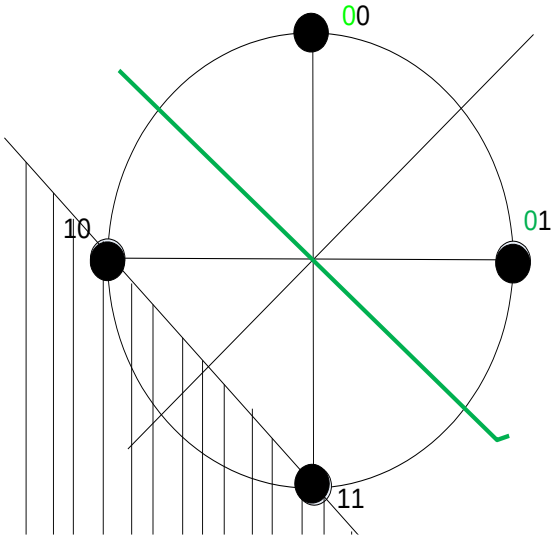


Рис. 3.7. Розміщення інформаційних біт в сузір'ї QPSK.

Помилка в першому інформаційному біті (при передачі "0" у першому каналі з двох) виникне, якщо будуть прийняті комбінації "10" або "11". Для того, щоб прийнятий сигнал опинився в області помилки, необхідно, щоб на нього вплинула перешкода, яка описується наступним виразом:

$$W(\beta) = \frac{S}{\sin\alpha(ctg\frac{\pi}{4} - ctg\alpha)}, \tag{3.19}$$

і область завади, яка призведе до спотворення переданого біта відповідає заштрихованій області на рис.3.7.

Враховуючи наведене вище обмеження, розрахунок бітової ймовірності помилки QPSK зводиться до знаходження середньої ймовірності помилки по кожному біту, і в результаті отримуємо наступну формулу:

$$P_{b_QPSK}(h^2) = \frac{1}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{5\pi}{4}} e^{-\frac{h^2}{(\sin\alpha - \cos\alpha)^2}} d\alpha. \tag{3.20}$$

Для випадку QAM-16 ймовірність бітової помилки також визначається середньою ймовірністю бітової помилки по всіх 4-х бітах. При цьому середня бітова ймовірність помилки першого біта дорівнює ймовірності помилки для третього біта, а бітова ймовірність помилки другого біта збігаються з ймовірністю помилки четвертого. Рівність бітових ймовірностей забезпечується за рахунок подібності відповідних областей прийому.

Оскільки ймовірності помилок 1 і 3, 2 і 4 біт збігаються, тому для

знаходження середньої бітової помилки достатньо буде знайти ймовірність помилок 1 і 2 бітів:

$$P_{b_QAM16}(h^2) = \frac{P_{b1}(h^2)+P_{b2}(h^2)}{2}, \tag{3.21}$$

де $P_{b1}(h^2)$– ймовірність помилки першого та третього біта, $P_{b2}(h^2)$– ймовірність помилки другого та четверного біта.

Імовірність помилки 1-го біта визначається умовами влучення вектора перешкоди в область, заштриховану на Рис. 3.8.

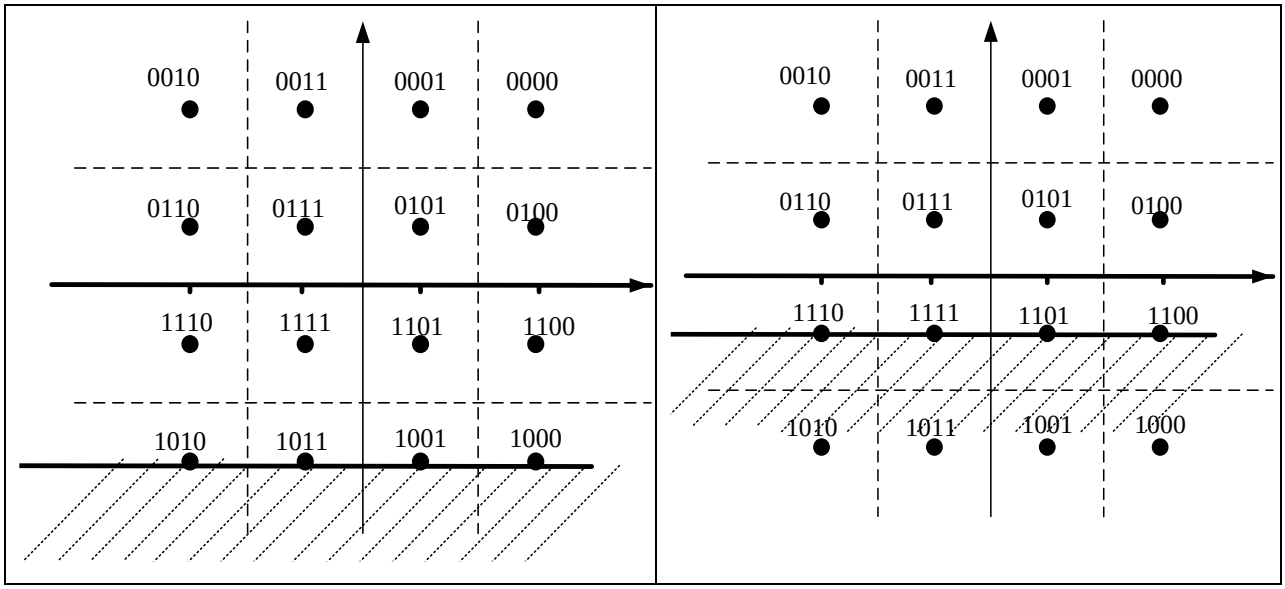


Рис. 3.8 Області завади для третього біта сигналу QAM-16: а) сигналів 0010,0011,0001,0000 б) сигналів 0110,0111,0101,0100

Зазначені ймовірності розраховуються наступним чином:

$$P_{b1}(h^2) = \frac{\frac{1}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{5\pi}{4}} e^{\frac{-h^2}{2(\cos\alpha-\sin\alpha)^2}}d\alpha + \frac{1}{2\pi}\int_{arctg(3)}^{\pi+arctg(3)} e^{\frac{-5h^2}{18(\cos\alpha+\frac{\sin\alpha}{3})^2}}d\alpha + \frac{1}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{5\pi}{4}} e^{\frac{-h^2}{18(\sin\alpha-\cos\alpha)^2}}d\alpha}{4}$$

$$P_{b2}(h^2) = \frac{\frac{1}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{5\pi}{4}} e^{\frac{-h^2}{18(\cos\alpha-\sin\alpha)^2}}d\alpha - \frac{1}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{5\pi}{4}} e^{\frac{-h^2}{50(\cos\alpha-\sin\alpha)^2}}d\alpha + \frac{1}{2\pi}\int_{-\frac{3\pi}{4}}^{\frac{5\pi}{4}} e^{\frac{-h^2}{18(\cos\alpha-\sin\alpha)^2}}d\alpha}{2} \tag{3.22}$$

Особливістю формул, отриманих з використанням векторно-фазового методу, є їх точність, що не містить припущення про універсалізацію і не впливає на достовірність розрахунків.

Розрахунки за формулами (3.12), (3.14), (3.16), (3.19) чисельно збігаються

з відомими результатами [101]. Співвідношення (3.13), (3.20), (3.21) є продуктом виключно векторно-фазового методу визначення ймовірності помилки.

Результати, отримані за допомогою запропонованого методу, є точними у всьому діапазоні досліджуваних параметрів, у той час як поширені наближені формули є досить точними тільки у вузькому діапазоні значень вихідних величин (для високих порядків маніпуляції і при значній енергетиці лінії зв'язку).

Разом з тим, точність аналітичних розрахунків у межах ВФМ забезпечується за рахунок громіздкості розрахунків чисельного інтегрування, хоча при цьому не містить припущення про їхню наближеність.

3.5 Визначення завадостійкості СКК в умовах низької енергетики

В технічній літературі приводяться різні співвідношення для розрахунку ймовірності помилки маніпульованого символу багатопозиційним сигналом ($P_{\text{сим}}$) і помилки інформаційного символу, тобто біту ($P_{\text{біт}}$).

Як відомо, існує декілька способів розрахунку символьних та бітових помилок. Серед них – результати векторно-фазового методу, та результати за Дж. Прокісом. Необхідно отримати більш точні аналітичні співвідношення для визначення ймовірностей помилок для більш широкого набору маніпуляції. В роботі проведено аналіз згідно набору маніпуляцій: BPSK, QPSK, QAM-16 (Quadrature Amplitude Modulation), QAM-64. Дані розрахунки будуть аналітично розраховані та графічно побудовані за допомогою формул Дж. Прокіса.

Методика визначення завадостійкості за допомогою векторно-фазового методу:

1. h2 = 0.1…30, n=1000000 ітерацій.
2. Генерування вектору переданого сигналу S.
3. Розрахунок вектору завади W.
4. Розрахунок результуючого сигналу r.
5. Визначення ймовірності попадання результуючого вектору за границі прийняття рішень Pc.

6. Визначення середньої ймовірності помилки Pb.
7. Отримання результатів та побудова графіків

Алгоритм визначення показників завадостійкості на основі векторно-фазового методу зображено на Рис. 3.9.

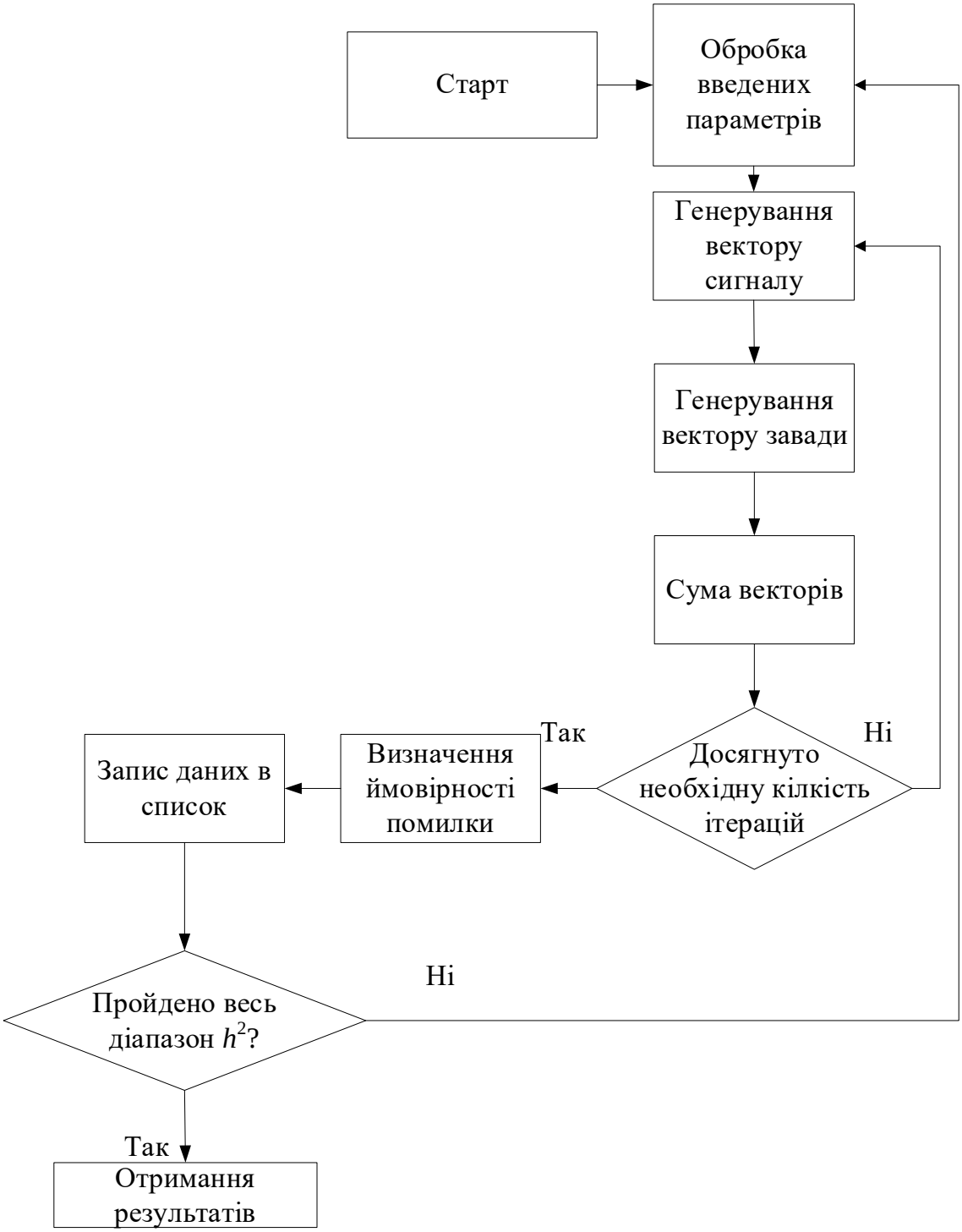
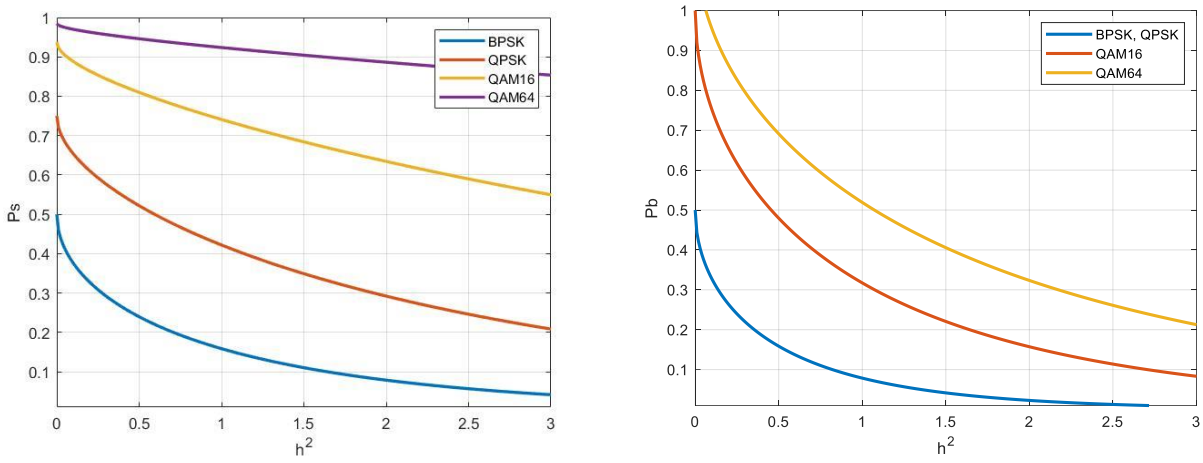


Рис. 3.9 Алгоритм визначення показників завадостійкості на основі векторно-фазового методу

Графіки дослідження символьної помилки та відношення сигнал/шум для кожної модуляції розраховані та побудовані в програмі Matlab мають наступний вигляд:



а) б)

Рис. 3.10 Графік залежності ймовірності помилок (а –помилка передачі символу, б – бітова помилка) від h^2 для BPSK, QPSK, QAM-16, QAM-64

З рисунку видно, що в умовах низької енергетики, формули Прокіса не являються точними. Це пояснюється тим, що аналітичні формули враховують лише попадання результуючого вектора сигналу сусідню область, однак не враховує попадання вектора в більш віддалені області.

Для отримання точних результатів пропонується використовувати векторно-фазовий метод, в основі якого лежить визначення ймовірності попадання результуючого (сумарного) вектора сигналу й перешкоди в деяку просторово-фазову область, в якій перешкода призводить до неправильного приймання символів багатократної маніпуляції. Нехай в канал зв'язку передається сигнал S. Під впливом перешкоди W сигнал S утворює результуючий сигнал r, який приходить на приймач. Якщо результуючий сигнал потрапляє в область реєстрації сигналу, що передається, то сигнал приймається вірно, якщо ж результуючий сигнал знаходиться поза області достовірної реєстрації сигналу, що передається, то він приймається невірно.

Варто зауважити, що символьна помилка використовується як проміжний етап при розрахунку бітової помилки. Важливим показником стану каналу

зв'язку є бітова помилка, однак розрахунки бітової помилки для низької енергетики не є точними. Для невеликих значень відношення сигнал/шум значення бітової помилки розходяться, але при збільшенні h^2 це розходження становиться менш помітним. Векторно-фазовий метод отримати точні розрахунки при будь-якій енергетиці, на відміну від формул Прокіса, що можуть використовуватись тільки для високої енергетики каналу.

Особливість формул за векторно-фазовим методом полягає у їх достовірності, адже вони більш точно вираховують ймовірності помилок та не піддаються такої ж універсалізіції як інші формули розрахунку ймовірності символьних і бітових помилок.

При підвищенні кратності модуляції, збільшується кількість переданих біт інформації на один символ, але з іншої сторони це приводить до зменшення границь прийняття рішень символу. Ймовірність символьної помилки в такому випадку зростає пропорційно до кратності маніпуляції.

Для QPSK передача символу буде з такою ж амплітудою, однак зміниться гранична фаза прийняття рішень. При переході до більш високої кратності маніпуляції QAM16 та QAM64, прийняття рішення буде здійснювались не тільки по фазі, але й за амплітудним признаком. Оскільки амплітудна модуляція є найменш завадостійкою, тому завадостійкість буде набагато меншою.

Також при використанні амплітудної модуляції, змінюється коефіцієнт при розрахунку дисперсії:

$$\sigma(i) = \frac{1}{h_{avg} \cdot \sqrt{h(i)}} \tag{3.23}$$

Це викликано тим, що амплітуда сигналу буде змінюватись в залежності від переданого символу. Внаслідок збільшення коефіцієнта перед $\sqrt{h(i)}$ в знаменнику, дисперсія випадкової величини знижується. Тому міра розсіяння значень шуму для QAM16 буде меншою, ніж для BPSK та QPSK.

В формулах Прокіса вказано, що ймовірність бітової помилки:

$$P_{b_BPSK} = P_{b_QPSK} = Q(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}})$$

В формулах Прокіса допускається, що границі бітової та символьної

помилки співпадають для BPSK та QPSK. Для спростування цієї теорії використаємо правило поміченого біта.

У випадку BPSK, символьна помилка завжди призводить до бітової помилки, оскільки символ складається з 1 біту.

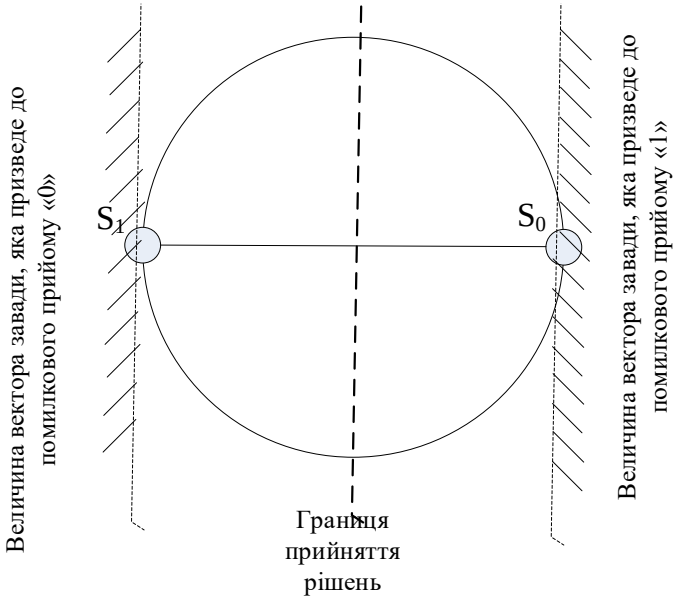


Рис. 3.11 Векторний простір сигналів BPSK

Таблиця 3.2 Границі прийняття рішень BPSK

Номер символу	Амплітуда	Фаза
0	0:1	-90°:90°
1	0:1	90°:-90°

При використанні QPSK в символі передається 2 біти, тому спотворення символу не завжди приводить до бітової помилки. Для спростування теорії Прокіса, що границі бітової помилки для BPSK та QPSK однакові, використаємо правило міченого біта.

Таблиця 3.3 Границі прийняття рішень QPSK

Номер символу	Амплітуда	Фаза
00	0:1	-45°:45°
01	0:1	45°:135°
10	0:1	135°:-135°
11	0:1	-135°:-45°

На Рис. 3.12 зображено векторний простір завад для бітої помилки сигналів QPSK.

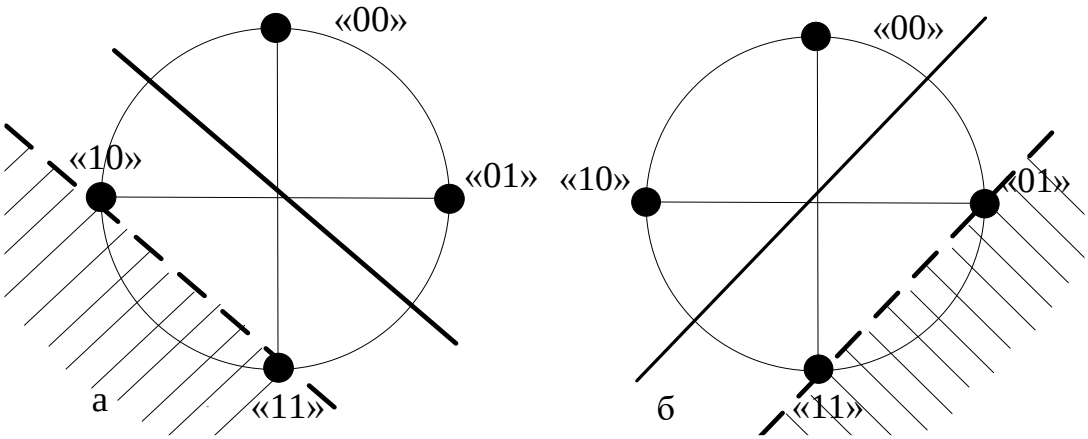


Рис. 3.12 Векторний простір завади для 1-го біта(а), для 2-го біта(б) сигналов QPSK

Штрих пунктирною лінією показано область помилкового прийому 1-го біта (а) та 2-го біта (б). Відповідно границі прийняття рішень для 1 та 2-го біта будуть симетричними та ймовірність помилки 1 та 2 біта будуть однаковими.

$$fi > -45^0, fi < 135^0$$

Для QAM16 ймовірність символьної та бітової помилки буде залежати від переданого символу:

Таблиця 3.4 Границі прийняття рішень QAM16

Номер символу	Амплітуда	Фаза
0000	0.67:+∞	-30°:-60°
0001	0.36: +∞	-60°:-90°
0010	0.67:+∞	-120°:-150°
0011	0.36: +∞	-90°:-120°
0100	0.36: +∞	0°:-30°
0101	0:0.36 0:0.67 0:0.36	0:-30 -30°:-60° -60°:-90°
0110	0:0.36	-150°:-180°
0111	0:0.36 0:0.67 0:0.36	-90°:-120° -120°:-150° -150°:-180°
1000	0.67:+∞	30°:60°
1001	0.36: +∞	60°:90°
1010	0.67:+∞	120°:150°
1011	0.36: +∞	90°:120°
1100	0.36: +∞	0°:30°
1101	0:0.36 0:0.67 0:0.36	0°:30° 30°:60° 60°:90°
1110	0.36: +∞	150°:180°
1111	0:0.36 0:0.67 0:0.36	90°:120° 120°:150° 150°:180°

Розглянемо сигнальне сузір’я для QAM16:

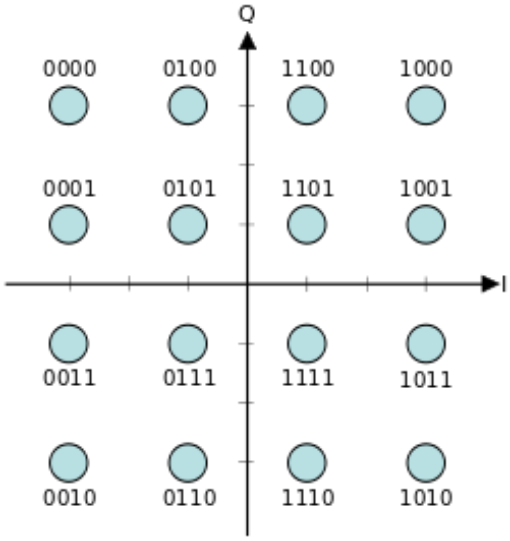


Рис. 3.13 Сигнальні сузір'я QAM16

Оскільки сигнальне сузір'я є симетричним для 3 груп символів у відповідних пропорціях:

0000 – 4 діагональні символи (0000, 1000, 0010, 1010)

0001 – 8 зовнішні символи – (0001, 0100, 1100, 1001, 1011, 1110, 0110, 0011)

0101 – 4 внутрішні символи (0101, 1101, 0111, 1111)

Кожен символ складається з 4 біт, кожен з яких буде мати різну ймовірність бітової помилки. Для того, щоб отримати середню бітову помилку, враховуємо, що ймовірність передачі кожного з символів однакова.

Враховуючи ймовірності переходу кожного біта, отримаємо наступні формули:

$$P_{b0000} = \frac{1}{2}P_{1-3} + \frac{1}{2}P_{2-4}, \tag{3.24}$$

$$P_{b0100} = \frac{1}{2}P_1 + \frac{1}{2}P_2 + \frac{1}{2}P_3 + \frac{1}{2}P_4, \tag{3.25}$$

$$P_{b0101} = \frac{1}{2}P_{1-3} + \frac{1}{2}P_{2-4}. \tag{3.26}$$

Середня бітова помилка може бути розрахована наступним чином:

$$P_b = \frac{1}{4}P_{b0000} + \frac{1}{2}P_{b0100} + \frac{1}{4}P_{b0101} \tag{3.27}$$

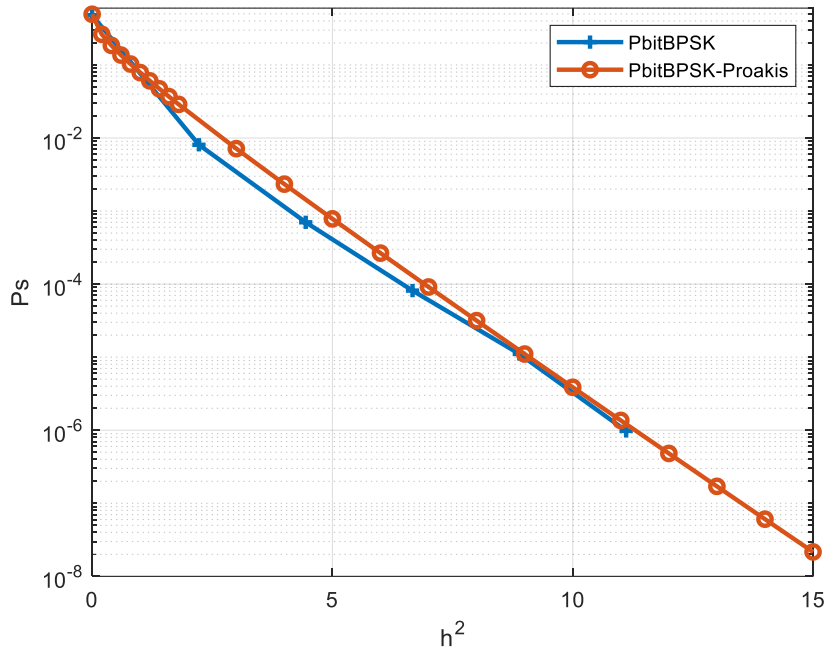


Рис. 3.14 Графік залежності ймовірності помилок біту від h^2 для BPSK

Для BPSK формули Прокіса та результати, отримані з використанням векторно-вазового методу співпадають. Це підтверджує достовірність використання ВФМ для визначення ймовірності помилок багатопозиційних сигналів.

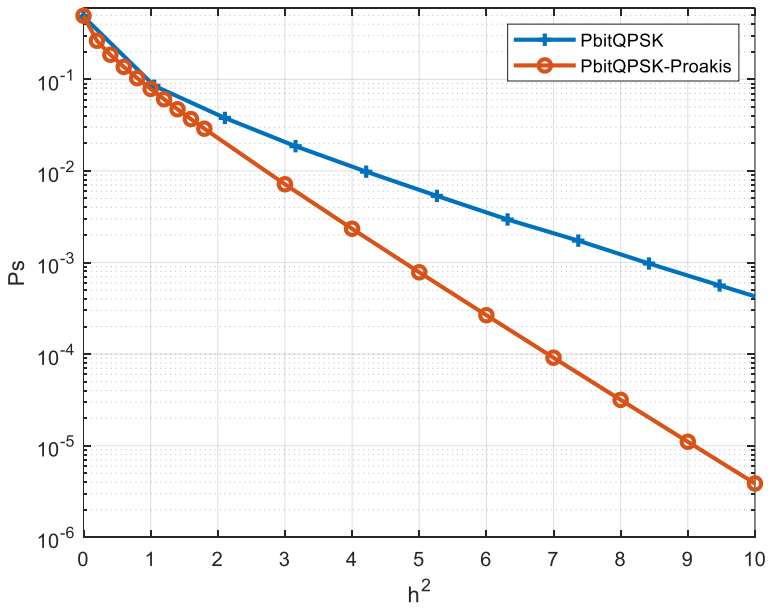


Рис. 3.15 Графік залежності ймовірності помилок біту від h^2 для BPSK

У формулах Прокіса вводиться допущення що границі бітової помилки для BPSK та QPSK одинакові. Тому що ймовірність бітової помилки для QPSK така сама, як і для BPSK. Але такий розрахунок є помилковим, так як QPSK та BPSK мають різні границі прийняття рішень.

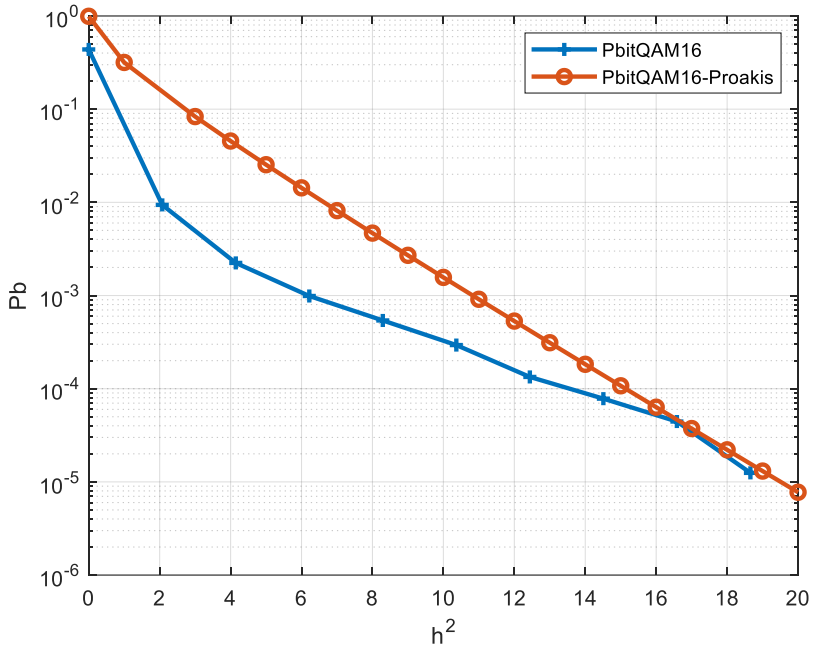


Рис. 3.16 Графік залежності ймовірності помилок біту від h^2 для QAM16

При розрахунку бітової помилки для QAM-16, розраховані значення для P_b не співпадають з формулами Прокіса для значень $h^2<16$. У розрахунках Прокіса для $h^2=0$ ймовірність помилки Pb>1, що не відповідає дійсності. Тому можна стверджувати, що формули Прокіса для малої енергетики не точні.

Отже, завдяки застосуванню векторно-фазового методу, побудовані точні аналітичні співвідношення для визначення ймовірності помилки бітів і символів багатопозиційної маніпуляції, що є коректними при будь-якій енергетиці каналу.

Суттєвим недоліком векторно-фазового методу є його громіздкість на етапі чисельного інтегрування. Тому альтернативою аналітичним розрахункам є використання прийомів імітаційного моделювання в межах запропонованого методу. Зокрема, для сигналів QAM-64 розрахунок показників достовірності виконано саме таким чином.

Прикладом доцільного використання отриманих кількісних показників завадостійкості є задача визначення відповідності інтервалів відношень потужностей сигнал/шум та рекомендованих видів багатопозиційної маніпуляції за критерієм досягнення найбільшої пропускної спроможності каналу зв'язку відповідно до виразу (3.1).

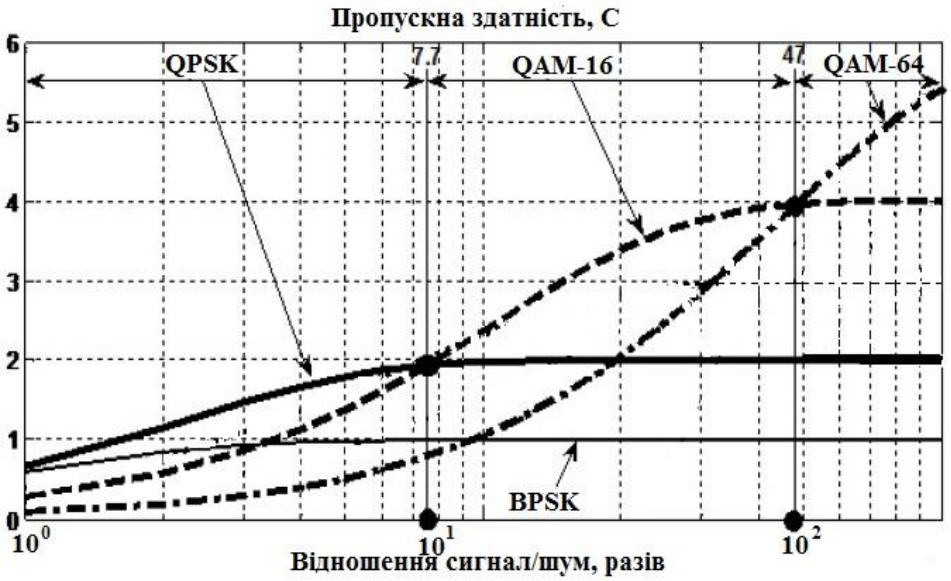


Рис. 3.17 Залежність пропускної здатності каналу зв'язку від відношення рівня сигналу до рівня шуму для різних видів багатопозиційної модуляції

Можна зробити висновок, що, згідно Рис. 3.17 доцільно використовувати розглянуті види модуляції за критерієм максимальної пропускної здатності в залежності від відношення енергії сигналу до спектральної щільності шуму в точці прийому (табл. 3.5).

Таблиця 3.5 Граничні значення відношення сигнал/шум для обраних видів багатопозиційної модуляції

№ інтер-валу	Відношення сигнал/шум, разів	Оптимальний вид багатопозиційної модуляції за критерієм пропускної здатності
1.	$0 < h^2 < 7{,}7$	QPSK
2.	$7{,}7 < h^2 < 47$	QAM-16
3.	$47 < h^2 < 100$	QAM-64

Оскільки маніпуляції більш високих порядків погіршують завадостійкість каналів електрозв’язку, то для безпроводових систем передавання інформації запропоновано використання відомого способу боротьби з цим явищем — адаптивної маніпуляції.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Сучасне суспільство прагне задовольнити власні потреби з боку отримання інформації за допомогою високої швидкості передачі та достовірності, саме тому проблема постає досить гостро в умовах обмежених ресурсів каналів зв'язку, а саме частотних та енергетичних. Перед науковцями та інженерами стоїть завдання як найефективніше використовувати дані ресурси та при цьому не втрачати показники головних параметрів каналу.

2. Багатопозиційні сигнали є одним із конструктивних засобів підвищення пропускної здатності каналів зв'язку. Суть полягає у можливості передачі кількох біт інформації у кожному одиночному маніпульованому сигналі.

3. В розділі проведено аналіз впливу позиційності маніпуляції на завадостійкість дискретних каналів електрозв’язку. Показано, що маніпуляції більш високих порядків погіршують завадостійкість каналів електрозв’язку. Для безпроводових систем передавання інформації запропоновано використання відомого способу боротьби з цим явищем — адаптивної маніпуляції.

4. Порівняння результатів отриманих формул з відомими (рис. 11) показало повний збіг результатів для випадку BPSK і QPSK з раніше отриманими видатними вченими, що працювали в області завадостійкості багатопозиційних сигналів [101, 24], що підтверджує достовірність та адекватність запропонованого методу визначення ймовірності помилок багатопозиційних сигналів. При цьому відмінності в отриманих результатах для сигналів, для яких не наведено аналітичних виразів у відомих працях вчених [74,

12], для сигналів QAM-16 розбіжність з відомими приблизними виразами складає до 4 дБ по шкалі h^2.

5. Символьна помилка використовується як проміжний етап при розрахунку бітової помилки. Важливим показником стану каналу зв'язку є бітова помилка, однак розрахунки бітової помилки для низької енергетики не є точними. Для невеликих значень відношення сигнал/шум значення бітової помилки розходяться, але при збільшенні h^2 це розходження становиться менш помітним. Векторно-фазовий метод отримати точні розрахунки при будь-якій енергетиці, на відміну від формул Прокіса, що можуть використовуватись тільки для високої енергетики.

6. Особливістю і перевагою формул, отриманих з використанням векторно-фазового методу, є їх точність і повний збіг з результатами імітаційного моделювання з використанням запропонованого методу. Особливість формул за векторно-фазовим методом полягає у їх достовірності, адже вони більш точно вираховують ймовірності помилок та не піддаються такої ж універсалізіції як інші формули розрахунку ймовірності символьних і бітових помилок.

7. Вдосконалено векторно-фазовий метод для визначення завадостійкості багатопозиційних сигналів, при цьому відмінність полягає в тому, що реалізовано можливості використання методу в умовах низької енергетики каналу (при значеннях відношення сигнал/шум до 10 дБ). Завдяки цьому підвищено точність оцінці показників завадостійкості сигналів при значеннях відношення сигнал шум до 10 дБ, доведена суттєва похибка при використанні традиційного аналітичного оцінювання достовірності передавання інформації в умовах низької енергетики, що суттєво позначилося на точність розрахунків показників продуктивності каналу зв'язку в цих умовах. Усунена похибка визначення ймовірності помилки pb складає до 90% при зміні відношення сигнал/шум в діапазоні 2-5 дБ та до 25% в діапазоні 5-10 дБ у порівнянні із використанням традиційних аналітичних формул.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ПРОДУКТИВНІСТІ КАНАЛІВ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ СТС В УМОВАХ НИЗЬКОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

4.1 Аналіз методики визначення параметрів продуктивності каналів передачі інформації СТС

Центральне місце в теорії інформації займає теорема Шеннона, згідно з якою, якщо швидкість формування повідомлень джерелом не перевищує пропускну здатність каналу, то існує спосіб кодування і декодування, при якому можна здійснити передачу повідомлень каналом з перешкодами з якою завгодно малою ймовірністю помилки [82]. Однак теорема не визначає параметри завадостійкого коду та умов його отримання.

Значними характеристиками каналу зв'язку є пропускна здатність, яка характеризує граничну швидкість передачі інформації по каналу зв'язку, і продуктивність R цього ж каналу зв'язку, як фактичну швидкість передачі інформації.

Відповідно до теореми Шеннона, для передачі інформації з якою завгодно малою ймовірністю помилки за рахунок кодування, необхідно, щоб продуктивність не перевищувала пропускну здатність $C \geq R$ [103].

Хоча основним завданням існуючих та перспективних телекомунікаційних систем є передача заданого обсягу інформації, їх побудова часто ґрунтується виключно на критеріях достовірності. Водночас актуальним для цифрових систем зв'язку є завдання забезпечення ефективності використання обмежених енергетичних та частотних ресурсів каналу зв'язку. Для економії частотного ресурсу в сучасних системах зв'язку використовується багатопозиційна маніпуляція, сигнали якої більш вразливі до завад, ніж сигнали BPSK.

Зобразимо графічні залежності пропускної здатності джерела дискретних повідомлень від ймовірності помилки, швидкості формування символів та енергетичного параметру h^2 для фазової модуляції BPSK.

Для каналу з перешкодами пропускна здатність визначається наступним чином:

$$C = V_c[1 + p_{\text{сим}} \log_2 p_{\text{сим}} + (1 - p_{\text{сим}}) \log_2 (1 - p_{\text{сим}})]. \quad (4.1)$$

Для випадку когерентного способу обробки сигналів:

$$p_{\text{сим}} = \frac{1}{2}\left[1 - \Phi\left(\sqrt{2h^2}\right)\right]. \quad (4.2)$$

Залежність від ймовірності помилки $p_{\text{сим}}$ матиме вигляд:

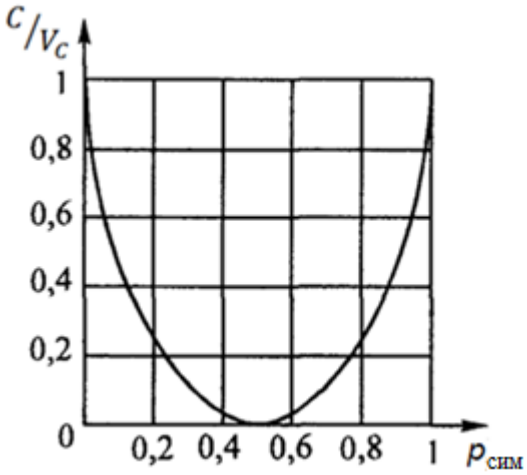


Рис. 4.1 Залежність пропускної здатності від ймовірності помилки.

При $p_{\text{сим}}$*=0* маємо канал зв'язку без завад і відповідно до виразу (4.1) $C = V_c$. При $p_{\text{сим}}$*=1/2* пропускна здатність каналу дорівнює нулю, оскільки при такій ймовірності помилки послідовність двійкових символів можна одержати, не передаючи сигнали каналом, а вибираючи їх навмання (тобто послідовності на виході та вході каналу не залежні).

Випадок, при якому $C = 0$, називають обривом каналу. Те, що пропускна здатність при $p_{\text{сим}}$*=1* максимальна, пояснюється тим, що в цьому випадку достатньо інвертувати всі вихідні символи, щоб правильно відновити вхідний сигнал [82].

Графік зміни пропускної здатності при зміні швидкості формування символів V_c має наступний вигляд:

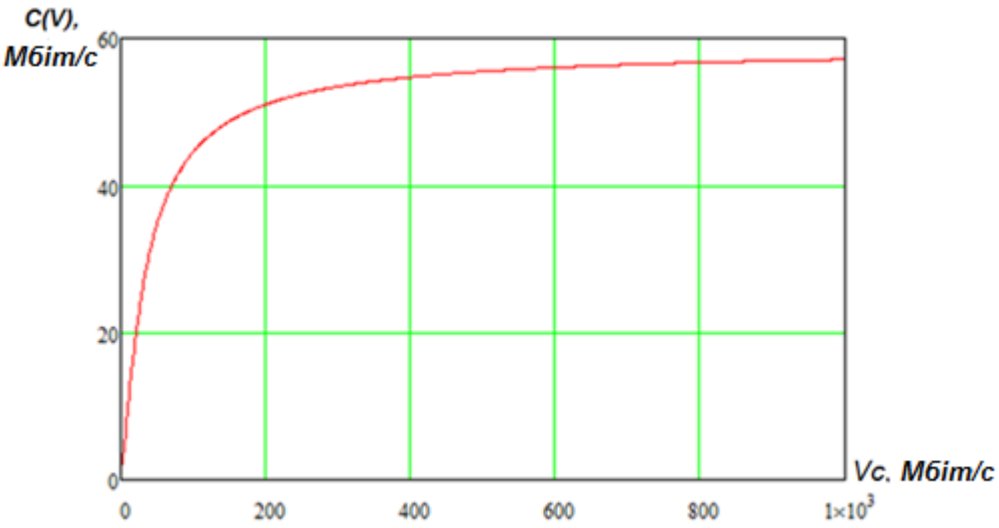


Рис. 4.2 Залежність пропускної здатності від швидкості формування символів

При зміні V_c пропускна здатність змінюється по логарифмічному закону. Спочатку вона стрімко збільшується, а потім швидкість зростання значно зменшується.

При зміні енергетичного параметру h^2 пропускна здатність каналу змінюється наступним чином:

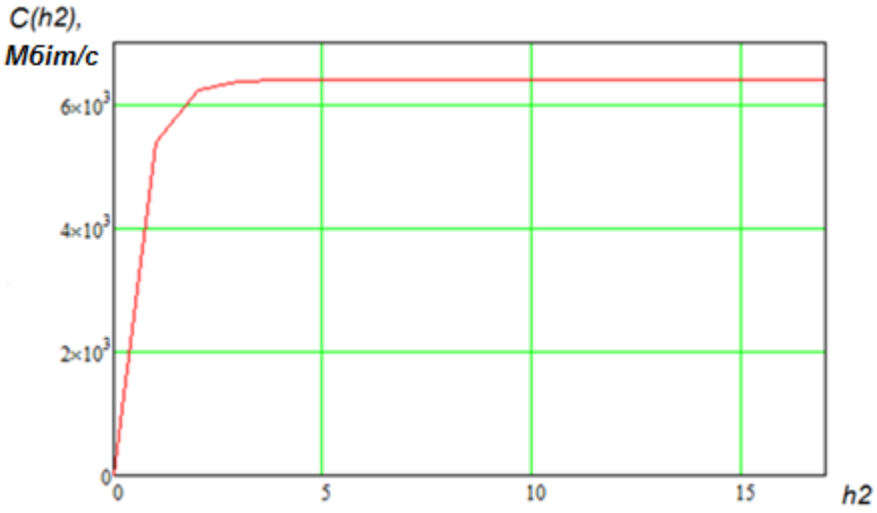


Рис. 4.3 Залежність пропускної здатності від енергетики каналу

Як і в попередньому випадку, пропускна здатність має логарифмічний характер поведінки. Спочатку вона стрімко зростає, але потім графік наближається до значення швидкості формування символів, оскільки при

збільшенні параметру h^2 ймовірність помилки прямує до нуля. Це в свою чергу призводить до того, що вираз в квадратних дужках в формулі прямує до одиниці.

4.2 Аналіз енергетичних границь використання сигналів каналів передачі інформації СТС за критерієм продуктивності

На продуктивність джерела дискретних повідомлень, якщо не враховувати застосовування тих перетворень сигналу, що спрямовані на підвищення ефективності використання ресурсів та на підтримку достовірності передачі символів, впливають енергія корисного сигналу, потужність завад, швидкість, з якою передаються повідомлення.

Продуктивність прямопропорційно залежить від швидкості формування символів. Тому збільшення останньої приводить до задоволення потреб користувачів, головною вимогою яких є передача якомога більшої кількості інформації за коротший час. Але збільшувати швидкість можна лише до того часу, поки це є раціонально, тобто поки продуктивність не досягне свого максимального значення. Для прикладу на Рис. 4.4 зображена зміна продуктивності при збільшенні швидкості передачі символів для сигналів багатопозиційної маніпуляції QPSK, QAM-16, QAM-64. [93]

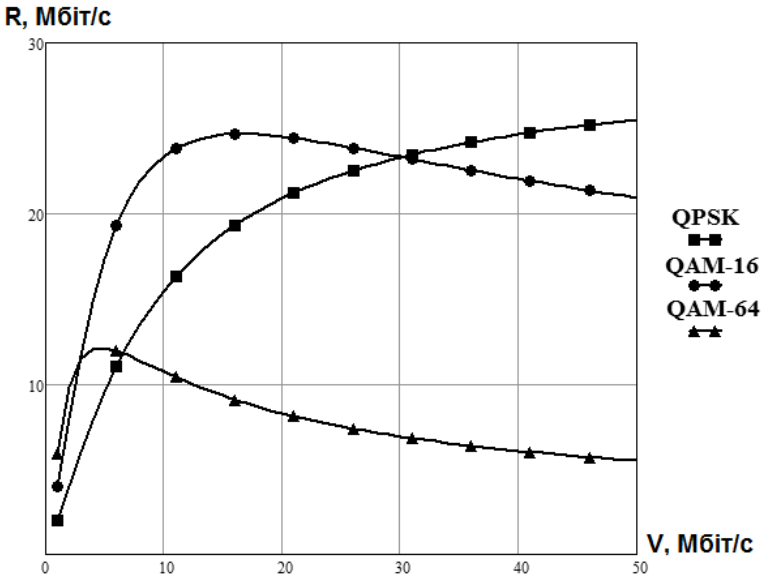


Рис. 4.4 Залежність продуктивності від швидкості передачі символів

Продуктивність прямопропорційно залежить від енергетичного параметру h^2, який характеризує відношення середньої енергії сигналу в точці прийому до односторонньої спектральної потужності білого шуму. Для сигналів QPSK, QAM-16, QAM-64 модуляцій ця залежність представлена на Рис. 4.5.

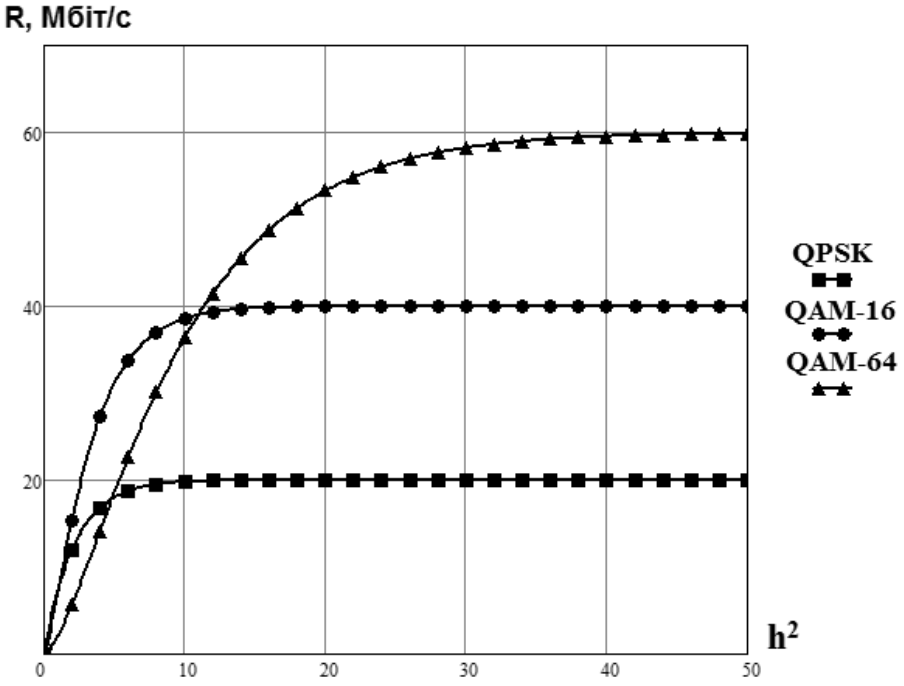


Рис. 4.5 Залежність продуктивності від енергетики каналу

При незмінних параметрах шуму та зростанні енергії сигналу продуктивність збільшується до того значення, при якому ймовірність помилки стає близькою до нуля.

Розповсюдження радіохвиль в каналах зв’язку має складний характер. По-перше, виникає додаткове затухання хвиль із-за їх поглинання в середовищі розповсюдження. По-друге, відбиття радіохвиль від тих чи інших предметів або електричних неоднорідностей може призвести до того, що в місці прийому буде існувати ряд променів (багатопроменеве розповсюдження); інтерференція, що виникає, приведе до зміни коефіцієнта передачі каналу зв’язку. Якщо при цьому відбувається переміщення відбиваючих об’єктів чи об’єктів, між якими здійснюється зв'язок, то цей коефіцієнт передачі стає випадковим. По-третє, може виявитись, що пряма траса між передавачем та приймачем перекрита майже непрозорим для радіохвиль предметом. У такому випадку зв'язок

можливий лише за рахунок явища дифракції [101]. Але будь-яку складну модель каналу з завадами можна представити еквівалентною моделлю з білим гаусівським шумом, який характеризується певним значення спектральної щільності потужності шуму.

4.3 Методика визначення екстремумів продуктивності в різних енергетичних умовах

Забезпечення ефективності використання обмежених енергетичних та частотних ресурсів є актуальною задачею в сучасних телекомунікаційних системах. Досягнення цієї мети можливе за рахунок дослідження екстремумів продуктивності в каналах зв'язку згідно зі сформульованою нижче методикою.

Енергетичні характеристики системи залишаються сталими при збільшенні швидкості передачі символів. Це виражає параметр α, який буде змінюватися задля виявлення закономірностей у зміні поведінки продуктивності джерела дискретних повідомлень.

Вихідними даними для методики є набір наступних параметрів:

n – довжина блока завадостійкого коду;

$p_{\text{біт_декод}}$ – задана достовірність (бітова ймовірність помилки на виході декодеру);

α – енергетичний параметр, що рівний відношенню потужності корисного сигналу P_c та односторонньої спектральної потужності шуму N_0;

V_C – швидкість передачі символів в каналі зв'язку.

За допомогою цих параметрів визначається наявна бітова ймовірність помилки в каналі. Вона залежить від способу формування та обробки сигналу.

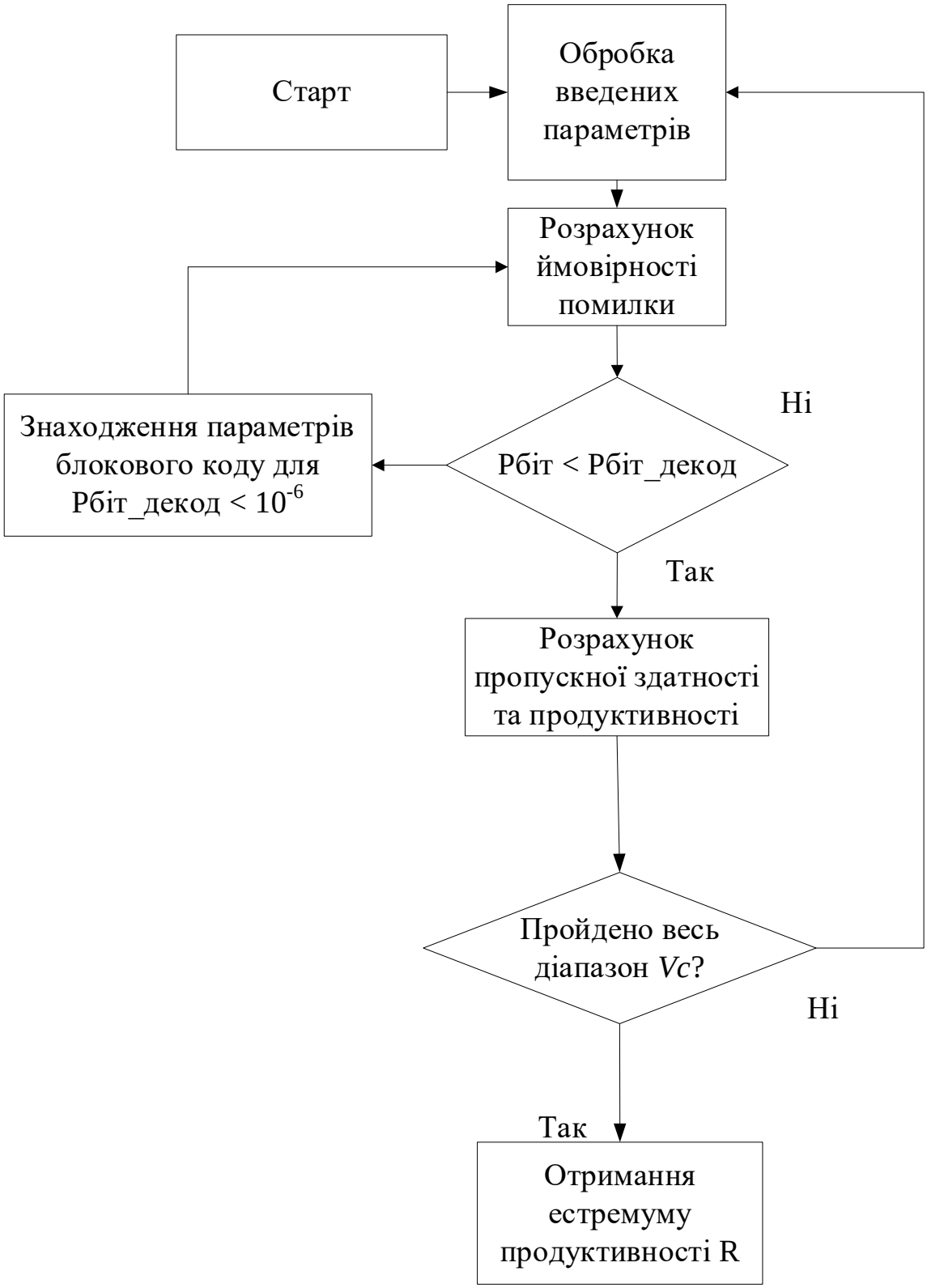


Рис. 4.6 Алгоритм знаходження екстремуму продуктивності в різних енергетичних умовах

Початкове значення швидкості передачі символів рівне 0,1 Мбіт/с. Для цього значення знаходиться символьна та бітова ймовірності помилки, остання з

яких порівнюється з заданою. Якщо виконується умова $p_{\text{біт}} < p_{\text{біт_декод}}$, то знаходиться значення пропускної здатності за формулою (1.3):

$$C = V_c \left[log_2 M + p_{\text{сим}} \, log_2 \frac{p_{\text{сим}}}{M-1} + (1 - p_{\text{сим}}) \, log_2 (1 - p_{\text{сим}}) \right],$$

та продуктивності за формулою (4.3):

$$R = \frac{k}{n} \cdot V_{\text{C}} \cdot log_2 M [1 + p_{\text{біт}} \cdot log_2 \, p_{\text{біт}} + (1 - p_{\text{біт}}) \cdot log_2 (1 - p_{\text{біт}})], \qquad (4.3)$$

де V_{C} – швидкість передачі символів;

$p_{\text{біт}}$ – ймовірність бітової помилки.

Постійне підвищення швидкості передачі V_C призводить до необхідності використання кодів з більшою здатністю виправлення і меншою швидкістю кодування r_k. Протилежність зазначених тенденцій зміни продуктивності породжує екстремуми (максимуми) показника R [95].

При цьому потреби в кодуванні немає, тому $r_{\text{к}} = 1$.

В разі, коли $p_{\text{біт}} \leq p_{\text{біт_декод}}$, нема потреби використовувати завадостійке кодування як спосіб підвищення завадостійкості. В тому випадку, коли бітова ймовірність в каналі $p_{\text{біт}} > p_{\text{біт_декод}}$, використовується надлишкове кодування.

Параметри надлишкового кодування (коригувальна здатність та кількість інформаційних символів в блоці) визначаються з границі Плоткіна. При застосуванні блокового кодування ймовірність бітової помилки визначається за формулою (4.4).

$$p_{\text{біт_декод}} = \frac{1}{n} \sum_{j=S+1}^{n} j \cdot C_n^j p_{\text{біт}}^j (1 - p_{\text{біт}})^{n-j} \qquad (4.4)$$

Тобто для певного значення $p_{\text{біт}}$ розраховується $p_{\text{біт_декод}}$ при поступовому збільшенні S, починаючи з 1, до тих пір, поки $p_{\text{біт_декод}}$ не стане менше 10^{-6}. Знайдене S – це та кількість символів, виправлення якої необхідне для забезпечення достовірності, що вимагається.

Після розрахунку S необхідно знайти додаткові параметри коду, тобто мінімальну відстань по Хеммінгу d та кількість інформаційних символів k.

$$d = 2S + 1$$

Кількість інформаційних символів k знаходимо з границі Плоткіна, яка визначає досяжні властивості коригувальних кодів:

$$k \leq n - 2d + 2 + log_2 d$$

Наступним кроком є обчислення пропускної здатності та продуктивності за вищевказаними формулами.

Дослідження проводиться при поступовому збільшенні швидкості передачі символів V_c.

Задача знаходження екстремума продуктивності зводиться до пошуку максимуму:

$$\max_{V_C \to \infty} R(n, p_{\text{біт}}, \alpha = const) \tag{4.5}$$

Формула (4.5) вказує, що необхідно знайти максимум продуктивності при постійній довжині блоку n, заданій достовірності $p_{\text{біт}}$, заданому енергетичному параметру α в умовах зростання швидкості передачі V_C.

Екстремуми продуктивності для різних наборів вихідних параметрів визначаються на основі ітераційного методу при покроковому нарощуванні значення швидкості V_C.

В якості обмежень виступають наступні умови:

- Постійне значення показника енергетичної характеристики α,
- Необхідне значення бітової ймовірності помилки $p_{\text{біт}} = 10^{-6}$

На рис. 4.7 зображені графіки пропускної здатності і продуктивності, які відображають зміну відповідних показників для бінарних сигналів BPSK (рис. 4.7, а), QPSK (рис. 4.7, б), QAM-16 (рис. 4.7, в), QAM-64 (рис. 4.7, г) при збільшенні швидкості V_C у випадку α=32 c^{-1}.

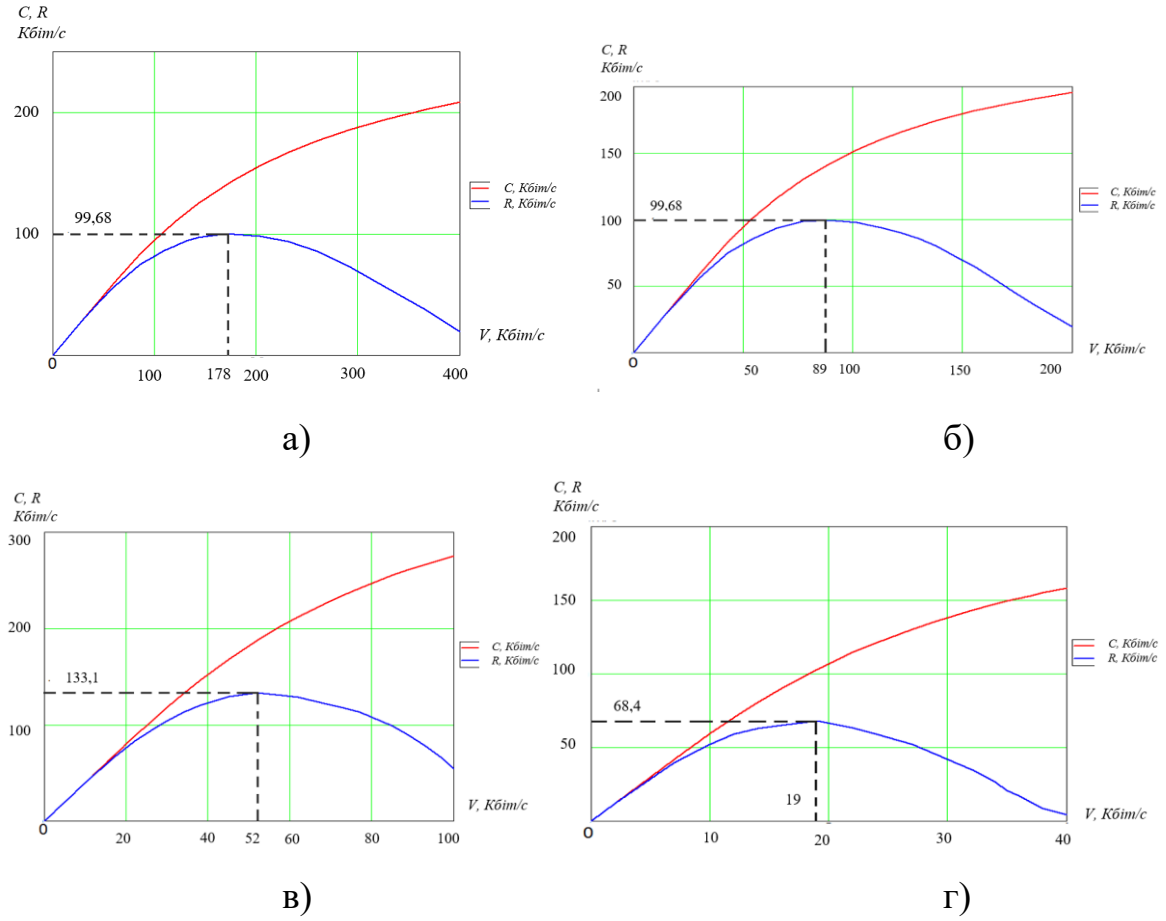


Рис. 4.7. Графік пропускної здатності та продуктивності при α=32 $с^{-1}$, n=100 для а)BPSK; б) QPSK; в) QAM-16; г) QAM-64

При збільшенні довжини блоку коду, характер залежності продуктивності від швидкості передачі символів зберігається. У табл. 4.1 наведені результати дослідження для випадку, коли n=100, 200 та 1000 символів для α=32 $с^{-1}$.

Таблиця 4.1 Зміна максимальної продуктивності для α=*320 кГц* при зміні *n*

	BPSK				*QPSK*				*QAM-16*			
	V, Мбіт/с	R_{max}, Мбіт/с	*C*, Мбіт/с	*η*	*V*, Мбіт/с	R_{max}, Мбіт/с	*C*, Мбіт/с	*η*	*V*, Мбіт/с	R_{max}, Мбіт/с	*C*, Мбіт/с	*η*
100	178	99,68	144,32	0,691	89	99,68	141,8	0,703	52	133,12	187,56	0,710
200	235	123,37	168,25	0,773	113	123,17	160,41	0,768	63	157,5	214,31	0,735
300	248	137,22	172,73	0,794	124	137,22	167,12	0,821	76	172,26	240,17	0,717
400	268	146,06	179,04	0,816	134	146,06	172,46	0,847	74	182,04	236,55	0,769
500	305	153,11	189,19	0,809	148	152,73	178,92	0,854	77	188,49	241,94	0,779
600	310	158,61	190,43	0,833	155	158,61	181,76	0,873	84	194,31	253,52	0,766
700	304	162,85	188,94	0,862	152	162,58	180,57	0,900	83	198,72	251,94	0,789
800	315	166,55	191,65	0,869	159	166,55	183,29	0,909	83	202,1	251,94	0,802
900	330	169,76	195,12	0,870	165	169,76	185,45	0,915	85	205,13	255,07	0,804
1000	348	172,6	199	0,867	174	**172,6**	188,43	0,916	85	**207,73**	255,07	0,814

При збільшенні швидкості передачі символів V_C збільшується пропускна здатність C і продуктивність R. З ростом V_C різниця між цими величинами збільшується. Після точки максимуму пропускна здатність C продовжує зростати, а продуктивність R падає, що відбувається внаслідок необхідних витрат на завадостійке кодування для забезпечення якості передачі інформації не менше 10^{-6}. Виходячи з аналізу отриманих результатів, простежується пропорційна залежність значення екстремуму продуктивності R та енергетичного параметра α. Аналітичні залежності цих величин для сигналів BPSK, QPSK, QAM-16 і QAM-64 зведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 Залежність значення екстремума R і параметра α

	BPSK	QPSK	QAM-16	QAM-64
n=100	R = 0,31 α	*R = 0,31 α*	*R = 0,42 α*	*R = 0,21 α*
n=200	R = 0,38 α	*R = 0,38 α*	*R = 0,49 α*	*R = 0,25 α*
n=1000	R = 0,54 α	*R = 0,54 α*	*R = 0,65 α*	*R = 0,33 α*

Графічна залежність продуктивності R і значення параметра α, при якому досягається максимум R від довжини блоку коду n для сигналів BPSK, QPSK, QAM-16 і QAM-64 має вигляд, зображений на рис.4.8

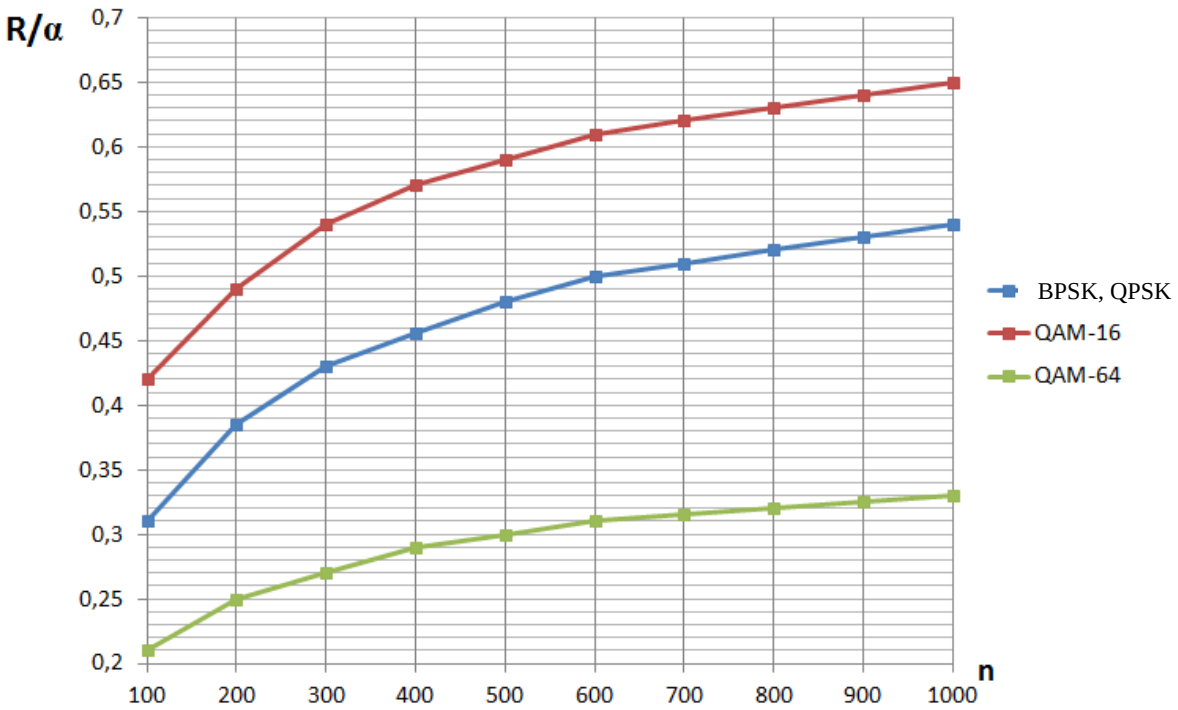


Рис. 4.8. Залежність продуктивності та параметру α від довжини блоку коду

При фіксованому значенні потужності корисного сигналу, тобто коли α має постійне значення, збільшення продуктивності призводить до зменшення параметра h^2, що призводить до погіршення достовірності прийому символів. Підтримка ймовірності помилок на постійному рівні можлива шляхом збільшення довжини блокового коду (рух графіком вправо). При фіксованій довжині блоку і ймовірності помилки потрібно підтримувати постійне співвідношення R і α, тобто, збільшуючи продуктивність, потрібно збільшувати потужність сигналу, і навпаки, зменшення однієї величини вимагає зменшення та інший. Таким чином, аналіз отриманих графіків свідчить про наявність інваріантності вибору задля досягнення необхідного результату.

4.4 Особливості забезпечення необхідної продуктивності каналів передачі інформації СТС в умовах низької енергетики

Сьогодні сенсорні мережі набули широкого поширення і важливість їх ролі в нашому повсякденному житті не може бути недооцінена. Значною мірою, наша здатність будувати і розуміти ці мережі залежить від розуміння того, як радіосигнали послаблюються з відстанню в реальних умовах. Прогнозуючи ослаблення радіосигналу, ми можемо краще планувати і діагностувати мережу.

Радіопланування є невід’ємною частиною оптимізації розташування сенсорів у архітектурі мережі та ефективного використання частотно–планового ресурсу.

Як ми вже знаємо, навіть невеликі зміни в місці розташування безпроводової станції можуть стати причиною значних змін в рівня прийнятого сигналу. З точки зору проектування безпроводової мережі наступний фактор повинен бути прийнятий до уваги. Даним фактором є рівень середньої потужності в залежності від відстані від базової станції.

Інтенсивність трафіку, що надається абонентам, рідко рівномірно розподілена в зоні покриття системи. Безпроводові сенсорні мережі можуть відповідати трафіку, що обслуговується системою в трафік, який потребують

користувачі. Це робиться шляхом інтелектуального управління розмірами стільників і призначенням каналів. Проте, досвід роботи у сфері розвитку систем показує, що необхідна пропускна здатність може змінюватися в часі. Зазвичай це викликано збільшенням числа користувачів, які входять в зону покриття стільникової системи і знаходяться в даній області. Обидві проблеми передбачають необхідність збільшення пропускної спроможності системи та відповідності його топографії розподілу пропонованого трафіку.

Зростання попиту на мобільні широкосмугові послуги веде до істотного збільшення навантаження на традиційні бездротові мережі. Оператори прагнуть розширити можливості замовників і партнерів, вимоги яких безперервно зростають. Щоб задовольнити ці вимоги і зберегти конкурентоспроможність, операторам потрібні економічно ефективні архітектури, здатні в доступному для огляду майбутньому доставляти абонентам послуги мережевого доступу на вимогу.

Одним з головних завдань оператора мобільного зв'язку – забезпечувати якість обслуговування різних сервісів, а так само і здійснювати постійний контроль цього параметра.

Для кількісного виміру якості обслуговування, розглядаються кілька взаємопов'язаних аспектів мережевого сервісу часто, наприклад, кількість помилок, пропускна здатність, затримки передачі, доступності, джитера і т.д.

Пропускна здатність системи безпроводового зв'язку, обумовлена числом сенсорів, яких вона може обслужити, дуже важлива характеристика, і значна частина зусиль при проектуванні, створенні і розвитку системи в більшості випадків спрямовується саме на забезпечення достатньо високої ємності. Фактично і сам стільниковий зв'язок, заснований на принципі повторного використання частот, з'явився у відповідь на потребу побудові системи рухомого зв'язку при використанні строго обмеженої смуги частот.

Ключові критерії зростання ринку сенсорних мереж включає зростання трафіку мобільної передачі даних в умовах дефіциту спектра, необхідність в розвантаженні трафіку і розширення зон покриття, у тому числі покриття

всередині приміщень.

У другому випадку (вдосконалення зон покриття) нано- і пікосоти можуть встановлюватися в місцях, де сигнал від звичайних безпроводових станцій є слабким або зовсім відсутній. Зазвичай це спостерігається усередині будівель, а також на відкритій місцевості, як правило, на межах існуючих стільників в приміських і сільських районах. Вирішення цієї проблеми за допомогою традиційних макросот вимагає величезних витрат.

Одне з ключових завдань оператора є безшовне впровадження малих сот в реальній мережі, так як це може мати потенційно негативний вплив на ключові показники ефективності, такі як темпи падіння через інтерференцію сигналів макро і мікро базової станції. Нано- і пікосоти доцільно розгортати для зниження навантаження макро базової станції у випадках з численними сенсорами, але вимоги до розгортання і витрати можуть бути знижені за допомогою доцільного розміщення і вбудованим джерелом живлення, фідерів, і захисту від перенапруг. При великій кількості малих базових станцій, комбінація великих і малих стільників повинні забезпечувати цілісність, простоту і економічність.

Самоорганізована мікро базова станція може автоматично виявляти навколишні умови середовища радіо і автоматично планувати і конфігурувати параметри радіо, такі як частота, код скремблювання, і потужність передачі. Традиційна базова станція не може зробити це, і саме тому мікро базова станція з функціями SON (Self-Organizing Networks) економить на 15% менше витраченого часу і коштів.

Більш того, мікро базова станція може автоматично виявляти зміни в навколишньому радіопросторі, а коли новий сусід розгорнутий, вона може автоматично оптимізувати параметри мережі для кодів скремблювання, сусідні стільники, потужність передачі та ін.. Для традиційної мережі, оптимізація мережі є важливою частиною обслуговування. При цьому витрати можуть знижуватися від 10 до 30%.

Для підвищення якості зон покриття в будівлях малі встановлюються в конгрес-центрах, готельних холах і офісних приміщеннях, це дозволяє

підвищити якість голосового зв'язку і пакетної передачі даних там, де сигнал звичайних базових станцій слабкий або взагалі відсутній. Іншими словами, їх доцільно встановлювати там, де їх встановлення та експлуатація буде коштувати дешевше, ніж інші способи розширення зон покриття в будівлях.

4.5 Оцінка інформаційної ефективності використання каналів передачі інформації СТС в умовах низької енергетики

4.5.1 Аналіз методики оцінки ефективності каналів передачі інформації

Різні системи зв'язку для передачі дискретних і безперервних повідомлень, незважаючи на їх відмінність як за призначенням, так і за способами реалізації, характеризуються певними кількісними показниками. Основними з них є швидкість і достовірність передачі інформації.

Для забезпечення заданої швидкості передачі інформації R і заданої достовірності доводиться використовувати деяку потужність сигналу в точці прийому P_C і займати певну смугу частот в каналі зв'язку. Яка потужність і яка смуга частот при цьому будуть потрібні, залежить від використовуваної системи передачі інформації, а саме, від способу трансформації повідомлення в сигнал (модуляція, кодування і т.д.).

Являє інтерес порівняння між собою різні системи зв'язку по мірі ефективності використання ними основних ресурсів каналу — потужності сигналу і займаної смуги частот — і досягнутої при цьому пропускної здатності і продуктивності.

Нижче це порівняння проводиться для деяких систем у випадку, коли сигнали передаються в каналі з адитивним білим гауссовим шумом. При передачі дискретних повідомленні достовірність передачі визначається ймовірністю помилки в прийомі одиночного символу $P_{\text{ОШ}}$.

В якості показників, які використовуються для порівняння телекомунікаційних систем на фізичному рівні, проф. Зюко А. Р. запропоновано

[71] коефіцієнти енергетичної β і частотної ефективності γ, які кількісно дають оцінку питомої енергетичної і частотної ефективності систем передачі інформації (СПІ):

$$\beta = \frac{R}{\alpha}, \tag{4.6}$$

$$\gamma = \frac{R}{F}. \tag{4.7}$$

де R – швидкість передачі символів від джерела (продуктивність джерела)

β – коефіцієнт використання каналу по потужності (показник енергетичної ефективності);

γ – коефіцієнт використання каналу по смузі частот (показник частотної ефективності);

$\alpha = P_C / N_0$ – енергетичний показник, що відображає відношення потужності сигналу в точці прийому P_C до спектральної щільності шуму N_0;

ΔF – смуга частот каналу, що надається для передачі сигналу.

Збільшення значень кожного з показників є ознакою зростання ефективності використання ресурсів.

Узагальненим показником ефективності використання ресурсів каналу зв'язку в [71] запропоновано показник інформаційної ефективності η:

$$\eta = \frac{R}{C} = \frac{R}{\Delta F\, log(1+Q)} = \frac{\alpha}{log(1+\frac{\alpha}{\beta})}, \tag{4.8}$$

де C – пропускна здатність каналу зв'язку, що визначається формулою Шеннона [82]:

$$C = \Delta F\, log(1+Q), \tag{4.9}$$

де $Q = P_C / P_Ш$ – енергетичний показник, що відображає відношення потужності сигналу в точці прийому P_C до потужності шуму $P_Ш$ у смузі прийому сигналу ΔF:

$$P_Ш = \Delta F\, N_0. \tag{4.10}$$

В припущенні, що значення η_{max} =1, в [71] запропонована наступна гранична залежність між β і γ, виходячи з співвідношень (4.6)...(4.8):

$$\beta = \frac{\gamma}{2^{\gamma} - 1} \tag{4.11}$$

Формула (4.11) є граничною і показує найкращий обмін між β і γ. Проте в ній закладено діалектичне протиріччя показників: при незмінному значенні η_{max} =1 показник β досягає максимуму при $\gamma = 0$, а γ досягає максимуму при $\beta = 0$.

При цьому значення показника γ може змінюватися в широких межах (від 0 до значень, які наближаються до ∞), в той час, як β обмежений зверху:

$$\beta_{max} = \frac{1}{ln\,2} = 1.443 \text{ при } \Delta F \to 0.$$

Отже, при зростанні енергетичної ефективності β, частотна (спектральна) ефективність γ зменшується, тому максимальне значення β досягається при мінімальному γ і навпаки.

Це одна з головних закономірностей побудови нових телекомунікаційних систем: розробник системи має можливість вибрати одну із стратегій – максимум частотної (при мінімальній енергетичній) ефективності, максимум енергетичної (при мінімальній частотній) ефективності або компромісну стратегію.

Лінія показника інформаційної ефективності η_{max} =1 в [71] побудована в площині енергетичної β і частотної γ ефективності у відповідність із співвідношенням (4.11).

З використанням співвідношень (4.6), (4.7), (4.10) можна показати, що показники β, γ і Q пов'язані співвідношенням:

$$\gamma = \beta \cdot Q. \tag{4.12}$$

Тоді, при використанні логарифмічного масштаба, згідно з співвідношенням (4.12), лінії з однаковими значеннями перевищення потужності сигналу над потужністю шуму $Q = \alpha / F = P_З / P_Ш$ являють собою прямі з кутом нахилу 45° в тій же площині, що і лінія показника інформаційної ефективності.

4.5.2 Модифікація методики оцінки ефективності з урахуванням особливостей каналів передачі інформації СТС

Наявність єдиної лінії інформаційної ефективності для значення η_{max} =1

істотно ускладнює вибір компромісної стратегії при альтернативному протиріччі: максимізація β при заданій якості зв'язку (наприклад, при $P_{ош} = const$ у разі передачі дискретних повідомлень), або максимізувати γ при $P_{ош} = const$.

Очевидно, що порівняння систем за узагальненим показником інформаційної ефективності η з використанням єдиної границі для $\eta = 1$ є недостатньо повним і об'єктивним.

Тому **однією з задач модифікації** існуючої методики є введення узагальненої шкали ефективності η для визначення числових значень в області $\eta = [0,1]$, яка обмежена межею Шеннона [71, 82].

Така модифікація вперше запропонована в [100], при якій номограма (Рис. 1.9) дозволяє провести гнучкий вибір компромісної стратегії з використанням шкали $\eta = [0,1]$, оскільки в реальних системах $\eta < 1$.

Друга задача витікає з принципової можливості використання площині відображення $\{\beta; \gamma\}$ для оцінки інформаційних можливостей дискретних сигналів.

Незважаючи на те, що знаменник в (4.8) для показника η визначений для пропускної здатності безперервного сигналу (4.9), чисельник цього виразу цілком може бути використаний для випадку передачі дискретних повідомлень в заданих частотно-енергетичних умовах при обумовлених умовах достовірної передачі $P_{ош} \leq P_{ош\ \textbf{треб.}}$

Важливо відзначити, що надлишкове кодування, як інструмент досягнення необхідної достовірності, є важливим фактором зміни потрібного для його реалізації частотного та енергетичного ресурсу: при збільшенні швидкості кодування погіршується частотна ефективність, в той же час підвищується енергетична ефективність.

Тому **третьою задачею** є розширення діапазону відображуваних параметрів (достовірності помилки до і після кодування) при оцінці інформаційної ефективності різних систем.

Четвертою задачею є відображення ефективності використання сигналів заданого виду модуляції на додатковій шкалі відношення сигнал/шум,

накладеної на простір зазначених трьох попередніх показників ефективності. Така шкала використовувалася автором методики [71], однак не була об'єднана в нерозривний комплекс.

4.5.3 Оцінка показників інформаційної ефективності безпроводових каналів зв’язку СТС

Для вирішення першої з поставлених задач побудуємо еквіпотенціальні криві, які б відображали точки з однаковою інформаційною ефективністю η неперервного або дискретного каналу. Для цього скористаємося формулою (4.8), де замість інформаційної ефективності підставимо значення 0,5; 0,25; 0,125; 0,0625. Результати представлені на 4.9.

Згідно запропонованій шкалі, інформаційна ефективність η зростає з наближенням до межі Шеннона, де вона наближається до 1.

При цьому слід відмітити, що однакова інформаційна ефективність може бути досягнута як при низькій або високій частотній ефективності γ, чи при низьких або високих значеннях показника енергетичної ефективності β. Отже, автономно розглядати параметр інформаційної ефективності η не доцільно, а лише сумісно з іншими показниками ефективності.

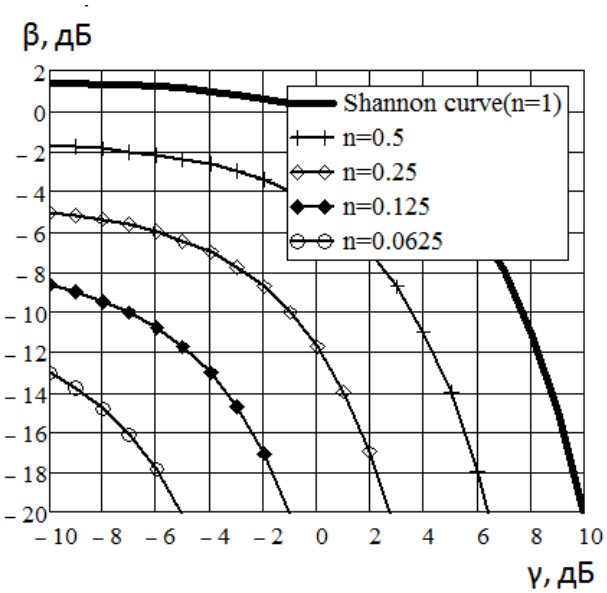


Рис. 4.9 Границя Шеннона і еквіпотенціальні криві, що відображають рівну інформаційну ефективність.

Модифікація та формування комплексної методики оцінки інформаційної ефективності стосовно систем передавання дискретних сигналів.

При передачі дискретних сигналів з позиційністю M зі швидкістю V символів в секунду при ймовірності помилки прийняття символу в каналі $P_{ош}$ максимальна швидкість передачі інформації у дискретному каналі – пропускна здатність $C_Д$ визначається виразом:

$$C_Д = V \cdot \left[log\, M + P_{ош}\, log \frac{P_{ош}}{M-1} + (1 - P_{ош})\, log(1 - P_{ош}) \right]. \qquad (4.13)$$

Слід зазначити, що, згідно з теоремою Шеннона, швидкість $C_Д$ в каналі, де передбачається використання завадостійкого кодування, одночасно є обмеженням для продуктивності джерела дискретних повідомлень $R_Д$, і, як наслідок, продуктивності системи $R_Д$. Отже, $R_Д \le C_Д < C$.

В каналі без кодування допустимо $R_Д = C_Д$.

Для цього випадку (без кодування) співвідношення для узагальненої інформаційної ефективності для дискретного каналу зв'язку [69] справедливо:

$$H_{1д} = \frac{1}{2}(\log M + P_{ошб} \log \frac{P_{ошб}}{M-1} + (1 - P_{ошб}) \log(1 - P_{ошб})) \qquad (4.14)$$

Тоді

$$\eta = \frac{\frac{1}{2}(\log M + P_{ош} \log \frac{1}{M-1} + (1 - P_{ош}) \log(1 - P_{ош}))}{\log(1 + h^2)} = \frac{\frac{1}{2} H_{1д}}{\log(1 + h^2)} \qquad (4.15)$$

або

$$\eta_Д = \frac{C_Д}{C} = \frac{R}{C} = \frac{\frac{1}{2}(log\, M + P_{ош}\, log \frac{1}{M-1} + (1 - P_{ош})\, log(1 - P_{ош}))}{log(1 + h^2)}, \qquad (4.16)$$

де $h^2 = Q = P_С / P_Ш = \alpha / V$, виходячи з допущення що $F = 2V$. Остаточно

$$\eta = \frac{R}{C} = \frac{H_{1Д}}{log\ \ (1 + Q)} \qquad (4.17)$$

Саме єдність фізичної сутності показника η виду (4.17) дає підстави

вважати допустимим використання уніфікованої шкали η [0,1] для всіх видів сигналів.

Відповідно, для дискретних сигналів коефіцієнт енергетичної ефективності визначається виразом:

$$\beta_Д = \frac{C_Д}{\alpha} = \frac{R}{\alpha} = \frac{log\, M + P_{ош}\, log \frac{1}{M-1} + (1 - P_{ош})\, log(1 - P_{ош})}{h^2} = \frac{\gamma}{Q} \quad , \qquad (4.18)$$

Коефіцієнт частотної ефективності визначається виразом:

$$\gamma_Д = \frac{R_Д}{\Delta F} = H_{1Д} \cdot \gamma = \frac{\mathrm{R}}{\mathrm{F}} = \frac{\mathrm{F_m log(1+gQ)}}{\mathrm{F_m k}} = \frac{\mathrm{log(1+gQ)}}{\mathrm{k}} \qquad (4.19)$$

Перейдемо до задачі визначення параметрів ефективності для дискретних сигналів і оцінки впливу значення ймовірності помилки на інформаційні характеристики.

Визначення параметрів ефективності для дискретних сигналів

Розглянемо кроки модифікації відомої методики оцінки ефективності СПІ для випадку дискретних сигналів на прикладі сигналів QPSK і QAM-M.

Відомо [82], що завадостійкість сигналів QPSK і QAM-M істотно розрізняється при зміні позиційності *M*, тобто кількості біт в одному відліку модульованого сигналу.

Виходячи з виду QAM-M, кожному значенню h^2 можна поставити у відповідність значення $P_{ОШ}$.

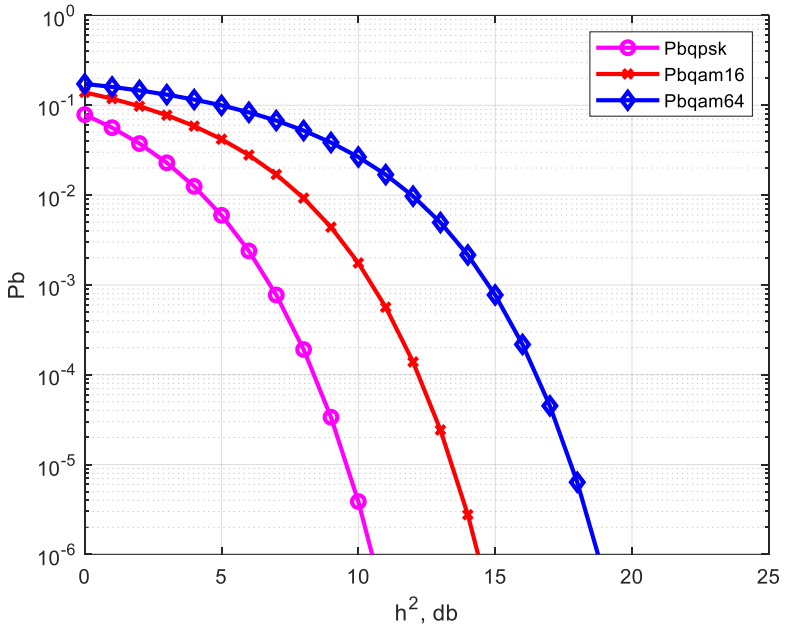


Рис. 4.10 Криві завадостійкості сигналів QPSK, QAM16 QAM64

На 4.11 відображені залежності ефективності використання ресурсів багатопозиційної модуляції і СКК для різних вимог до P_b.

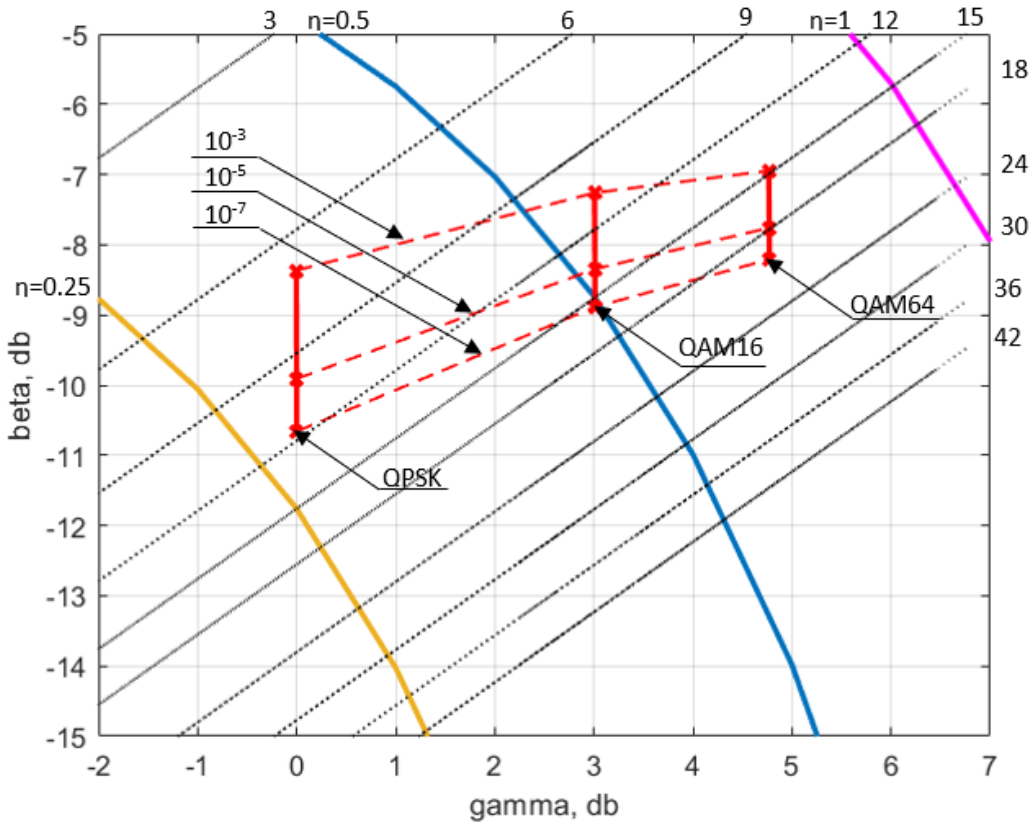


Рис. 4.11 Показники ефективності використання ресурсів каналів з багатопозиційними сигналами

Для широкосмугового сигналу для забезпечення достовірності 10^{-6} на виході декодера при B=100 необхідно забезпечити h^2 = 19.8 дБ, при B=1000 – h^2 = 22.4 дБ, а при B=10000 – h^2= 27 дБ. Це пояснюється тим, що потужність завад в смузі частот F при використанні ШСС накопичується в цій смузі в B раз більше шумів в порівнянні зі смугою ВСС.

Використання ШСС змінює підхід до динаміки взаємозалежності частотної та енергетичної ефективності: з зростанням *B* погіршується інформаційна ефективність η та а енергетична ефективність β, а частотна ефективність γ СПІ залишається незмінною.

Найбільша зміна узагальненої ефективності η має місце при переході від BPSK до ШСС при значенні бази B=100 (від значення η = 0,3 до значень η = 0,2).

Яскраво виражена тенденція витрати енергетичного ресурсу для забезпечення більш високої достовірності. В одиницях показника енергетичної ефективності діапазон -8...-12 дБ для BPSK при динаміці досяжної достовірності 10^{-3}...10^{-7}, для B=100: -16,5...-19,5 дБ, B=10000: -21,5...-23 дБ.

Разом з тим, новим є наочне відображення тенденції погіршення узагальнених показників інформаційної ефективності при покращенні достовірності сигналів BPSK та ШСС. Можна бачити, що при покращенні достовірності, інформаційний показник η суттєво зменшується на фоні значного погіршення енергетичної ефективності β прі практичній стабільності показника частотної ефективності γ.

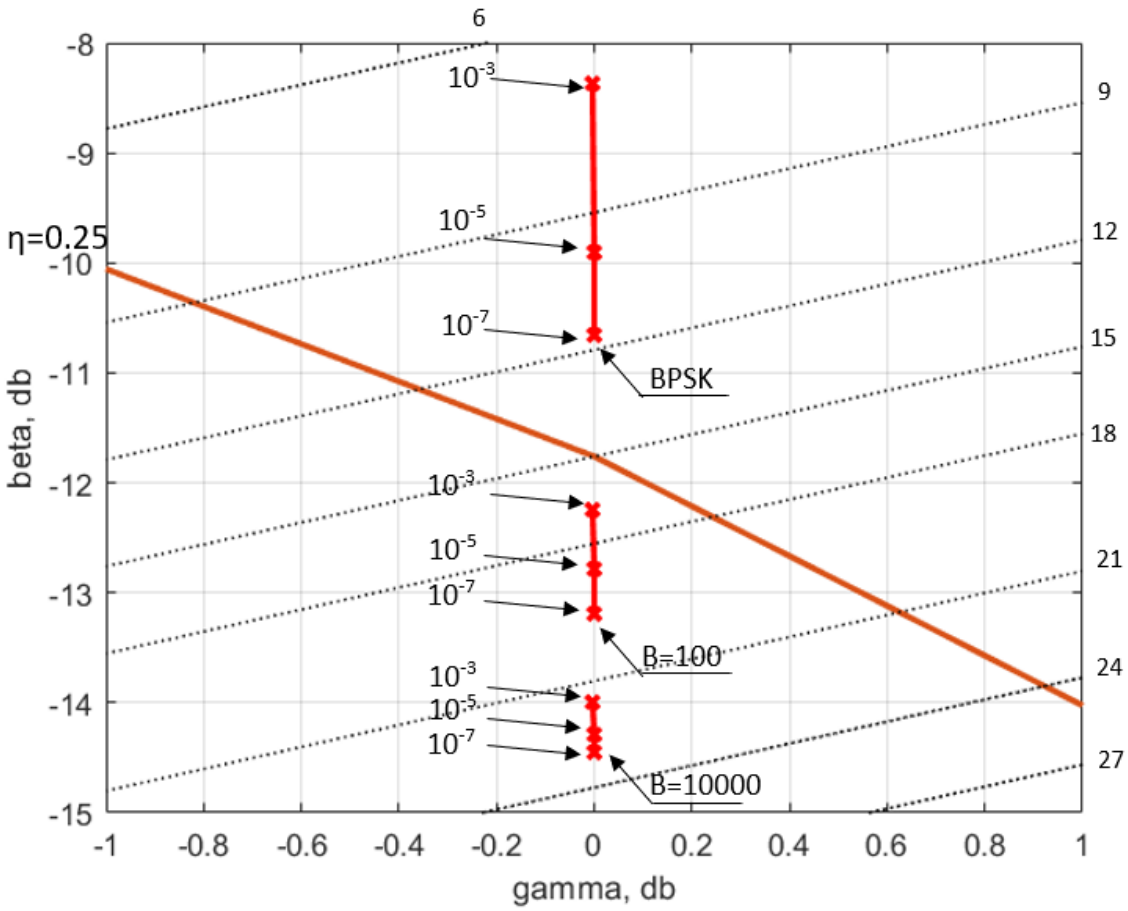


Рис. 4.12 Показники ефективності використання ресурсів каналів з ШСС та ВСС ФМ з еквівалентною потужністю.

Збільшення позиційності M сигналів QAM-M змінює підхід до динаміки взаємозалежності частотної та енергетичної ефективності: з зростанням M покращується інформаційна ефективність η, частотна ефективність γ СПІ, а також енергетична ефективність β.

Найбільша зміна узагальненої ефективності η має місце при переході від QPSK до QAM-16 (від значення η = 0,3 до значень η = 0,5...0,6).

Яскраво виражена тенденція витрати енергетичного ресурсу для забезпечення більш високої достовірності. В одиницях показника енергетичної ефективності діапазон -8...-11 дБ для QPSK при динаміці досяжної достовірності 10^{-3}...10^{-7}, для QAM-16 – це -7...-8,5 дБ.

Завдяки додатковій шкалі абсолютних енергетичних ресурсів (h^2 = Q) можна судити про те, що зазначений діапазон достовірності для QPSK

пов'язаний з енергетичним ресурсом каналу зв'язку h^2 = 7...15 дБ, а для QAM-16 – це h^2 = 15...20 дБ.

Отже, велика сукупна ефективність сигналів з великим значенням M вимагає більшої потужності сигналу в точці прийому. В умовах обмежень на потужність випромінювання безпроводових сенсорних систем подібна обставина, зокрема обумовлює істотне скорочення розмірів сот в системах нових поколінь (замість радіусів в тисячу метрів в системах 2G, 3G до сотень метрів системах 4G і до десятків метрів в системах 5G).

Разом з тим, новим є наочне відображення тенденції погіршення узагальнених показників інформаційної ефективності при покращенні достовірності сигналів QPSK, QAM-16 та QAM-64. Можна бачити, що при покращенні достовірності, інформаційний показник η суттєво зменшується на фоні значного погіршення енергетичної ефективності β прі практичній стабільності показника частотної ефективності γ.

Перевагою наведеної методики є те, що вона дозволяє порівняти між собою не тільки системи з різними видами маніпуляції, але системи зв'язку, які для підтримки високої завадостійкості використовують різні види кодування.

Введення ступені кодування впливає на (4.6 і (4.7) наступним чином [99]:

$$\beta = \frac{\frac{k}{n}\left(log\, M + P_b\, log\frac{P_b}{M-1} + (1-P_b)\, log(1-P_b)\right)}{h^2}, \tag{4.20}$$

$$\eta = \frac{\frac{k}{n}(log\, M + P_b\, log\frac{P_b}{M-1} + (1-P_b)\, log(1-P_b))}{log(1+h^2)}, \tag{4.21}$$

де k – кількість інформаційних символів в кодовому блоці довжиною n (відношення $r_k = k / n$ називається швидкістю кодування);

M – позиційність символу.

P_b – ймовірність помилки біта на виході декодера.

Результати розрахунку ефективності з урахуванням маніпуляції та

завадостійкого кодування дозволяють при необхідній достовірності вибрати спосіб і оцінити ціну досягнення цієї достовірності.

Так, на прикладі сигналів з модуляцією QPSK (Рис. 4.13) показано, як варіюються ефективності для досягнення необхідної бітової достовірності помилки 10^{-7}. При вихідній бітовій ймовірності 10^{-3} в каналі (точка 1), можна використовувати завадостійкий блоковий код (127,99,4) для досягнення $P_b = 10^{-7}$ (точка 4), а при вихідній бітовій ймовірності 10^{-5} в каналі (точка 2), можна використовувати завадостійкий блоковий код (127,113,2) для досягнення $P_b = 10^{-7}$ (точка 5).

Як можна помітити з рис. 4.13, застосування ступені завадостійкого кодування завжди призводить до зниження частотної ефективності, і чим більше швидкість коду, тим меншу частотну ефективність воно забезпечує. Водночас, слід зауважити, що при застосуванні завадостійкого кодування енергетична ефективність покращується.

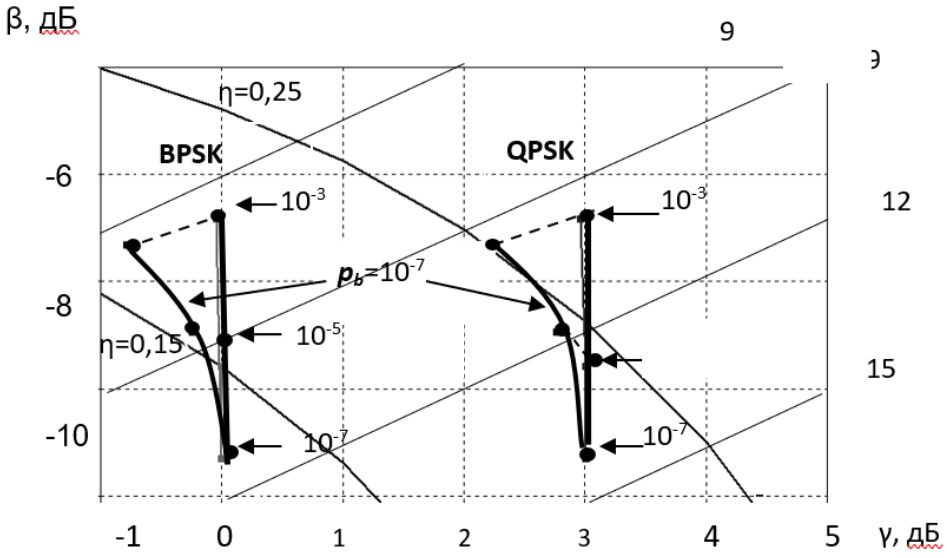


Рис. 4.13 Показники ефективності використання ресурсів при $P_b = 10^{-7}$.

Отже, застосування нової модифікованої шкали ефективності дозволяє провести комплексну оцінку системи за показниками частотної, енергетичної та узагальненої (інформаційної) ефективності, а також за показником задіяного енергетичного ресурсу h^2.

При цьому модифікована шкала ефективності дозволяє комплексно

оцінити частотну та енергетичну ефективність використання багатопозиційної маніпуляції та завадостійкого кодування. Такий спосіб оцінки розширює спектр пошуку оптимальних за відносним критеріям енергетичної і частотної ефективності систем передачі, а також абсолютним енергетичним показником h^2, оскільки забезпечує великі можливості варіювання параметрами для досягнення максимальної продуктивності при мінімальних витратах ресурсів каналу зв'язку.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

Властивість широкосмуговості сигналів не забезпечує кращої достовірності в порівнянні з вузькосмуговими сигналами при однаковій потужності випромінювання та способі обробки. При розширенні спектру сигналу накопичується в В раз більше шумів в порівнянні з вузькосмуговими сигналами. Системи з розширенням спектру не дають виграшу в завадостійкості, а являються інструментом забезпечення функціонування системи зв’язку в особливих умовах. Використання широкосмугових сигналів доцільне тільки для протидії вузькосмуговим завадам, які займають тільки частину смуги частот і для забезпечення скритності електромагнітних сигналів у спеціальних сферах використання.

Запропонована методика оцінки ефективності передавання дискретних сигналів дозволяє наочно відображати різні шкали, які визначають динаміку зміни відношення потужності сигнал шум на вході демодулятора в залежності від енергетичної ефективності β, частотної ефективності γ та узагальненої інформаційної ефективності η, тобто оцінювати ефективність використання ресурсів каналів зв'язку при всьому різноманітті засобів підвищення інформаційних можливостей цих каналів, включаючи використання сигнально-кодових конструкцій на основі сигналів багатопозиційної маніпуляції, що особливо актуально в каналах зі слабкою енергетикою, зокрема, в системах безпроводового зв'язку.

Ефективність використання ресурсів каналу описує показник інформаційної ефективності, який являє собою відношення продуктивності до пропускної здатності каналу зв'язку. Для досягнення високого показника інформаційної ефективності необхідно оперувати оптимальним вибором сигнально-кодових конструкцій.

Методика дозволяє оцінити ефективність використання ресурсів каналів зв’язку з багатопозиційною маніпуляцією та завадостійким кодуванням, а також кількісно оцінити витрати на реалізацію заходів щодо підвищення достовірності або продуктивності у вимірі запропонованих показників. Такий спосіб оцінки розширює сферу пошуку оптимальних систем передачі, оскільки враховує можливості варіювання параметрами сигналів в каналах зв’язку в широкому діапазоні значень.

Ефективність використання ресурсів каналу описує показник інформаційної ефективності, який являє собою відношення продуктивності до пропускної здатності каналу зв'язку. Для досягнення високого показника інформаційної ефективності необхідно оперувати оптимальним вибором сигнально-кодових конструкцій.

Широкосмугові сигнали, не забезпечують кращої достовірності та програють в інформаційній ефективності η та а енергетичній ефективністі β, при незмінній частотній ефективності γ. Якщо ШСС має обмеження в ресурсі (обмежена енергія сигналу), то вони ведуть до втрати завадостійкості або розтрати ресурсу, коли є намагання відновити вихідну достовірність. Засобом, що дозволяє підвищити достовірність прийому є завадостійке кодування, однак декодер не може розрізняти спосіб обробки сигналу до його входу, тому при рівній енергетиці і однаковій швидкості символів джерела, ВСС мають перевагу і на цьому етапі обробки сигналів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Стрімкий розвиток сенсорних телекомунікаційних систем (СТС), різновидом яких є технології IoT, та необхідність забезпечення стійкого зв’язку в умовах низької енергетики ліній зв’язку, завад та багатопроменевого розповсюдження. Дослідження, проектування і побудова безпроводових сенсорних мереж (БСМ) є актуальним напрямом розвитку у галузі телекомунікацій для України на сьогоднішній день.

Сенсорні мережі займають ключову роль у разі необхідності оперативного розгортання, мобільності, гнучкості організації мережі і широті можливих додатків, у багатьох випадках будучи єдиним економічно виправданим рішенням. Однією із ключових задач забезпечення функціонування сенсорної мережі є забезпечення надійного та продуктивного передавання інформації в умовах обмежених ресурсів, зокрема, енергетичних.

Для оцінки ефективності використання ресурсу каналу зв’язку використовується поняття інформаційної ефективності як відношення продуктивності джерела повідомлень, яка характеризує швидкість передачі інформації, яку отримує кінцевий користувач до пропускної здатності каналу зв’язку, яка використовується як для передачі інформації користувача, так і для передачі технічної інформації. Пропускна здатність каналу зв’язку оцінюється границею Шеннона і є максимально можливою швидкістю передачі інформації по каналу зв’язку

Інструментом досягнення максимальної інформаційної ефективності, як міри наближення швидкості передачі повідомлень джерела до границі Шеннона є вибір оптимальних сигнально-кодових конструкцій, які дозволяють передавати повідомлення з максимально можливою швидкістю і заданою якістю.

Метою роботи є синтез сигналів, що максимально наближають продуктивність каналу зв’язку до пропускної здатності при обмежених ресурсах каналу.

Головними результатами проведеного дослідження є наступні:

1. Досліджено властивостей ШСС в порівнянні з ВСС, проведено порівняння достовірності прийому при одинаковій потужності випромінювання та способі обробки сигналу.
2. Визначені теоретичні та практичні границі застосування відомих формул визначення завадостійкості, що практично важливо при оцінці якості існуючої і створюваної техніки і стандартів зв'язку.
3. Розроблені методики і алгоритми синтезу сигналів, оптимальних за критерієм максимально досяжної продуктивності лінії зв'язку для низької енергетики та заданої достовірності, що практично важливо при створенні та проектуванні нових безпроводових сенсорних мереж.

Одним з інструментів, що пропонується в літературі для передачі сигналів в умовах низької енергетики – широкосмугові сигнали. Однак при розширенні спектру сигналу накопичується в В раз більше шумів в порівнянні з вузькосмуговими сигналами. Якщо ШСС має обмеження в ресурсі (обмежена енергія сигналу), то вони ведуть до втрати завадостійкості або розтрати ресурсу, коли є намагання відновити вихідну достовірність.

Використання широкосмугових сигналів не забезпечує кращої достовірності в порівнянні з вузькосмуговими сигналами при однаковій потужності випромінювання та способі обробки. Використання широкосмугових сигналів доцільне тільки для протидії вузько-смуговим завадам, які займають тільки частину смуги частот і для забезпечення скритності електромагнітних сигналів у спеціальних сферах використання.

Класичні формули для визначення інформаційних властивостей сигналів можуть використовуватись тільки для високої енергетики. Тому для отримання точних результатів розрахунку запропоновано використання векторно-фазового методу. Особливістю і перевагою формул, отриманих з використанням векторно-фазового методу, є їх точність і повний збіг з результатами імітаційного моделювання з використанням запропонованого методу.

Векторно-фазовий метод отримати точні розрахунки при будь-якій енергетиці, на відміну від формул Прокіса, що можуть використовуватись тільки

для високої енергетики.

Запропонована методика оцінки ефективності передавання дискретних сигналів дозволяє наочно відображати різні шкали, які визначають динаміку зміни відношення потужності сигнал шум на вході демодулятора в залежності від енергетичної ефективності β, частотної ефективності γ та узагальненої інформаційної ефективності η, тобто оцінювати ефективність використання ресурсів каналів зв'язку при всьому різноманітті засобів підвищення інформаційних можливостей цих каналів, включаючи використання сигнально-кодових конструкцій на основі сигналів багатопозиційної маніпуляції, що особливо актуально в каналах зі слабкою енергетикою, зокрема, в системах безпроводового зв'язку.

Методика дозволяє оцінити ефективність використання ресурсів каналів зв’язку з багатопозиційною маніпуляцією та завадостійким кодуванням, а також кількісно оцінити витрати на реалізацію заходів щодо підвищення достовірності або продуктивності у вимірі запропонованих показників. Такий спосіб оцінки розширює сферу пошуку оптимальних систем передачі, оскільки враховує можливості варіювання параметрами сигналів в каналах зв’язку в широкому діапазоні значень.

Широкосмугові сигнали, не забезпечують кращої достовірності та програють в інформаційній ефективності η та а енергетичній ефективністі β, при незмінній частотній ефективності γ. Якщо ШСС має обмеження в ресурсі (обмежена енергія сигналу), то вони ведуть до втрати завадостійкості або розтрати ресурсу, коли є намагання відновити вихідну достовірність. Засобом, що дозволяє підвищити достовірність прийому є завадостійке кодування, однак декодер не може розрізняти спосіб обробки сигналу до його входу, тому при рівній енергетиці і однаковій швидкості символів джерела, ВСС мають перевагу і на цьому етапі обробки сигналів.

За результатом дисертаційного дослідження отримані нові наукові результати:

1. Вдосконалено векторно-фазовий метод для визначення

завадостійкості багатопозиційних сигналів, при цьому відмінність полягає в тому, що реалізовано можливості використання методу в умовах низької енергетики каналу (при значеннях відношення сигнал/шум до 10 дБ). Завдяки цьому підвищено точність оцінці показників завадостійкості сигналів при значеннях відношення сигнал шум до 10 дБ, доведена суттєва похибка при використанні традиційного аналітичного оцінювання достовірності передавання інформації в умовах низької енергетики, що суттєво позначилося на точність розрахунків показників продуктивності каналу зв'язку в цих умовах. Усунена похибка визначення ймовірності помилки pb складає до 90% при зміні відношення сигнал/шум в діапазоні 2-5 дБ та до 25% в діапазоні 5-10 дБ у порівнянні із використанням традиційних аналітичних формул.

2. Вдосконалено методику визначення умов підвищення показників продуктивності на основі зміни швидкості передавання інформації від джерела, при цьому відмінність полягає в тому, що за рахунок синтезу параметрів багатопозиційних сигнально-кодових конструкцій визначено умови досягнення екстремумів продуктивності каналу зв'язку. Завдяки вдосконаленій методиці продуктивність каналу зв'язку наближено до його пропускної здатності – границі Шеннона та доведено можливість підвищення продуктивності каналу зв'язку на 30% в порівнянні з каналом зв'язку із незмінною швидкістю передавання інформації при еквівалентному відношенню сигнал/шум.

3. Вдосконалено методику оцінки ефективності використання ресурсів каналу зв'язку, при цьому відмінність полягає в тому, що оцінка ефективності передавання дискретних сигналів дозволяє наочно відображає динаміку зміни відношення потужності сигнал шум на вході демодулятора одночасно для показників енергетичної, частотної та інформаційної ефективності. Завдяки вдосконаленій методиці досягнуто можливість порівняння динаміки зміни показників ефективності при використанні різних багатопозиційних сигнально-кодових конструкцій та обрання доцільного сполучення виду модуляції та способу кодування в залежності від обмежень в каналі зв'язку.

Проведені дослідження пов'язані з роботами та науковими програмами

Інституту телекомунікаційних систем КПІ ім. Ігоря Сікорського (номери державної реєстрації держбюджетних НДР: № 0115U000259 – 2014-2016 р.р.; № 0116U004885 – 2017-2019 р.р.; № 0120U102181 – 2020-2022 р.р.).

Результати роботи опробуванні на основі публікацій:

- 4 статті у наукових фахових виданнях України;
- 5 тез доповідей у періодичних наукових виданнях проіндексованих у базах WoS та/або Scopus;
- 1 розділ колективної монографії у періодичних наукових виданнях проіндексованих у базах WoS та/або Scopus;
- 3 статті у періодичних наукових виданнях;
- 6 тез виступів на наукових конференціях.

Отже, всі наукові задачі, які сформовані в рамках дисертації, вирішені. Мета дисертації досягнута.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ahad, A., Tahir, M., & Yau, K. L. A., (2019). 5G-based smart healthcare network: Architecture, taxonomy, challenges and future research directions. IEEE Access, 7, 100747–100762.
2. Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., Cayirci, E. Wireless sensor networks: a survey //Computer networks. – 2002. – Т. 38. – №. 4. – С. 393-422.
3. Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M., (2015). Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 17(4), 2347–2376.
4. Alrawahi, A. S., Lee, K., & Lotfi, A., (2019). A multi objective QoS model for trading cloud of things resources. IEEE Internet of Things Journal, 6(6), 9447–9463.
5. Balen J., Zagar D., Martinovic G. Quality of service in wireless sensor networks: a survey and related patents. Recent Pat. Comput. Sci. 2011. Vol. 4, No. 3. P. 188–202.
6. Baronti, P., Pillai, P., Chook, V. W., Chessa, S., Gotta, A., Hu, Y. F. Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15. 4 and.
7. Biswas, A. R., & Giaffreda, R., (2014). IoT and cloud convergence: Opportunities and challenges. In: 2014 IEEE World Forum on the Internet of Things (WF-IoT) (pp. 375–376).
8. Burhan, M., Rehman, R. A., Khan, B., & Kim, B. S., (2018). IoT elements, layered architectures and security issues: A comprehensive survey. Sensors, 18(9), 2796.
9. Culler D., Estrin D., Srivastava M. Guest editors' introduction: Overview of sensor networks //Computer. – 2004. – Т. 37. – №. 8. – С. 41-

49.

10. Dargie W., Poellabauer C. Fundamentals of wireless sensor networks: theory and practice. – John Wiley & Sons, 2010.

11. Du, H., Zhang, C., Ye, Q., Xu, W., Kibenge, P. L., & Yao, K., (2018). A hybrid outdoor localization scheme with high-position accuracy and low-power consumption. Eurasip J. Wirel. Commun. Netw., 2018(1).

12. Error probability for optimum combining of M-ary PSK signals in the presence of interference and noise/ IEEE Trans. Commun., vol. 51, Nov. 2003. – pp. 1949–1957.

13. Farooq, M. U., Waseem, M., Mazhar, S., Khairi, A., & Kamal, T., (2015). A review on internet of things (IoT). International Journal of Computer Applications, 113(1), 1–7.

14. Felemban E., Lee C. G., Ekici E. MMSPEED: multipath Multi-SPEED protocol for QoS guarantee of reliability and. Timeliness in wireless sensor networks //IEEE transactions on mobile computing. – 2006. – Т. 5. – №. 6. – С. 738-754.

15. Firoiu V., Le Boudec J. Y., Towsley D., et al. Theories and Models for Internet Quality of Service. Proc. IEEE. 2002. Vol. 90.

16. Gallager R.G. Information Theory and Reliable Communication/ Massachusetts Institute of Technology. – John Wiley and sons, Inc., New York, London, Sydney, Toronto, 1968. – 720 pp.

17. Geier J. Designing and Deploying 802.11n Wireless Networks, Cisco Press, 2010. – 528 p.

18. Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M., (2013). Internet of things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. Future Generation Computer Systems, 29(7), 1645–1660.

19. IEEE 802.11 Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE Std., 2012.

20. IEEE 802.15.4. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), 2003.

21. IEEE Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), 2006.

22. IEEE802.11ac: The Next Evolution of Wi-Fi Standards, A Qualcomm publication, May 2012 https://www.qualcomm.com/documents/qualcomm-research-ieee80211ac-next-evolution-wi-fi, Accessed August 22, 2015.

23. Ilchenko, M.: Aspects of system analysis in the applied information theory for telecommunications. In: Ilchenko, M., Urywsky, L. (eds.) Cybernetics and Systems Analysis, vol. 46, no. 5, pp. 737–743 (2010). https://doi.org/10.1007/s10559-010-9255-5.

24. Ilchenko, M.E., Moshinskaya, A.V., Urywsky, L.A.: Levels separation and merging in the OSI reference model for information-telecommunication systems. Cybern. Syst. Anal. 47(4), 598–605 (2011). https://doi.org/10.1007/s10559-011-9340-4.

25. Iqbal M.A., Hussain S., Xing H., Imran M.A. Enabling the Internet of Things: Fundamentals, Design and Applications, Wiley, 2021. — 276 p.

26. ITU-T Recommendation G.826. End-to-end error performance parameters andobjectives for international, constant bit-ratedigital paths and connections, – 2002. – pp. 6-9.

27. J. Zhang, K. Tan, J. Zhao, H. Wu, and Y. Zhang, “A Practical SNRGuided Rate Adaptation,” in INFOCOM 2008. The 27th Conference on Computer Communications. IEEE, pp. 2083–2091, IEEE, 2008.

28. J.G.Prokis, Digital Communication, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1995.

29. Javidroozi, V., Shah, H., & Feldman, G., (2019). Urban computing and smart cities: Towards changing city processes by applying enterprise systems integration practices. IEEE Access, 7, 108023–108034.

30. Kandris, D., Nakas, C., Vomvas, D., Koulouras, G., Applications of wireless sensor networks: an up-to-date survey //Applied System Innovation. – 2020. – Т. 3. –№. 1. – С. 14.

31. Kelly, Vivian New IEEE 802.11ac™ Specification Driven by Evolving Market Need for Higher, Multi-User Throughput in Wireless LANs, http://standards.ieee.org/news/2014/ieee_802_11ac_ballot.html.

32. Krzysztof Wesolowski - Mobile Communication Systems John Wiley & Sons, 2009. - 579 p.

33. Kumar V., Tiwari S. Routing in IPv6 over low-power wireless personal area networks (6LoWPAN): A survey //Journal of Computer Networks and Communications. – 2012. – Т. 2012.

34. L. Uryvsky, S. Osypchuk, B. Shmigel. The 802.11 Protocols Usage for Wireless Systems Construction with Flexible Architecture. TCSET'2016, February 23–26, 2016, Lviv-Slavske, Ukraine. pp. 918-921.

35. Lee, I., & Lee, K., (2015). The internet of things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises. Business Horizons, 58(4), 431–440.

36. Levis P., Madden S., Polastre J. and dr. «TinyOS: An operating system for wireless sensor networks» // W. Weber, J.M. Rabaey, E. Aarts (Eds.) // In Ambient Intelligence. — New York, NY: Springer-Verlag, 2005. — 374 p.

37. Lewis F. L., Wireless sensor networks //Smart environments: technologies, protocols, and applications. – 2004. – Т. 11. – С. 46.

38. Lin, Y. W., Lin, Y. B., & Yen, T. H., (2020). Simtalk: Simulation of IoT applications. Sensors, 20(9), 2563.

39. Luchanin M., Chepkov I., Shmigel B. Analysis of spatial and energy limitations on the influence of multipath factors in the VHF radio channel model / Conference: 2019 International Conference on Information and Telecommunication Technologies a.

40. Luchanin M., Chepkov I., Shmigel B. Analysis of spatial and energy limitations on the influence of multipath factors in the VHF radio channel model / Conference: 2019 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio.

41. Mangla M., Kumar A., Mehta V., Bhushan M., Mohanty S.N. (eds.) Real-Life Applications of the Internet of Things, CRC Press/Apple Academic Press, 2022. — 516 p.

42. Matthew Gast “802.11ac: A Survival Guide”, O’Reilly Media 2012. - 144 p.

43. Miceli, A. Wireless technician’s handbook [Text] / Miceli A. – Boston:Artech House, Inc, 2003. – 292 p..

44. Mirocha, U., (2015). The Internet of Things at the Crossroads: Smart Home and Smart City Implementation Models. Working Paper Delab Uw, No. XX (2/2015 Smart Economy & Innovation, Warshaw.

45. Motlagh, N. H., Bagaa, M., & Taleb, T., (2019). Energy and delay aware task assignment mechanism for UAV-based IoT platform. IEEE Internet of Things Journal, 6(4), 6523–6536.

46. Osypchuk S., Moshynska A., Pieshkin A., Shmihel B. The effect of the features of signal-code constructions forming on indicators of functionality and reliability of communication systems based on the 802.11 n/ac standards / SCIENCES OF EUROPE VOL 2, Pr.

47. Osypchuk S., Shmigel B., Moshynska A., Solyanikova V. Emergency ground communications system using 802.11xx technology / Conference: 2019 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo).

48. Q. Xia and M. Hamdi, “Smart Sender: a Practical Rate Adaptation Algorithm for Multirate IEEE 802.11 WLANs,” Wireless Communications, IEEE Transactions on, vol. 7, no. 5, pp. 1764–1775, 2008.

49. Ramassamy C., Fouchal H., Hunel P. Impact of application layers over wireless sensor networks. Bonn, 2012.

50. Sangwan, A., & Bhattacharya, P. P., (2018). Reliable energy efficient multi-hop routing protocol for heterogeneous body area networks. International Journal of Sensors Wireless Communications and Control, 8(1), 47–56.

51. Sharma, S., Nanda, M., Goel, R., Jain, A., Bhushan, M., & Kumar, A., (2019). Smart cities using internet of things: Recent trends and techniques. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), 8(9S), 24–28.

52. Uryvsky L., Moshynska A., Osypchuk S., Shmihel B. Comparison of methods for determining noise immunity indicators of a multiservice transmission system, Springer, 2019. – p. 38-47.

53. Uryvsky L., Moshynska A., Shmihel B., Solianikova V. The ability to overcome the multipath factor in the radio channels of the microwave range based on OFDM technology / The scientific heritage VOL 1, Budapest, Hungary, 2019, № 37 – p. 51-55.

54. Uryvsky L., Shmihel B., Boundary parameters for a qualitative assessment of digital communication channels with specified reliability characteristics/ 2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T).

55. Uryvsky L., Shmihel B., Complex methodology for efficiency evaluation of discrete information transmission systems/ SCIENCES OF EUROPE VOL 2, Praha, 2020, № 53 – p. 55-61.

56. Uryvsky L., Shmihel B., Complex methodology for efficiency

evaluation of discrete information transmission systems/ SCIENCES OF EUROPE VOL 2, Praha, 2020, № 53 – p. 55-61.

57. Uryvsky L.O., Moshynska A.V., Shmihel B.O. Analysis of properties of the wideband signals in the low energy conditions / SCIENCES OF EUROPE VOL 1, Praha, 2019, № 37 – p. 60-63.

58. Uryvsky, L., Moshynska, A., Solianikova, V., Shmigel, B. Application of the Classical Noise Immunity Theory for Prediction of the Parameters of Perspective Multiservice Telecommunications in Accordance with Modern Digital Standards.

59. Wang Y., Liu X., Yin J. Requirements of quality of service in wireless sensor network. International Conference on Systems and International Conference on Mobile Communications and Learning Technologies : proc. int. conf. on netw. Washington, 2006. P. 116.

60. X. Chen, P. Gangwal, and D. Qiao, “RAM: Rate Adaptation in Mobile Environments,” Mobile Computing, IEEE Transactions on, vol. 11, no. 3, pp. 464–477, 2012.

61. Xia F. QoS challenges and opportunities in wireless sensor/actuator networks. Sensors. 2008. Vol. 8, issue 2. P. 1099 –1110.

62. Youseff, L., Butrico, M., & Da Silva, D., (2008). Toward a unified ontology of cloud computing. In: 2008 Grid Computing Environments Workshop (pp. 1–10).

63. Zafari, F., Gkelias, A., & Leung, K. K., (2019). A survey of indoor localization systems and technologies. IEEE Commun. Surv. Tutorials, 21(3), 2568–2599.

64. Zhao, X., Xiao, Z., Markham, A., Trigoni, N., & Ren, Y., (2014). Does BTLE measure up against WiFi? A comparison of indoor location performance. In: European Wireless 2014; 20th European Wireless Conference (pp. 1–6).

65. Zuo, Z., Liu, L., Zhang, L., & Fang, Y., (2018). Indoor positioning

based on Bluetooth low-energy beacons adopting graph optimization. Sensors (Switzerland), 18(11), 1–20.

66. Банкет В.Л. Сигнально-кодовые конструкции в телекоммуникационных системах / Банкет В.Л. – Одесса, 2009. – 180 с.

67. Банкет, В.Л. Эффективность систем передачи дискретных сообщений.[Текст] / Банкет В.Л. – Одесса: ОЭИС, 1982. – 74с.

68. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.

69. Галлагер Р. Теория информации и надежная связь [Текст] / Галлагер Р. – М.: Сов.радио, 1974. – 720 с.

70. Гантмахер, В.Е. Шумоподобные сигналы. Анализ, синтез, обработка / В.Е. Гантмахер, Н.Е. Быстров, Д.В. Чеботарев. – СПб.: Наука и Техника, 2005. – 400 с.

71. Зюко А. Г. Помехоустойчивость и эффективность систем связи [Текст] / А. Г. Зюко // 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Связь, 1972. – 360 с.

72. Зюко А. Г., Кловский Д. Д., Коржик В. И., Назаров М. В. Теория электрической связи: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1999. – 432 с.

73. Зяблов, В.В. Высокоскоростная передача сообщений в реальных каналах связи [Текст] / Зяблов В.В., Коробков Д.Л., Портной С.Л. // – М.: Радио и связь, 1991. – 288с.

74. Кантор Л.Я."Спутниковая связь и вещание" - М: Радио и связь, 1988.

75. Коржик В. И. Расчет помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений: справочник / В. И. Коржик, Л. М. Финк, К. Н. Щелкунов. – М. : Радио и связь, 1981. – 231 с.

76. Кучерявый А.Е., Прокопьев А.В., Кучерявый Е.А. Самоорганизующиеся сети. – СПб. : Любавич, 2011.

77. Кучерявый Е.А., Молчан С.А., Кондратьев В.В. Принципы построения сенсоров и сенсорных сетей // Электросвязь. – 2006. – № 6. – С. 10–15.

78. Мазурков М.И. Системы широкополосной радиосвязи. — Одесса: Наука и техника, 2009. — 344 с.

79. Міночкін А.І, Романюк В.А., Жук О.В. Перспективи розвитку тактичних сенсорних мереж // Збірник наукових праць № 4. – К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”. – 2007. – С. 112 – 119..

80. Мошинська А.В., Ольховик Д.М. Методика оцінки якості цифрових каналів вмультисервісних системах зв’язку. «Перспективи телекомунікації 2019»:, К.: с. 49…51.

81. Мулярчик К. С., Полочанский А. С. Качество обслуживания в беспроводных сенсорных сетях // Журн. Белорус. гос. ун-та. Математика. Информатика. 2017. No 2. С. 65–70.

82. Основи теорії телекомунікацій / Підручник / Під заг. ред. Ільченка М.Ю. — К.: ІССЗІ, КПІ, 2010. — 786 с.

83. Пестряков В.Б., Афанасьев В.П., Гурвиц В.И. и др. Шумоподобные сигналы в системах передачи информации. - М.: «Сов. радио», 1973. – 424 с.

84. Сайко В.Г., Казіміренко В.Я., Літвінов Ю.М. Мережі безпроводового широкосмугового доступу. Навчальний посібник. – К.: ДУТ, 2015. – 196 с.

85. Семенов А.М., Сикарев А.А. Широкополосная радиосвязь. – М.: Воениздат, 1970. — 280 с.

86. Уривський Л.О, Шмігель Б.О. Аналіз продуктивності систем мобільного зв’язку з нано- і пікосотами. / Науково-виробничий

збірник «Наукові записки УНДІЗ». – К.: УНДІЗ, 2014, № 4(32), с. 5-10.

87. Уривський Л.О, Шмігель Б.О. Оцінка ефективності використання ресурсів безпроводових каналів зв’язку. Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 33 (72) № 5 2022. – С. 27-32.

88. Уривський Л.О, Шмігель Б.О. Порівняння систем мобільного зв’язку з нано- і пікосотами за показниками продуктивності/ Третя міжнародна конференція молодих вчених «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє»/ / Збірка тез, ч.3. — Одеса: ОНАЗ, 2014 – с. 101-10.

89. Уривський Л.О., Осипчук С.О., Шмігель Б.О. Особливості способів оцінки продуктивності мережі на основі 802.11ac, Науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій»: Матеріали конференції. К.: КПІ, 2016.

90. Уривський Л.О., Шмігель Б.О. Визначення завадостійкості СКК в умовах низької енергетики. Науково-технічна конференція «Перспективи телекомунікацій»: Матеріали конференції. К.: КПІ, 2021.

91. Уривський Л.О., Шмігель Б.О. Дослідження властивостей широкосмугових сигналів зв’язку в умовах низької енергетики. Науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій»: Матеріали конференції. К.: КПІ, 2019.

92. Уривський Л.О., Шмігель Б.О. Порівняння завадостійкості широкосмугових та вузькосмугових сигналів зв’язку в умовах низької енергетики. Науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій»: Матеріали конференції. К.: КПІ, 2020.

93. Урывский Л. А. Анализ максимумов производительности в дискретных каналах связи [Текст] / Урывский Л. А., Прокопенко Е.

А., Вергун С. Н. // Інфокомунікації – сучасність та майбутнє: матеріали четвертої міжнар. наук.-пр. конф. м. Одеса 30-31 жовт. 2014.

94. Урывский Л. А., Вергун С. Н. Аппроксимация экстремумов производительности в дискретных каналах с кодированием // IX Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2015: Збірник матеріалів конференції. К.: НТУУ «КПІ», 2015.

95. Урывский Л. А., Вергун С. Н. Производительность помехозащищенных систем и ее достижимые границы // Інфокомунікації – сучасність та майбутнє: матеріали п’ятої міжнар. наук.-пр. конф.

96. Урывский Л. А., Прокопенко Е. А., Вергун С. Н. Исследование экстремумов производительности в дискретных каналах связи с кодированием // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв’язку. – 2014. №.5(33) – с. 20-26.

97. Урывский Л. А., Прокопенко Е. А., Наталенко А. И. Векторно-фазовый метод для определения показателей помехоустойчивости многопозиционных сигналов. – Зв’язок, № 12, 2012. – 7 с.

98. Урывский Л.А. Выбор блочного помехоустойчивого кода по критерию максимального приближения к границе Шеннона / Урывский Л.А., Прокопенко Е.А., Пешкин А.М. // Telecommunication science. – № 2, с.41-47.

99. Урывский Л.А., Прокопенко Е.А. Оценка эффективности использования передачи с многопозиционными сигналами на основе модифицированной методики Зюко А.Г. / Науково технічна конференція «Проблеми телекомунікацій»: Збірник тез. – К.: НТУУ «КПІ» 2011. – с. 127.

100. Урывский, Л.А. Модифікована методика оцінки ефективності

систем передачі інформації [Текст] / Урывский Л.А., Мошинська А.В., Прокопенко Е.А.// Наукові вісті НТУУ «КПІ». – К., НТУУ «КПІ». 2010, № 6, с. 24…29.

101. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. – 2-е изд., перераб., и доп. – М.: Сов. радио, 1970. – 728 с.

102. Шахнович, И.В. Современные технологии беспроводной связи[Текст] / Шахнович И.В. // - М.:Техносфера, 2006. - 288 с.

103. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике / К. Шеннон ; под ред. Ф. А. Добрушина, О. Б. Лупанова ; пер. с англ. – Москва : изд-во иностр. лит., 1963. – 830 с.

104. Шмігель Б. О. Високоефективна безпроводова мережа на основі гнучкої архітектури IEEE 802.1. Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2021. № 4 (73), с. 79-86.

105. Шмігель Б. О. Модель оцінки якості зв’язку в безпроводовому каналі, створеному на основі стандарту 802.11ac, та її верифікація натурними випробуваннями» / Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт з галузі «Радіотехніка», Харків: ХНУРЕ, 2016.

106. Шмігель Б.О., Боднарчук А.П. Оцінювання цифрових каналів зв’язку із заданими характеристиками вірогідності. «Зв’язок». 2022. № 1 (155), с. 59-62.