ВСТУП

У сучасних телекомунікаційних системах вимоги до якості та надійності передачі інформації постійно зростають. Це явище можна пояснити прискореним розвитком цифрових технологій, істотним збільшенням обсягу переданих даних та розширенням сфери застосування комунікаційних систем. У таких умовах забезпечення стабільної роботи каналу зв'язку стає особливо важливим, особливо за наявності різних системних перешкод, що впливають на параметри сигналу та якість передачі інформації.

Передача інформації в реальних умовах відбувається за наявності фонового шуму, перешкод, багатопроменевого поширення та інших дестабілізаційних факторів. Наслідки системних перешкод можуть призвести до спотворення сигналу, підвищення ймовірності помилок, зменшення пропускної здатності каналу та погіршення стабільності зв'язку. Бездротові канали зв'язку, що працюють у відкритому середовищі та піддаються впливу неконтрольованих зовнішніх факторів, є найбільш чутливими до таких впливів.

Водночас оптоволоконні канали зв'язку є ключовим елементом сучасних телекомунікаційних систем, що відрізняються значною пропускною здатністю, мінімальними втратами та високою стійкістю до шуму. Використання оптоволоконних засобів передачі гарантує надійну передачу інформації на великі відстані, одночасно зменшуючи шкідливий вплив зовнішніх електромагнітних перешкод. Порівняння бездротових та оптоволоконних каналів зв'язку дозволяє більш глибоко дослідити вплив перешкод та визначити ефективні методи оптимізації процесу передачі інформації.

Важливою складовою аналізу каналів зв'язку є вивчення їх основних параметрів і характеристик, а саме: пропускної здатності, відношення сигнал/шум, затримки передачі та стійкості до перешкод. Ефективність телекомунікаційних систем визначається цими показниками, які безпосередньо впливають на якість передачі інформації. Створення теоретичної основи для обґрунтування методів оптимізації процесу передачі інформації залежить від

розуміння взаємозв'язку між характеристиками каналу зв'язку та впливом системного шуму.

Оптимізація каналів зв'язку за наявності системного шуму є одним із ключових завдань теорії зв'язку. Застосування класичних методів підвищення стійкості до шуму, включаючи фільтрацію сигналу, шумостійке кодування, вибір параметрів модуляції та аналогічні підходи, сприяє зменшенню негативного впливу шуму та оптимізує якість передачі інформації. Ефективність цих методів залежить від характеристик каналу зв'язку та умов його роботи.

Особливий інтерес представляють бездротові системи зв'язку, що працюють в умовах сильних перешкод, де вимоги до надійності та стабільності передачі інформації є особливо високими. Аналіз таких систем дозволяє прагматично оцінити вплив системних перешкод та ефективність методів оптимізації каналів зв'язку.

Мета роботи – дослідження впливу системних завад на канал зв’язку та обґрунтування методів його оптимізації з метою підвищення якості передавання інформації.

Об’єкт дослідження – канал зв’язку як елемент телекомунікаційної системи.

Предмет дослідження – методи оптимізації каналу зв’язку в умовах системних завад.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФУНКЦІОНУВАННЯ КАНАЛІВ ЗВ’ЯЗКУ

1.1 Поняття каналу зв’язку та його роль у телекомунікаційних системах

Канал зв'язку є одним з основних понять теорії телекомунікацій і відіграє ключову роль у процесі передачі інформації між елементами будь-якої системи зв'язку. Незалежно від функціонального призначення телекомунікаційної системи, її масштабу та технічної реалізації, ефективність її роботи значною мірою визначається властивостями каналу зв'язку [1]. Це канал, через який здійснюється поширення сигналу від джерела до приймача. Він відіграє важливу роль у визначенні рівня втрат, спотворень та перешкод, що виникають під час процесу передачі інформації.

Прийнято вважати, що канал зв'язку визначається як поєднання фізичного середовища передачі та технічних засобів, що забезпечують транспортування сигналів у просторі та часі. Канал зв'язку охоплює як природні середовища передачі, так і технічні елементи, включаючи підсилювачі, ретранслятори, фільтри, лінії затримки та інші пристрої, що впливають на параметри сигналу. Очевидно, що канал зв'язку не є пасивним елементом телекомунікаційної системи, а є складною технічною системою, що має свої характеристики, обмеження та режими роботи.

У рамках телекомунікаційної системи канал зв'язку інтегрує компоненти передачі та приймання, тим самим визначаючи параметри їх взаємодії. Передавач генерує сигнал відповідно до заданих параметрів, який потім передається в канал зв'язку. У цьому каналі сигнал піддається впливу фізичних процесів поширення. Потім приймач здійснює процес відновлення переданої інформації з урахуванням спотворень і перешкод, що виникають у каналі зв'язку. Це безпосередньо впливає на кінцеву якість приймання.

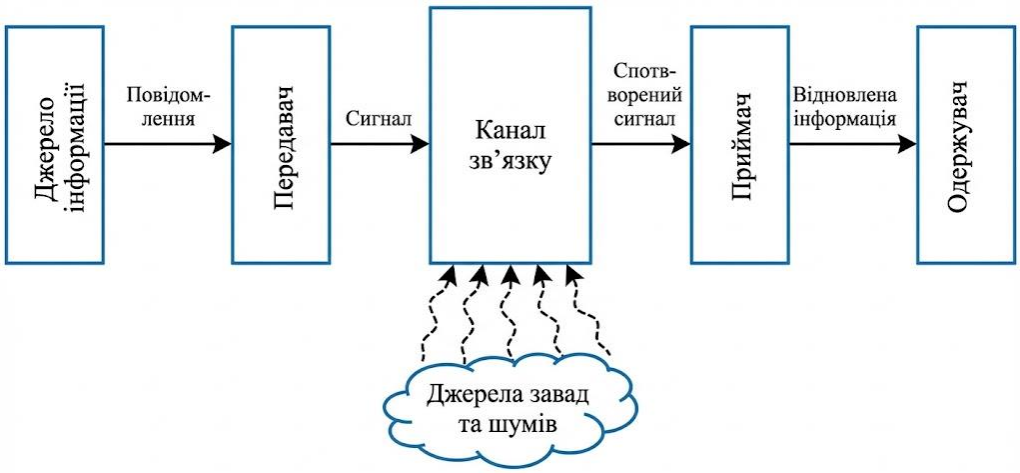


Рис. 1.1 Структура системи передачі інформації

Основною характеристикою каналу зв'язку є його вроджена недосконаліть. У реальних умовах сигнал, що поширюється по каналу, піддається впливу різних дестабілізуючих факторів (1.2). До них відносяться фоновий шум, перешкоди від інших сигналів, загасання, відбиття, багатопроменеве поширення, а також тимчасові та спектральні спотворення. Як наслідок, сигнал, що приймається на вході приймача, відрізняється від сигналу, переданого передавачем, за амплітудою, часом і частотними характеристиками.

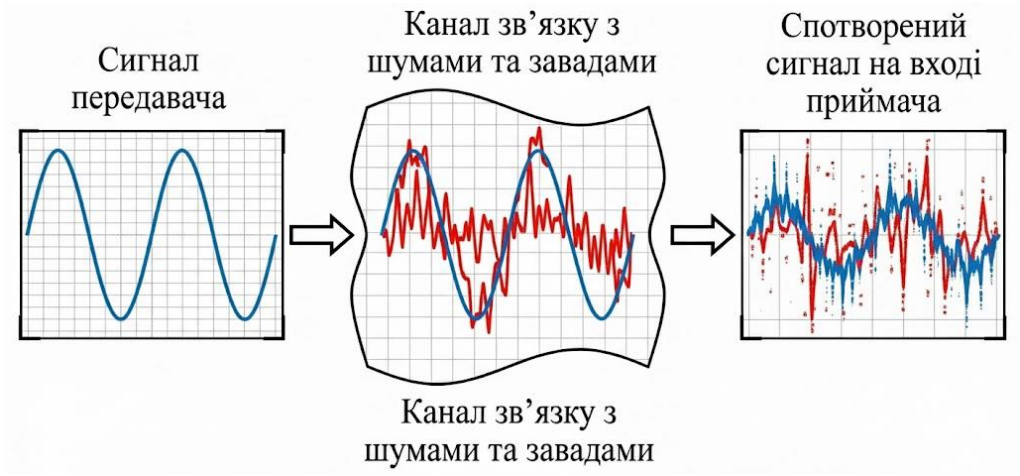


Рис. 1.2 Вплив каналу зв'язку на параметри сигналу

Для кількісного опису властивостей каналу зв'язку використовується система параметрів, що дозволяє оцінити його здатність передавати інформацію з необхідною якістю та надійністю. До основних параметрів каналу належать пропускна здатність, смуга пропускання, рівень шуму, затримка передачі сигналу,

а також стійкість до завад. Сукупний аналіз цих характеристик дає змогу оцінити ефективність функціонування телекомунікаційної системи в реальних умовах експлуатації.

Одним із ключових узагальнених показників якості каналу зв’язку є відношення сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio, SNR) [2]. Даний параметр характеризує співвідношення між потужністю корисного сигналу та потужністю шумових складових у каналі зв’язку і визначає умови приймання інформації. Відношення сигнал/шум зазвичай визначається за формулою (1.1).

$$\mathrm{SNR} = \frac{\mathrm{P_s}}{\mathrm{P_n}} \tag{1.1}$$

де $\mathrm{P_s}$ - потужність корисного сигналу, а $\mathrm{P_n}$ - потужність шуму.

На практиці SNR часто виражається в децибелах за формулою (1.2)

$$\mathrm{SNR_{dB}} = 10\log_{10}\left(\frac{\mathrm{P_s}}{\mathrm{P_n}}\right) \tag{1.2}$$

Зменшення значення SNR внаслідок впливу шумів, завад або загасання сигналу призводить до погіршення умов приймання та зростання ймовірності помилок під час передачі інформації.

Пропускна здатність каналу зв'язку визначається як максимальна кількість інформації, яку канал здатний передати за одиницю часу за заданого рівня завад. Вона є одним із визначальних показників ефективності телекомунікаційної системи. Смуга пропускання, у свою чергу, обмежує діапазон частот сигналів, які можуть передаватися без суттєвих спотворень, і безпосередньо впливає на можливу швидкість передавання даних [3].

Для оцінки надійності передачі інформації широко використовується показник ймовірності бітової помилки (Bit Error Rate, BER). Даний параметр

визначається як відношення кількості неправильно прийнятих бітів до загальної кількості переданих бітів і може бути записаний у вигляді формули (1.3)

$$\mathrm{BER} = \frac{\mathrm{N_{err}}}{\mathrm{N_{tat}}} \tag{1.3}$$

де $\mathrm{N_{err}}$ - кількість помилково прийнятих бітів, а $\mathrm{N_{tot}}$ - загальна кількість переданих бітів.

Показник BER є безпосереднім індикатором якості каналу зв'язку, оскільки він відображає вплив шумів, завад та спотворень на процес передачі інформації. Було встановлено, що зі зменшенням значення SNR спостерігається зростання BER, що призводить до погіршення якості приймання сигналу та необхідності застосування додаткових методів корекції помилок.

Крім того, в умовах обмеженої смуги пропускання та значної затримки сигналу може виникати міжсимвольна інтерференція (Inter-Symbol Interference, ISI), яка проявляється у часовому перекритті сусідніх символів. Наявність ISI додатково ускладнює процес демодуляції сигналу та спричиняє зростання значення BER, особливо в каналах із багатопроменевим поширенням сигналу.

Таким чином, параметри SNR та BER є взаємопов'язаними показниками, які комплексно характеризують якість і надійність каналу зв'язку та відіграють ключову роль у процесі оцінювання ефективності телекомунікаційних систем в умовах дії системних завад.

Затримка передачі сигналу є однією з ключових часових характеристик каналу зв'язку. Вона визначається швидкістю поширення електромагнітних хвиль у середовищі передачі, а також часом, необхідним для обробки сигналу в елементах телекомунікаційної системи. Для систем, що функціонують у режимі реального часу, затримка передачі є критичним показником, оскільки безпосередньо впливає на стабільність роботи системи та суб'єктивне сприйняття якості зв'язку користувачем.

Канал зв'язку в телекомунікаційних системах виконує дві основні функції: з одного боку, він забезпечує фізичне транспортування сигналу між передавачем і

приймачем, а з іншого - формує вимоги до вибору методів модуляції, кодування, фільтрації та компенсації завад. Характеристики каналу зв’язку суттєво впливають на архітектуру системи, склад апаратного забезпечення, алгоритми обробки сигналу та можливості оптимізації процесу передачі інформації залежно від умов поширення сигналу.

Важливу роль у формуванні параметрів каналу відіграють умови поширення сигналу. Зокрема, розрізняють умови прямої видимості між передавачем і приймачем - LOS (Line-of-Sight), які характеризуються відсутністю перешкод на шляху поширення сигналу (1.3). За таких умов сигнал поширюється переважно прямим шляхом, що забезпечує мінімальні втрати потужності, меншу затримку та кращі показники якості зв’язку.

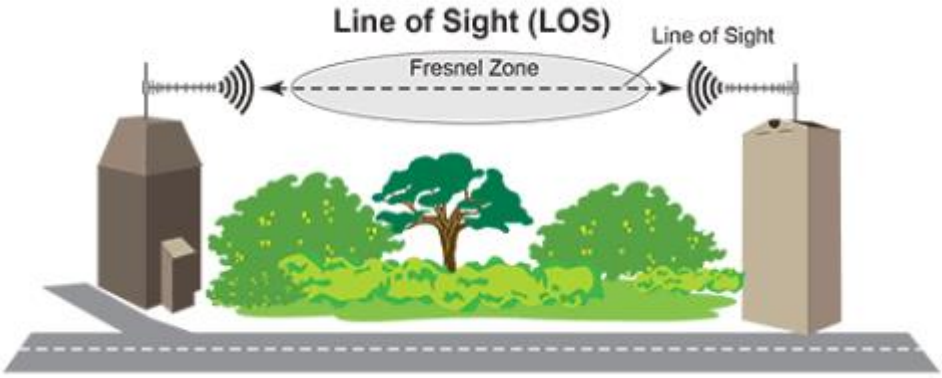


Рис. 1.3 Канал зв’язку LOS

На відміну від цього, умови NLOS (Non-Line-of-Sight) характеризуються відсутністю прямої видимості між передавачем і приймачем (1.4). У таких випадках сигнал досягає приймальної сторони внаслідок відбиттів, дифракції та розсіювання на перешкодах навколишнього середовища, що призводить до збільшення затримки передачі, багатопроменевого поширення та погіршення якісних показників каналу зв’язку.

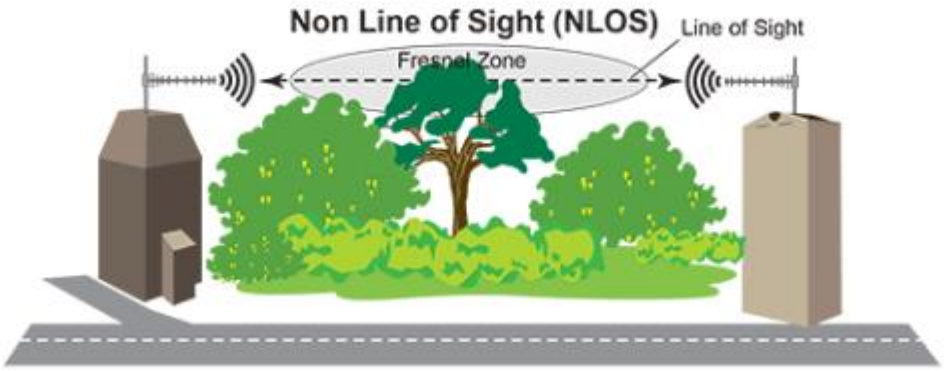


Рис. 1.4 Канал зв’язку NLOS

В умовах реальних умов експлуатації важливо враховувати можливість зміни характеристик каналу зв'язку з часом. Такі зміни можуть бути пов'язані із зовнішніми факторами, включаючи рух об'єктів, зміни в середовищі поширення сигналу та рівні перешкод. Це вимагає детального аналізу властивостей каналу зв'язку, що створює передумови для вивчення системних перешкод та розробки методів підвищення стійкості телекомунікаційних систем до їх впливу.

Очевидно, що канал зв'язку відіграє ключову роль у телекомунікаційній системі, безпосередньо впливаючи на якість, надійність та ефективність передачі інформації. Для спрощення проектування та оптимізації сучасних телекомунікаційних систем необхідно розуміти характеристики каналу зв'язку та умови поширення сигналу.

1.2 Основні параметри та характеристики каналів зв’язку

Функціональність каналу зв'язку в телекомунікаційних системах визначається набором параметрів і характеристик, що описують здатність каналу передавати інформацію з необхідною якістю в реальних умовах експлуатації. Аналіз цих параметрів є ключовим етапом у дослідженні каналів зв'язку, оскільки він визначає швидкість передачі даних, стійкість до перешкод і надійність прийому інформації [4].

Параметри каналів зв'язку вказують як на фізичні властивості середовища передачі, так і на вплив випадкових процесів, що відбуваються під час поширення

сигналу. Сукупний вплив цих факторів визначає якість сигналу на вході приймача та ефективність всієї телекомунікаційної системи. На практиці параметри каналів зв'язку взаємопов'язані, і їх зміни впливають на загальну якість передачі інформації.

Пропускна здатність каналу зв'язку є ключовим параметром, оскільки вона визначає максимальний обсяг інформації, який може бути переданий через канал за одиницю часу. Пропускна здатність залежить від ширини смуги пропускання, рівнів шуму та перешкод, а також від використовуваних методів модуляції та кодування. У галузі теорії зв'язку пропускна здатність розглядається як обмежуючий фактор, що обмежує максимальну швидкість передачі інформації, яку можна досягти в ідеальних умовах.

Важливо визнати, що в реальних умовах експлуатації пропускна здатність каналу зв'язку часто нижча за теоретичне максимальне значення. Це явище можна пояснити різними факторами, зокрема наявністю шуму та перешкод, необхідністю застосування методів кодування, стійких до шуму, а також обмеженнями, властивими апаратній реалізації телекомунікаційних систем. У цьому контексті практична швидкість передачі інформації є результатом компромісу між максимальною пропускною здатністю каналу та вимогами до надійності зв'язку [5].

Як вказується у відповідній літературі, пропускна здатність тісно пов'язана з параметром пропускної здатності каналу зв'язку. Цей параметр, як стверджують численні вчені, є визначальним фактором діапазону частот сигналів, які можуть передаватися без значних спотворень. Наявність обмеженої пропускної здатності призводить до спектральних спотворень сигналу, тим самим накладаючи обмеження на швидкість передачі інформації. Необхідно визнати ключову роль пропускної здатності у виборі параметрів сигналу та методів модуляції.

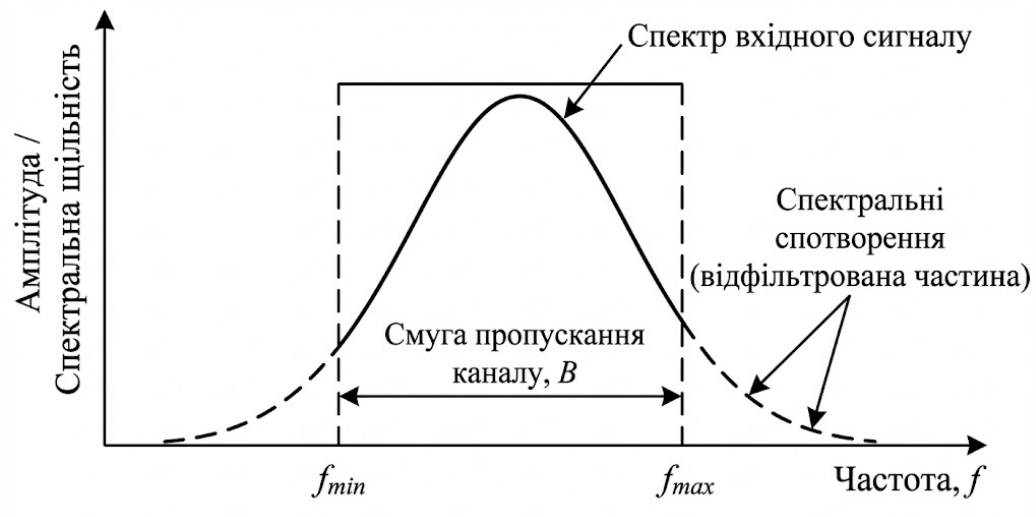


Рис. 1.5 Смуга пропускання каналу зв’язку та спектр сигналу

Смуга пропускання також впливає на спектральну ефективність каналу зв'язку, яка характеризує обсяг інформації, що передається в одиниці частотного ресурсу. З огляду на обмежений характер спектральних ресурсів, ефективне використання смуги пропускання є важливим завданням при проектуванні телекомунікаційних систем, що безпосередньо впливає на вибір технічних рішень.

Відношення сигнал/шум є критичним показником для оцінки якості каналу зв'язку, оскільки воно кількісно виражає співвідношення потужності корисного сигналу до потужності шумових складових на вході приймача. Зниження цього показника пов'язане з підвищеною ймовірністю помилок передачі інформації та погіршенням якості прийому сигналу. Відношення сигнал/шум є широко використовуваним показником для оцінки продуктивності каналу зв'язку та визначення його прийнятних режимів роботи.

Важливо зазначити, що відношення сигнал/шум не є постійною величиною і може змінюватися залежно від умов роботи каналу зв'язку. Коливання цього показника пов'язані зі змінами рівнів шуму, перешкод і параметрів сигналу, що ускладнює забезпечення стабільної якості передачі інформації. При проектуванні телекомунікаційних систем часто передбачається певний запас по відношенню сигнал/шум.

Іншим важливим параметром каналу зв'язку є затримка передачі, яка характеризує часові властивості процесу передачі сигналу. Затримка передачі

визначається швидкістю поширення сигналу в середовищі передачі, а також часом, необхідним для його обробки в елементах каналу зв'язку. У контексті систем, чутливих до часових параметрів, затримка передачі була визначена як критичний показник, що впливає на якість і стабільність їх роботи.

Окрім абсолютного значення затримки, важливу роль відіграє її варіативність у часі, яка може призводити до додаткових спотворень сигналу. Коливання затримки негативно впливають на стабільність роботи телекомунікаційних систем і враховуються при оцінці якості каналу зв’язку.

Інтегральною характеристикою якості каналу зв’язку є ймовірність помилок передавання інформації. Цей показник безпосередньо відображає результат впливу шумів, завад і обмежень каналу на процес приймання сигналу. Аналіз ймовірності помилок дозволяє кількісно оцінити ефективність каналу зв’язку та доцільність застосування тих чи інших методів оптимізації.

Сукупність розглянутих параметрів визначає завадостійкість каналу зв’язку, тобто його здатність забезпечувати задану якість передавання інформації в умовах впливу системних завад. Завадостійкість є комплексною характеристикою, яка формується під впливом фізичних властивостей каналу та застосованих методів обробки сигналів.

У реальних телекомунікаційних системах параметри каналу зв’язку можуть змінюватися з часом під впливом зовнішніх умов, режимів роботи системи та характеристик середовища передавання. Це зумовлює необхідність детального аналізу параметрів каналу зв’язку та створює передумови для подальшого дослідження системних завад і методів оптимізації каналу зв’язку, що розглядаються у наступному розділі.

Необхідно більш ретельно дослідити параметри каналів зв'язку, враховуючи, що реальні телекомунікаційні системи функціонують в умовах постійної мінливості середовища передачі. На відміну від ідеалізованих моделей, в практичних системах параметри каналу зв'язку не є постійними в часі, а змінюються під впливом як зовнішніх, так і внутрішніх факторів. До факторів, що сприяють цьому явищу, належать зміни температурних умов, коливання

навантаження мережі, рух об'єктів у зоні поширення сигналу та нестабільність характеристик апаратних компонентів.

Мінливість параметрів каналу зв'язку призводить до значних коливань якості передачі інформації навіть протягом одного сеансу зв'язку. Це особливо очевидно в контексті бездротових систем, де відношення сигнал/шум, рівень перешкод і затримка передачі можуть демонструвати значні коливання. У таких умовах традиційні статичні методи проектування каналів зв'язку не є достатньо ефективними. Це вимагає використання більш гнучких підходів до оцінки та підтримки якості зв'язку.

Важливим елементом аналізу параметрів каналу зв'язку є врахування статистичного характеру більшості процесів, що відбуваються під час поширення сигналу. Компоненти шуму, перешкоди та коливання рівня сигналу зазвичай мають випадковий характер і описуються ймовірнісними моделями. У цьому зв'язку важливо зазначити, що параметри каналу часто оцінюються не за миттєвими значеннями, а за статистичними характеристиками, такими як середнє значення, дисперсія та функції розподілу випадкових змінних.

Спектральна структура сигналу має значний вплив на характеристики каналу зв'язку. Наявність обмежень пропускної здатності каналу призводить до спотворення спектра переданого сигналу. Це, в свою чергу, може спричинити міжсимвольну інтерференцію. Це явище особливо помітне в цифрових системах зв'язку, що характеризуються високою швидкістю передачі даних, де інтервали між символами мінімальні. У таких умовах навіть незначні спектральні обмеження можуть мати істотний вплив на якість прийому інформації.

Іншим фактором, який, як було доведено, впливає на параметри каналу зв'язку, є нелінійність елементів шляху передачі та прийому. Доведено, що нелінійні спотворення призводять до появи додаткових гармонік та інтермодуляційних компонентів, що розширює спектр сигналу та збільшує рівень перешкод. Як наслідок, ефективна пропускна здатність каналу зв'язку використовується менш ефективно, а відношення сигнал/шум на вході приймача зменшується. При проведенні ретельного аналізу реальних телекомунікаційних

систем, особливо в сценаріях, що передбачають умови передачі великої потужності, обов'язково слід враховувати нелінійні ефекти.

Затримка передачі інформації в каналі зв'язку також може мати складну структуру, що включає як постійну складову, так і змінну, випадкову частину. Мінливість затримки, відома як джиттер, є критичним параметром для систем, що вимагають точної синхронізації часу. Було доведено, що підвищений рівень джиттера призводить до втрати пакетів, помилок синхронізації та погіршення якості обслуговування, особливо в контексті мультимедійних систем потокового передавання.

Крім того, на вибір архітектури телекомунікаційної системи та методів обробки сигналів безпосередньо впливають параметри каналу зв'язку. У контексті каналів, що характеризуються підвищеним рівнем шуму та перешкод, рекомендується використовувати методи надлишкового кодування та виправлення помилок, щоб зменшити ймовірність помилок прийому. Водночас використання таких методів призводить до зниження ефективної швидкості передачі інформації, що підкреслює необхідність пошуку компромісних рішень.

1.3 Класифікація каналів зв’язку за середовищем передавання

Очевидно, що канали зв'язку можуть значно відрізнятися за своїми фізичними властивостями, принципами роботи та характеристиками продуктивності. Фундаментальний аспект класифікації каналів зв'язку стосується природи середовища передачі, через яке поширюється сигнал. Саме середовище передачі визначає більшість параметрів каналу зв'язку, включаючи загасання сигналу, схильність до перешкод, пропускну здатність і дальність передачі.

Класифікація каналів зв'язку базується на природі середовища передачі, причому дротові та бездротові канали представляють дві окремі класифікації. Кожен з цих типів має свої особливості, переваги та обмеження, які визначають можливість їх використання в різних телекомунікаційних системах.

Дротові канали зв'язку відрізняються передачею сигналу через фізичне дротове середовище. Прикладами таких каналів є комунікаційні лінії на основі мідних провідників, коаксіальні кабелі та волоконно-оптичні лінії. Основною перевагою дротових каналів зв'язку є висока стабільність параметрів передачі та відносно низька чутливість до зовнішніх електромагнітних перешкод.

Дротові канали зв'язку полегшують передачу сигналу в контрольованому фізичному середовищі, забезпечуючи тим самим високу пропускну здатність і низький рівень помилок. Однак такі канали характеризуються обмеженою гнучкістю розгортання через необхідність прокладання кабельних ліній, що може перешкоджати їх використанню в мобільних або складних умовах місцевості.

Особливе місце серед провідних каналів зв’язку займають оптоволоконні канали, які забезпечують передавання інформації за допомогою світлових сигналів. Оптичне волокно характеризується надзвичайно високою пропускною здатністю, малими втратами сигналу та високою завадостійкістю. Завдяки цим властивостям оптоволоконні канали широко застосовуються в магістральних і високошвидкісних телекомунікаційних мережах.

Бездротові канали зв’язку здійснюють передавання інформації через відкритий простір без використання фізичних провідників. У таких каналах сигнал поширюється у вигляді електромагнітних хвиль у повітряному або вакуумному середовищі. Основною перевагою бездротових каналів є висока мобільність і можливість швидкого розгортання систем зв’язку без необхідності прокладання кабельної інфраструктури.

Разом з тим бездротові канали зв’язку є більш чутливими до впливу системних завад, відбиттів, багатопроменевого поширення та змін умов середовища. Унаслідок цього параметри бездротових каналів можуть істотно змінюватися з часом, що ускладнює забезпечення стабільної якості зв’язку.

До бездротових каналів зв’язку належать радіоканали різних діапазонів частот, зокрема канали стільникового зв’язку, безпроводових локальних мереж і спеціалізованих систем передавання інформації. Властивості таких каналів

значною мірою визначаються частотним діапазоном, шириною смуги пропускання та рівнем зовнішніх завад.

Для узагальнення основних відмінностей між провідними та бездротовими каналами зв’язку доцільно провести їх порівняльний аналіз за ключовими параметрами.

Таблиця 1.1

Порівняльна характеристика каналів зв’язку за середовищем передавання

Характеристика	**Провідні канали**	**Бездротові канали**
Середовище передавання	Кабель, оптичне волокно	Повітря, відкритий простір
Пропускна здатність	Висока	Обмежена спектром
Стійкість до завад	Висока	Нижча
Стабільність параметрів	Висока	Змінна
Мобільність	Обмежена	Висока
Складність розгортання	Вища	Нижча

Порівняльний аналіз показує, що вибір типу каналу зв'язку залежить від конкретних умов експлуатації та вимог до системи зв'язку. Провідні канали оптимально підходять для стаціонарних систем, що характеризуються високими вимогами до пропускної здатності та надійності. Навпаки, бездротові канали забезпечують підвищену гнучкість і мобільність у системах, що піддаються змінним умовам експлуатації.

Очевидно, що класифікація каналів зв'язку за носієм передачі сприяє систематизації їх основних властивостей та визначенню відмінних характеристик, притаманних кожній категорії. Необхідно розуміти відмінності між дротовими та бездротовими каналами, щоб полегшити більш глибоке вивчення наслідків системних перешкод та вибір методологій для оптимізації каналу зв'язку.

При подальшому доопрацюванні класифікацію каналів зв'язку необхідно враховувати той факт, що навіть в межах однієї категорії канали можуть значно відрізнятися за своїми характеристиками та умовами експлуатації. Для ілюстрації цього твердження розглянемо випадок дротових каналів зв'язку, які використовують різні фізичні носії. Кожен з цих носіїв має властиві йому обмеження щодо таких факторів, як швидкість передачі, довжина лінії та рівень

втрат. Аналогічним чином, бездротові канали охоплюють широкий спектр технологій, що працюють у різних частотних діапазонах. Ці технології використовують різні методи формування та обробки сигналів.

У контексті дротових каналів зв'язку якість фізичного середовища передачі має першочергове значення. Доведено, що наявність нерівностей у кабельних лініях, старіння матеріалів, вплив температури та механічні пошкодження призводять до погіршення характеристик каналу (Smith, 2022). Навіть у відносно стабільних середовищах передачі в дротових каналах спостерігаються такі явища, як загасання сигналу, фазове спотворення та внутрішній шум. Ці фактори необхідно враховувати при аналізі та проектуванні систем зв'язку.

Незважаючи на очевидні переваги, волоконно-оптичні канали мають свої обмеження. Такі канали схильні до явищ дисперсії, що призводить до розширення імпульсів у часі, а також до нелінійних ефектів, які можуть виникати при високих рівнях потужності оптичного сигналу. Зазначені фактори накладають обмеження на максимальну швидкість передачі інформації та вимагають застосування спеціальних методів компенсації спотворень.

Бездротові канали зв'язку характеризуються набагато більшою різноманітністю умов поширення сигналу. У відкритому просторі на електромагнітні хвилі впливають рельєф місцевості, будівлі, рослинність і рухомі об'єкти. Як наслідок, бездротові канали часто мають випадковий характер, і їх параметри можуть змінюватися навіть при незначних рухах передавача або приймача. Тому для аналізу каналу зв'язку необхідно використовувати статистичні моделі.

Важливим фактором, що впливає на властивості бездротових каналів, є діапазон частот системи. Загальновизнано, що канали, які працюють у нижчих діапазонах частот, зазвичай характеризуються кращою проникністю та меншою чутливістю до перешкод. Однак слід зазначити, що ці канали мають обмежену пропускну здатність. І навпаки, вищі діапазони частот забезпечують вищі швидкості передачі даних, але вони більш чутливі до загасання та екранування

сигналу. Очевидно, що вибір діапазону частот безпосередньо впливає на характеристики каналу зв'язку.

Важливо також зазначити, що бездротові канали зв'язку зазвичай спільно використовують частотні ресурси, що може спричинити взаємні перешкоди між різними користувачами та системами. Доведено, що наявність таких перешкод негативно впливає на ефективну пропускну здатність і ускладнює забезпечення гарантованої якості обслуговування. Це одна з ключових відмінностей між бездротовими каналами та дротовими каналами, де вплив зовнішніх сигналів є значно меншим.

Питання масштабованості каналів зв'язку заслуговує на особливу увагу. Впровадження дротових каналів часто вимагає значних витрат часу та ресурсів для розширення або вдосконалення інфраструктури. Водночас бездротові системи дозволяють відносно швидко збільшувати кількість користувачів або розширювати зону покриття за рахунок оптимізації параметрів передачі або розгортання додаткових мережевих вузлів. Однак така гнучкість часто супроводжується посиленням перешкод і необхідністю більш складного управління ресурсами.

Що стосується надійності зв'язку, між дротовими та бездротовими каналами існують значні відмінності. Дротові канали демонструють стабільну роботу протягом тривалого часу, що є важливим фактором для систем із суворими вимогами до безперебійної передачі даних. Водночас бездротові канали більш схильні до короткочасних перебоїв у зв'язку, що пов'язано із зовнішніми впливами або змінами умов поширення сигналу.

Класифікація каналів зв'язку за носієм передачі дозволяє систематизувати їх основні властивості. Крім того, це полегшує виявлення характерних обмежень і переваг, властивих кожному типу. Розуміння цих особливостей є обов'язковою передумовою для подальшого аналізу впливу системних перешкод на якість передачі інформації.

Вибір типу каналу зв'язку в конкретній телекомунікаційній системі повинен ґрунтуватися на ретельному вивченні умов експлуатації, вимог до пропускної

здатності, надійності та мобільності, а також передбачуваного рівня перешкод. Ці фактори визначають доцільність використання дротових або бездротових каналів і є основою для подальших досліджень методів оптимізації каналів зв'язку під впливом системних перешкод.

1.4 Бездротові канали зв’язку: принципи роботи та особливості

Бездротові канали зв'язку є ключовим компонентом сучасних телекомунікаційних систем, що полегшують передачу інформації без використання фізичних дротових носіїв (1.6). У таких каналах сигнал поширюється у вигляді електромагнітних хвиль у відкритому просторі, що забезпечує значні переваги з точки зору мобільності, гнучкості розгортання та масштабованості комунікаційних мереж. Водночас бездротові канали мають ряд характеристик, які суттєво впливають на якість та надійність передачі інформації [6].

Функціонування бездротового каналу зв'язку базується на формуванні електромагнітного сигналу передавачем, його поширенні в просторі та прийманні приймальним пристроєм. Під час поширення сигнал піддається впливу фізичних явищ, які є наслідком властивих передавальному середовищу властивостей. На відміну від дротових каналів, параметри бездротового каналу залежать від умов навколишнього середовища і можуть змінюватися з часом.



Рис. 1.6 Смуга пропускання каналу зв’язку та спектр сигналу

У сучасних телекомунікаційних системах бездротові канали зв’язку реалізуються на основі різноманітних стандартів радіодоступу, серед яких найбільш поширеними є технології Wi-Fi та мобільні мережі п’ятого покоління (5G). Зазначені технології базуються на єдиних фізичних принципах поширення електромагнітних хвиль, однак відрізняються архітектурою мережі, умовами експлуатації та вимогами до якості каналу зв’язку.

Технологія Wi-Fi (Wireless Fidelity) є бездротовою технологією локального доступу, призначеною для організації передавання даних у межах обмеженої території, зокрема в локальних комп’ютерних мережах. Wi-Fi функціонує переважно в неліцензованих радіочастотних діапазонах, що спрощує її розгортання, проте водночас зумовлює підвищену чутливість до завад з боку інших бездротових пристроїв. Для каналів Wi-Fi характерні висока швидкість передавання даних на малих відстанях і суттєва залежність якості зв’язку від завадової обстановки та багатопроменевого поширення сигналу [7].

Мобільні мережі п’ятого покоління є розвитком систем стільникового зв’язку та орієнтовані на забезпечення широкого покриття, високої пропускної здатності, низької затримки та підтримки великої кількості абонентських пристроїв. Канали зв’язку в мережах 5G працюють у різних частотних діапазонах і характеризуються змінними умовами поширення сигналу, що зумовлює необхідність адаптивного керування параметрами передавання. Незважаючи на високий рівень технологічної досконалості, канали 5G також зазнають впливу загасання, багатопроменевого поширення та зовнішніх завад.

Для підвищення ефективності використання обмеженого радіочастотного спектра та забезпечення стійкості до завад у сучасних бездротових системах застосовуються багатонесучі методи передавання сигналів. Одним із базових методів є ортогональне частотне мультиплексування OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), яке передбачає поділ інформаційного потоку на велику кількість ортогональних піднесучих [8]. Такий підхід дозволяє зменшити вплив міжсимвольної інтерференції та підвищити завадостійкість каналу в умовах багатопроменевого поширення сигналу.

Подальшим розвитком методу OFDM є технологія OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), яка забезпечує множинний доступ декількох користувачів до спільного частотного ресурсу. OFDMA дозволяє гнучко розподіляти піднесучі між абонентами (1.7), що підвищує спектральну ефективність і стабільність роботи бездротових каналів у системах з великою кількістю активних користувачів. Застосування OFDM та OFDMA є характерною особливістю як мереж Wi-Fi сучасних стандартів, так і мобільних систем зв'язку п'ятого покоління.

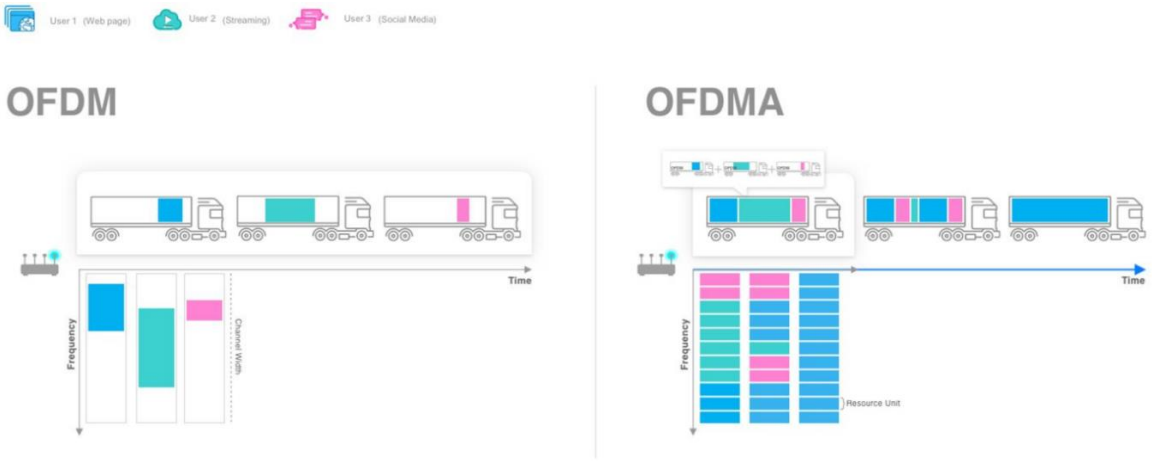


Рис. 1.7 Порівняння OFDM та OFDMA

Однією з характерних особливостей бездротових каналів зв'язку є явище загасання сигналу під час його поширення в просторі. Загасання зумовлене розсіюванням енергії електромагнітної хвилі та залежить від відстані між передавачем і приймачем, частоти сигналу та характеристик середовища. Зі збільшенням відстані рівень сигналу зменшується, що призводить до погіршення відношення сигнал/шум і зростання ймовірності помилок передавання.

Ще однією важливою особливістю бездротових каналів є багатопроменеве поширення сигналу. У реальних умовах електромагнітні хвилі можуть відбиватися від різних об'єктів, таких як будівлі, поверхні землі та інші перешкоди. У результаті до приймача надходить декілька копій сигналу, що мають різні затримки та фази. Це явище може призводити до інтерференційних спотворень і значних коливань рівня прийнятого сигналу.

Бездротові канали зв’язку є особливо чутливими до впливу зовнішніх завад і шумів. Джерелами таких завад можуть бути інші радіоелектронні засоби, що працюють у суміжних частотних діапазонах, атмосферні явища, а також техногенні електромагнітні випромінювання. Наявність завад призводить до зниження якості приймання сигналу та обмежує ефективну пропускну здатність каналу зв’язку.

Важливою характеристикою бездротових каналів є нестабільність їх параметрів у часі (1.8). Зміна умов поширення сигналу, переміщення передавача або приймача, а також зміни в навколишньому середовищі призводять до флуктуацій рівня сигналу та інших параметрів каналу. Це ускладнює забезпечення стабільної якості зв’язку та вимагає застосування адаптивних методів обробки сигналів.

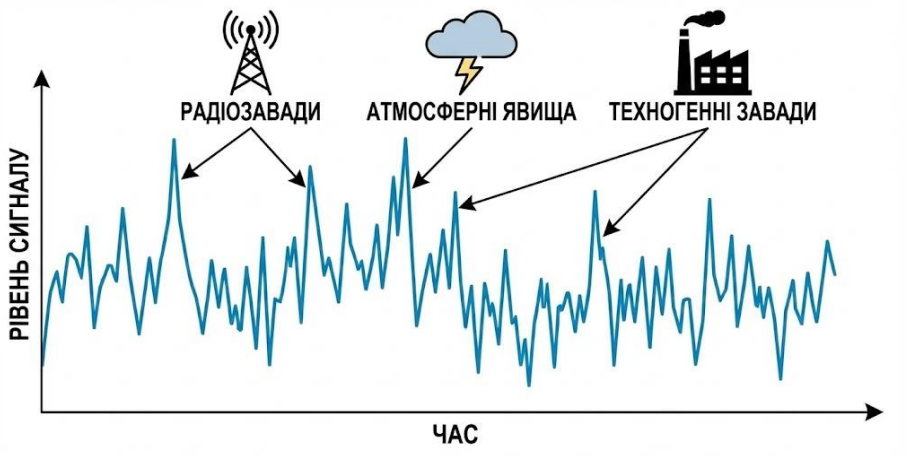


Рис. 1.8 Зміна параметрів бездротового каналу зв’язку в часі

У порівнянні з дротовими каналами зв'язку, бездротові канали мають обмежені спектральні ресурси. Радіочастотний спектр підлягає регулюванню та використанню численними системами, що накладає додаткові обмеження на пропускну здатність та потенційну швидкість передачі даних. Це вимагає ефективного використання частотних ресурсів та застосування методів передачі сигналів, стійких до перешкод.

Водночас бездротові канали зв'язку мають ряд переваг, серед яких висока мобільність, швидке розгортання систем зв'язку та можливість організації передачі інформації в умовах, коли використання дротових каналів є складним або

недоцільним. Саме ці характеристики лежать в основі широкого використання бездротових каналів у сучасних телекомунікаційних системах.

Очевидно, що бездротові канали зв'язку характеризуються складними умовами поширення сигналу, змінними параметрами та підвищеною чутливістю до системних перешкод. Тому необхідний детальний аналіз обмежень бездротових каналів, а також розгляд питань оптимізації каналів зв'язку, що логічно продовжується в наступних підрозділах цього розділу.

У цьому зв'язку важливо зазначити, що аналіз бездротових каналів зв'язку не повинен обмежуватися описом фізичних явищ поширення сигналу. Для всебічного розуміння їх операційної функціональності необхідно провести ретельне дослідження взаємодії між фізичним рівнем передачі та рівнями управління мережевими ресурсами. У сучасних бездротових системах вибір режимів модуляції, кодування та розподілу частотних ресурсів залежить від параметрів каналу, що, в свою чергу, визначає загальну ефективність системи.

Крім того, бездротові канали зв'язку характеризуються високим ступенем стохастичності, що ускладнює їх точне математичне описування. Коливання рівня сигналу, випадковий характер перешкод та непередбачувані зміни умов поширення вимагають використання статистичних моделей каналів. Ці моделі полегшують оцінку ймовірнісних характеристик сигналів та перешкод, тим самим слугуючи ключовим інструментом в аналізі якості передачі інформації.

Питання системних перешкод набуває особливого значення в умовах високої щільності бездротових пристроїв. У сучасних міських умовах одночасна робота значної кількості абонентських і базових станцій призводить до ескалації взаємних перешкод і перевантаження радіочастотного спектру. Це негативно впливає на стабільність каналів зв'язку і вимагає впровадження більш досконалих методів управління передачею та координації доступу до ресурсів.

Варто також зазначити, що в бездротових каналах зв'язку перешкоди можуть бути як локальними, так і глобальними за своєю природою. Локальні перешкоди пов'язані з конкретним середовищем або групою пристроїв, тоді як глобальні перешкоди можуть охоплювати великі території і впливати на роботу цілих

сегментів мережі. Ця особливість ускладнює забезпечення гарантованих показників якості зв'язку і підкреслює важливість системного підходу до аналізу перешкод.

Очевидно, що канали бездротового зв'язку є складними динамічними об'єктами, параметри яких формуються під впливом численних взаємопов'язаних факторів. Поєднання багатопроменевого поширення, загасання, обмежених спектральних ресурсів та зовнішніх перешкод створює складне середовище перешкод. Це вимагає детального вивчення системних перешкод у каналах бездротового зв'язку та їх впливу на показники якості передачі інформації, що є предметом подальшого розгляду в цьому розділі.

1.5 Оптоволоконні канали зв’язку: принципи роботи та особливості

Волоконно-оптичні канали зв'язку вважаються одним з найефективніших засобів передачі інформації в сучасних телекомунікаційних системах. Вони широко використовуються для організації високошвидкісних і магістральних мереж передачі даних (Smith, 2020). Активне використання цих пристроїв можна пояснити зростаючим попитом на пропускну здатність, необхідністю стабільності каналів і вимогою високої стійкості до перешкод під час передачі інформації на великі відстані [9]. На відміну від бездротових та електричних дротових каналів, носієм інформації в волоконно-оптичних каналах є оптичне випромінювання, що створює принципово інші фізичні умови для поширення сигналу.

Оптичне волокно - це тонкий, гнучкий світлопровідник, що складається з кварцового скла або полімерних матеріалів. Його основна функція - передача світлових сигналів на великі відстані з мінімальними втратами. Основною характеристикою оптичного волокна є його здатність передавати світлове випромінювання всередині своєї структури в напрямку, з мінімальною втратою енергії назовні.

Структурно оптичне волокно складається з кількох основних елементів. Центральною частиною є серцевина, виготовлена з матеріалу з більшим

показником заломлення, через яку безпосередньо поширюється світловий сигнал. Серцевина оточена оболонкою, показник заломлення якої є меншим, що створює умови для виникнення явища повного внутрішнього відбиття. Зовнішні шари волокна виконують захисну функцію, оберігаючи його від механічних пошкоджень та впливу навколишнього середовища (1.9).

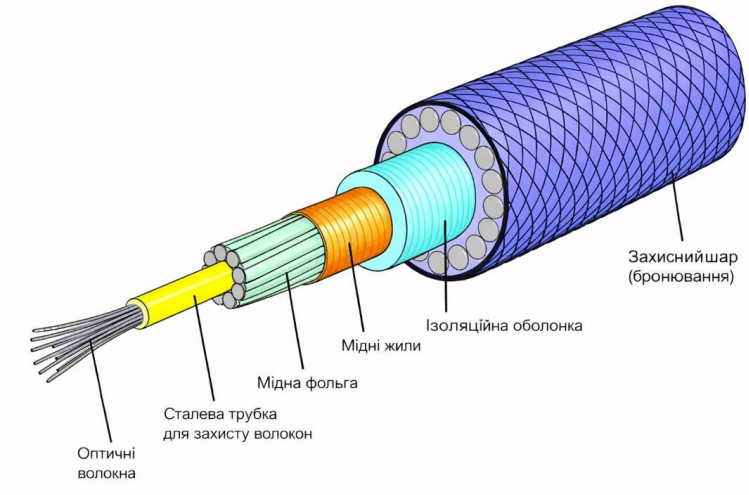


Рис. 1.9 Будова оптичного волокна

Принцип роботи оптоволоконного каналу зв’язку ґрунтується на передаванні інформації у вигляді світлових імпульсів (1.10), які вводяться в серцевину волокна та поширюються вздовж нього завдяки явищу повного внутрішнього відбиття. За цього явища світловий промінь багаторазово відбивається від межі між серцевиною та оболонкою, залишаючись усередині волокна навіть за значної довжини лінії зв’язку.

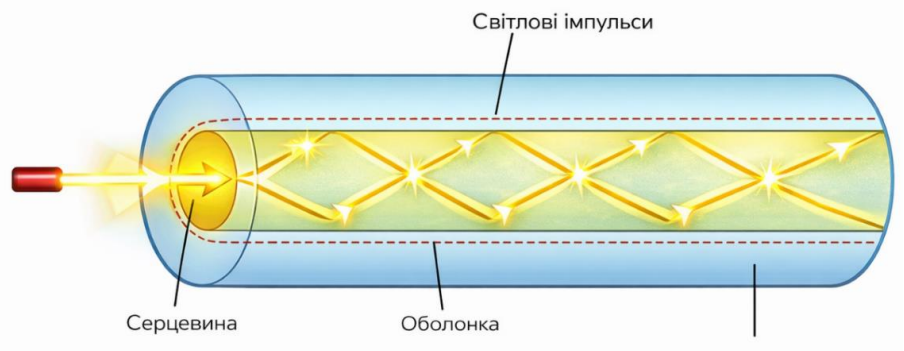


Рис. 1.10 Принцип внутрішнього відбиття в оптичному волокні

Загальна конфігурація волоконно-оптичного каналу зв'язку включає оптичний передавач, оптичне волокно для передачі та оптичний приймач. На стороні передачі електричний сигнал перетворюється в оптичний за допомогою лазерного діода або світлодіода [10]. Потім світловий сигнал проходить по волокну до сторони прийому, де світлочутливий елемент знову перетворює оптичний сигнал в електричний. Якість передачі інформації визначається як характеристиками самого волокна, так і параметрами передавального та приймального обладнання.

Основною перевагою волоконно-оптичних каналів є їхня виняткова пропускна здатність. Діапазон оптичних частот значно ширший, ніж діапазон радіочастот, що дозволяє передавати великі обсяги інформації з надзвичайно високою швидкістю. Як наслідок, волоконно-оптичні канали стали основою для магістральних мереж, центрів обробки даних та сучасної телекомунікаційної інфраструктури.

Ще однією важливою особливістю волоконно-оптичних каналів є їх висока стійкість до перешкод. Очевидно, що завдяки своїй непроводячій природі оптичне волокно виявляє високий ступінь стійкості до електромагнітних, атмосферних та індукційних перешкод. Отже, параметри волоконно-оптичного каналу виявляють стабільність і значну незалежність від зовнішніх умов, забезпечуючи тим самим надійність передачі інформації.

Однак слід зазначити, що волоконно-оптичні канали мають свої обмеження, які є наслідком їх фізичної природи. Одним з таких обмежень є загасання оптичного сигналу, яке спричинене поглинанням і подальшим розсіюванням світла в матеріалі волокна. Загасання визначається як поступове зменшення сили сигналу, яке відбувається із збільшенням довжини лінії зв'язку (1.11). Для протидії цьому ефекту необхідне використання оптичних підсилювачів або точок регенерації.

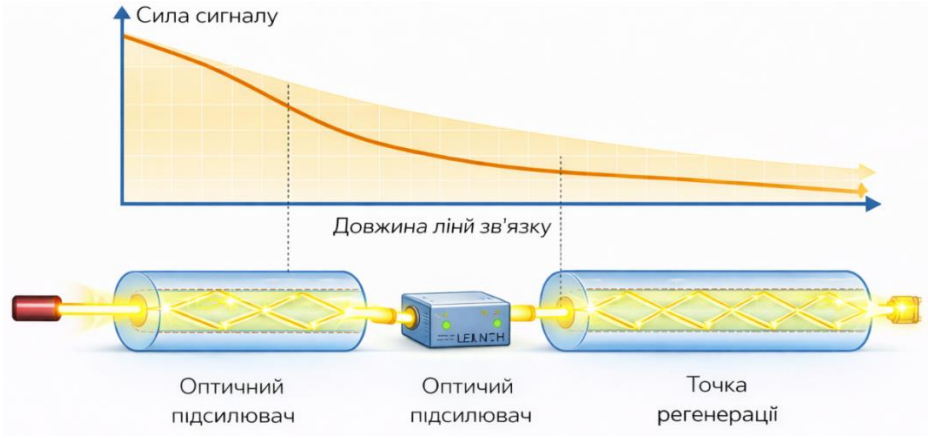


Рис. 1.11 Загасання оптичного сигналу вздовж довжини оптоволоконної лінії

Іншим важливим фактором, що впливає на характеристики волоконно-оптичних каналів зв'язку, є дисперсія.

Дисперсія визначається як фізичне явище, що полягає в тимчасовому розширенні оптичних імпульсів під час їх поширення по оптичному волокну. Важливо зазначити, що через ефекти дисперсії різні компоненти світлового імпульсу приймаються приймачем у різний час. Це призводить до перекриття сусідніх імпульсів, що, в свою чергу, призводить до зниження якості прийому інформації.

Залежно від характеру її виникнення, існує три типи дисперсії: модальна, хроматична та поляризаційна.

Модальна дисперсія є характеристикою багатомодових волокон і викликана поширенням світла вздовж різних модальних траєкторій різної довжини. Хроматична дисперсія - це явище залежності швидкості поширення світла від довжини хвилі. Це властивість, притаманна як одномодовим, так і багатомодовим волокнам. Поляризаційна дисперсія пов'язана з анізотропією матеріалу волокна і виникає переважно в одномодових лініях на великих відстанях.

Залежно від конструктивних особливостей і режиму поширення світла, волоконно-оптичні канали поділяються на одномодові та багатомодові.

Поширення світлових сигналів в одному режимі забезпечується одномодовими оптичними волокнами, які практично усувають модальну дисперсію. Це сприяє високій швидкості передачі даних на великі відстані, що

робить одномодові волокна основним засобом передачі в магістральних і міжконтинентальних телекомунікаційних мережах.

Багатомодові оптичні волокна відрізняються здатністю поширювати світло в декількох режимах, що полегшує введення сигналу і знижує вартість обладнання для передачі. Водночас наявність модальної дисперсії накладає істотні обмеження на максимальну швидкість передачі і дальність зв'язку. Як наслідок, багатомодові волокна переважно використовуються в локальних мережах і на коротких відстанях.

Очевидно, що волоконно-оптичні канали зв'язку характеризуються трьома основними властивостями: високою пропускною здатністю, стабільністю параметрів і стійкістю до зовнішніх перешкод. Ці властивості роблять їх ключовим елементом сучасних телекомунікаційних систем. Одночасно фізичні обмеження, пов'язані з загасанням і дисперсією, вимагають оптимального вибору параметрів передачі і технічних рішень. Порівняння волоконно-оптичних каналів і бездротових каналів зв'язку можна провести на основі аналізу принципів роботи і характеристик перших.

Порівняльний аналіз волоконно-оптичних і бездротових каналів зв'язку дозволяє більш точно визначити сфери їх застосування та вплив системних перешкод на процес передачі інформації. У контексті бездротових каналів на якість зв'язку переважно впливають зовнішні фактори, включаючи перешкоди, багатопроменеве поширення, просторове загасання та мінливість середовища поширення. На відміну від цього, в волоконно-оптичних системах домінуючий вплив на якість зв'язку мають внутрішні фізичні процеси, пов'язані з властивостями матеріалу волокна та характеристиками оптичних компонентів.

Важливо зазначити, що волоконно-оптичні канали практично не мають класичних електромагнітних перешкод, характерних для радіоканалів. Це дозволяє підтримувати високу стабільність параметрів каналу та забезпечує надійну передачу інформації. Водночас такі фактори, як загасання, дисперсія та нелінійні ефекти, стають ключовими при проектуванні довгих ліній зв'язку та систем з надвисокою швидкістю передачі даних.

Нелінійні ефекти в оптичному волокні, такі як самофазова модуляція, перехресна фазова модуляція та чотирихвильове змішування, можуть проявлятися при підвищених рівнях оптичної потужності. Зазначені явища призводять до спотворення спектру сигналу та взаємних перешкод між каналами в багатоканальних системах, що використовують мультиплексування довжин хвиль. Тому навіть за відсутності зовнішніх перешкод волоконно-оптичні канали можуть піддаватися внутрішнім спотворенням, що обмежують їх ефективну пропускну здатність.

Необхідно обов'язково враховувати вплив шуму, що виходить від оптичних підсилювачів, які використовуються для компенсації загасання сигналу на великих відстанях. Встановлено, що оптичні підсилювачі, особливо підсилювачі на основі ербієвого волокна, створюють додатковий шум, який накопичується вздовж шляху передачі. Це явище призводить до постійного зниження відношення сигнал/шум, тим самим встановлюючи максимально допустиму довжину волоконно-оптичної лінії без регенерації сигналу.

Очевидно, що, незважаючи на переважну пропускну здатність і стійкість до шуму волоконно-оптичних каналів зв'язку в порівнянні з бездротовими системами, необхідно застосовувати спеціальні методи оптимізації. Ці методи включають компенсацію дисперсії, оптимізацію спектральної компресії, вибір оптимальної потужності сигналу та використання сучасних алгоритмів цифрової обробки оптичних сигналів.

Отже, волоконно-оптичні канали зв'язку характеризуються як ефективністю, так і складністю з точки зору аналізу та оптимізації. Фізичні характеристики цих пристроїв породжують низку обмежень і викликів, які відрізняються від тих, що зазвичай асоціюються з бездротовими каналами. Розуміння цих розбіжностей є обов'язковою передумовою для подальших обговорень щодо оптимізації каналів зв'язку та вибору найефективніших технічних рішень, залежно від умов експлуатації та встановлених вимог до якості передачі інформації.

1.6 Порівняльний аналіз бездротових та оптоволоконних каналів зв’язку

Бездротові та волоконно-оптичні канали зв'язку - це два принципово різні підходи до організації передачі інформації в сучасних телекомунікаційних системах. Відмінності між цими категоріями визначаються фізичною природою середовища передачі, типом носія інформації, рівнем стійкості до перешкод, стабільністю параметрів та вимогами до інфраструктури. Порівняльний аналіз дозволяє систематизувати ці відмінності та обґрунтувати доцільність використання кожного типу каналу в конкретних умовах експлуатації.

Основна відмінність між бездротовими та волоконно-оптичними каналами зв'язку полягає в середовищі, через яке передається інформація. У бездротових каналах сигнал поширюється у відкритому просторі у вигляді електромагнітних радіохвиль, що робить його залежним від умов навколишнього середовища, наявності перешкод та рівня електромагнітних завад. У волоконно-оптичних каналах інформація передається у вигляді світлових імпульсів всередині оптичного волокна, яке є фізично ізольованим середовищем, що забезпечує стабільні параметри та мінімальні втрати сигналу.

Ключовою характеристикою каналів зв'язку є максимальна досяжна швидкість передачі та стабільність пропускної здатності. Доведено, що волоконно-оптичні канали забезпечують високу швидкість передачі інформації - до десятків і сотень гігабіт на секунду - і мінімальну залежність від кількості одночасних користувачів. Навпаки, у бездротових каналах швидкість передачі обмежується радіочастотним спектром і суттєво знижується в умовах перевантаження мережі або збільшення кількості активних абонентів.

Що стосується дальності передачі сигналу, волоконно-оптичні канали мають істотну перевагу. Передача світлових сигналів на значні відстані без необхідності регенерації робить такі канали придатними для використання в магістральних і розподільних мережах. У бездротових каналах дальність передачі обмежена

зоною покриття передавача, а рівень сигналу істотно знижується із збільшенням відстані.

Крім того, було виявлено значні відмінності в стійкості до перешкод. Очевидно, що волоконно-оптичні канали мають високий ступінь стійкості до електромагнітних перешкод, атмосферних впливів та індукції. Як наслідок, це забезпечує надійність і стабільність зв'язку. Навпаки, бездротові канали чутливі до зовнішніх перешкод, багатопроменевого поширення та інтерференції, що призводить до коливань рівня сигналу та погіршення якості зв'язку.

Водночас бездротові канали мають очевидні переваги з точки зору гнучкості розгортання та мобільності. Ці рішення сприяють швидкому створенню мережевої інфраструктури, усуваючи необхідність у кабельній інфраструктурі. Крім того, вони забезпечують мобільний доступ для користувачів. Розгортання волоконно-оптичних каналів вимагає більш складного проектування, процесу встановлення та значних початкових фінансових інвестицій. Однак ці витрати компенсуються чудовою продуктивністю та надійністю волоконно-оптичних систем.

Таблиця 1.2

Порівняння волоконно-оптичних та бездротових каналів зв’язку

Критерій порівняння	**Волоконно-оптичний канал зв’язку**	**Бездротовий канал зв’язку**
Принцип передавання інформації	Передавання даних у вигляді світлових імпульсів через оптичне волокно	Передавання даних за допомогою електромагнітних радіохвиль
Тип середовища	Фізичне середовище (оптичне волокно)	Відкритий простір
Максимальна швидкість передавання	Дуже висока, може досягати десятків Гбіт/с і більше	Теоретично висока, але на практиці нижча
Стабільність швидкості	Висока, майже не залежить від кількості користувачів	Знижується при збільшенні кількості користувачів
Вплив перевантаження мережі	Мінімальний	Значний
Дальність передавання сигналу	Дуже велика (десятки та сотні кілометрів без регенерації)	Обмежена зоною покриття

Волоконно-оптичні канали зв'язку широко використовуються в сучасних мережах доступу, особливо в пасивних оптичних мережах (PON). У таких мережах оптичне волокно використовується для передачі сигналів від центрального вузла оператора до значної кількості абонентів. Це досягається за допомогою пасивних оптичних розгалужувачів, які функціонують без необхідності живлення.

Однією з найпоширеніших реалізацій PON (пасивної оптичної мережі) є технологія GPON (гігабітної пасивної оптичної мережі), яка забезпечує швидкість передачі даних до 2,5 Гбіт/с у напрямку до абонента і до 1,25 Гбіт/с у зворотному напрямку. Впровадження GPON забезпечує значну пропускну здатність, надійні робочі параметри та ефективне використання оптичного волокна, що робить цю технологію основою сучасних мереж широкосмугового доступу.

Поєднання оптоволоконних магістральних мереж на основі PON/GPON з бездротовими каналами доступу сприяє створенню гібридних телекомунікаційних систем, поєднуючи високу надійність і пропускну здатність оптичних каналів з гнучкістю та мобільністю бездротових технологій.

Таким чином, порівняльний аналіз бездротових і волоконно-оптичних каналів зв'язку показує, що кожен з них призначений для виконання різних завдань у телекомунікаційних системах. Очевидно, що волоконно-оптичні канали забезпечують кращі характеристики з точки зору швидкості, стабільності та стійкості до перешкод. І навпаки, бездротові канали мають переваги з точки зору мобільності та швидкого розгортання. Інтеграція цих технологій, особливо у поєднанні з мережами PON (пасивна оптична мережа) та GPON (гігабітна пасивна оптична мережа), сприяє досягненню оптимального балансу між продуктивністю, надійністю та гнучкістю систем зв'язку.

1.7 Обмеження каналів зв’язку та передумови виникнення завад

Незважаючи на постійний розвиток телекомунікаційних технологій та вдосконалення технічних засобів передачі інформації, жоден канал зв'язку не

може забезпечити абсолютно ідеальні умови для поширення сигналу. Важливо зазначити, що справжні канали зв'язку завжди функціонують в межах певних обмежень, які диктуються фундаментальними фізичними принципами та особливостями, притаманними технічній реалізації телекомунікаційних систем. Ці обмеження є основною причиною перешкод та зниження якості передачі інформації.

Обмеження каналів зв'язку мають складний характер і проявляються на різних рівнях функціонування системи. Найпоширенішими обмеженнями є обмежена пропускна здатність, нестабільність параметрів каналу, шум, спотворення сигналу та затримки. Обговорювані обмеження впливають на ефективність передачі інформації, а отже, і на максимальні можливості каналу зв'язку з точки зору забезпечення необхідної якості прийому.

У контексті бездротових каналів зв'язку обмеження переважно пов'язані з особливостями поширення електромагнітних хвиль у відкритому просторі. Очевидно, що загасання сигналу, багатопроменеве поширення, перешкоди та коливання параметрів середовища передачі можуть призвести до значних коливань рівня сигналу на вході приймача. Крім того, обмежений радіочастотний спектр та висока щільність використання частотних ресурсів створюють додаткові умови для взаємних перешкод між різними каналами та системами зв'язку.

У дротових і, зокрема, волоконно-оптичних каналах зв'язку вплив зовнішніх електромагнітних перешкод значно менший. Однак слід зазначити, що існують й інші обмежувальні фактори, які необхідно враховувати. До них належать загасання сигналу в середовищі передачі, явища дисперсії, нелінійні ефекти та обмеження, пов'язані з технічними характеристиками передавального та приймального обладнання. Сукупний вплив цих факторів визначає максимальну дальність і швидкість передачі інформації та вимагає використання спеціальних технічних рішень для компенсації втрат і спотворень сигналу.

Виникнення перешкод у каналах зв'язку залежить від наявності шуму, який характеризується своєю фундаментальною фізичною природою. Тепловий шум від електронних компонентів, квантовий шум та інші випадкові процеси є

невід'ємною частиною будь-якої реальної телекомунікаційної системи. Незважаючи на повну відсутність зовнішніх перешкод, саме властиві процеси шуму визначають мінімальний рівень спотворення сигналу та обмежують досяжний коефіцієнт сигнал/шум.

Очевидно, що зовнішні фактори, пов'язані з навколишнім середовищем та роботою сторонніх технічних систем, також мають значний вплив на виникнення перешкод. У контексті бездротових каналів до факторів, які необхідно враховувати, належать електромагнітне випромінювання від інших радіоелектронних пристроїв, промислові перешкоди, атмосферні явища та природні фактори. В умовах інтенсивного використання радіочастотного спектра такі перешкоди стають одним з ключових факторів, що обмежують забезпечення стабільної якості зв'язку.

Окрему групу передумов для виникнення перешкод складають тимчасові та просторові зміни параметрів каналу зв'язку. Було доведено, що зміни положення передавача або приймача, коливання температури, механічні впливи та інші зовнішні фактори призводять до змін характеристик каналу. Такі зміни становлять проблему для підтримання стабільних методів передачі інформації, що вимагає впровадження адаптивних методів обробки сигналу та контролю параметрів каналу.

Важливим елементом у дослідженні обмежень каналу зв'язку є наявність теоретичних обмежень на передачу інформації, які визначаються принципами теорії інформації. Незважаючи на ідеальні технічні умови, максимальна досяжна швидкість передачі даних у каналі незмінно обмежується співвідношенням між пропускною здатністю та рівнем шуму. Було доведено, що наявність перешкод та шуму знижує інформаційну ефективність каналу. Це, у свою чергу, унеможливлює довільне збільшення швидкості передачі без погіршення якості прийому сигналу.

У практичних телекомунікаційних системах ці обмеження вимагають інженерних компромісів між швидкістю передачі інформації, стійкістю до шуму та складністю реалізації системи. Підвищення стійкості до шуму часто досягається за допомогою використання методів надлишкового кодування або

зменшення швидкості передачі, що безпосередньо впливає на ефективність використання каналу. І навпаки, виключна орієнтація на максимальну пропускну здатність без урахування факторів шуму може призвести до підвищення ймовірності помилок і нестабільності зв'язку.

Окрім фізичних та технічних обмежень, важливу роль відіграють обмеження, пов'язані з організацією та проектуванням телекомунікаційних систем. Очевидно, що недосконалість методів модуляції, кодування, синхронізації та управління ресурсами каналів може призвести до додаткової втрати інформації навіть у відносно сприятливих фізичних умовах передачі. У таких умовах можуть виникати перешкоди через саму структуру системи зв'язку.

Крім того, важливо визнати, що характер і ступінь обмежень каналів зв'язку залежать від типу переданої інформації та вимог до якості послуг. У контексті систем передачі даних у реальному часі, таких як відеоконференції, дистанційне керування та автоматизовані системи керування, затримки та їхня мінливість мають першочергове значення. Одночасно в контексті систем масової передачі даних та архівування інформації надзвичайне значення мають такі фактори, як пропускна здатність та надійність передачі. Це свідчить про те, що однакові обмеження каналу зв'язку можуть мати різну вагу залежно від конкретного застосування, що ще більше ускладнює процес проектування та оптимізації телекомунікаційних систем.

Очевидно, що обмеження каналів зв'язку та передумови для перешкод мають багатофакторний характер. Ці фактори визначають реальні можливості передачі інформації в телекомунікаційних системах. Необхідно зрозуміти природу цих обмежень та механізми перешкод, щоб створити теоретичну основу для розробки та застосування методів оптимізації каналів зв'язку за наявності системних перешкод, що буде розглянуто в наступному розділі цієї роботи.

У цьому контексті важливо підкреслити, що системні перешкоди не є випадковим явищем, а є природним наслідком взаємодії сигналу з елементами каналу зв'язку та навколишнім середовищем. Наявність цього явища визначається двома факторами: по-перше, фізичними властивостями середовища передачі, а по-

друге, конструктивними особливостями телекомунікаційного обладнання. Необхідно визнати, що системні перешкоди є невід'ємною частиною процесу передачі інформації, незалежно від технічної досконалості системи.

Важливо зазначити, що вплив перешкод може бути як короткостроковим, так і довгостроковим. У першому випадку перешкоди характеризуються виникненням імпульсних або тимчасових спотворень сигналу. У другому випадку перешкоди проявляються у вигляді постійного фонового шуму, що негативно впливає на якість каналу зв'язку. Неоднорідність цих проявів створює значні труднощі в їх виявленні та компенсації, що вимагає застосування різноманітних методів аналізу та обробки сигналів.

Крім того, характер системних перешкод може значно відрізнятися залежно від режимів роботи телекомунікаційної системи. Було доведено, що зміни швидкості передачі, пропускної здатності, типу модуляції або рівня потужності сигналу можуть призвести до ослаблення або посилення ефекту перешкод. Це відкриття свідчить про тісний зв'язок між параметрами сигналу та рівнем системних перешкод, що є фактором, який необхідно враховувати при аналізі роботи каналів зв'язку.

Проблема перешкод у багатоканальних і багатокористувацьких системах зв'язку є особливо складною. У таких системах взаємний вплив окремих каналів може призвести до додаткових спотворень, які не пов'язані безпосередньо з фізичним середовищем передачі. Очевидно, що якість передачі інформації може погіршуватися під впливом ряду факторів, включаючи, але не обмежуючись: перекриттям спектру, міжканальними перешкодами та обмеженою ізоляцією каналів.

Отже, аналіз обмежень каналів зв'язку неодмінно вимагає комплексного вивчення природи системних перешкод, їх класифікації та механізмів, за допомогою яких вони впливають на корисний сигнал. Без такого аналізу неможливо зробити обґрунтовану оцінку реальних можливостей телекомунікаційних систем або визначити напрямки їх подальшого вдосконалення. Саме системний підхід до розгляду перешкод дозволяє

сформувати цілісне уявлення про процеси передачі інформ Підсумовуючи, можна зробити висновок, що системні перешкоди створюють складне середовище втручання, яке, в свою чергу, визначає фактичні умови функціонування каналів комунікації. Вплив цих загроз проявляється у різних формах, включаючи фізичні спотворення сигналу, порушення алгоритмів обробки інформації, зниження ефективності використання ресурсів та ускладнення процесів управління передачею даних. Це підкреслює необхідність розглядати перешкоди не як спорадичні та не пов'язані між собою фактори, а як системне явище, що супроводжує процес передачі інформації на всіх етапах.

Крім того, широкий спектр джерел та форм системних перешкод вимагає їх чіткого розмежування та систематизації. Відсутність універсальної системи класифікації ускладнює аналіз каналів зв'язку та вибір відповідних методів оцінки їх якості. Необхідно застосовувати структурований підхід при дослідженні типів перешкод, їх походження та характеру впливу на сигнал, щоб полегшити комплексне та ретельне теоретичне дослідження в галузі телекомунікацій.

Необхідно провести ретельне дослідження системних перешкод, їх основних характеристик та класифікаційних атрибутів як передумову для подальшого аналізу якості передачі інформації в автентичних каналах зв'язку. Це дозволяє створити науково обґрунтовану основу для вивчення впливу перешкод на параметри каналів зв'язку, тим самим створюючи передумови для розробки ефективних методів підвищення надійності телекомунікаційних систем. У зв'язку з цим у наступному розділі буде розглянуто поняття системних перешкод та наведено їх класифікацію в реальних каналах зв'язку.

2 СИСТЕМНІ ЗАВАДИ В КАНАЛАХ ЗВ'ЯЗКУ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ЯКІСТЬ ПЕРЕДАВАННЯ

2.1 Поняття системних завад та їх класифікація

В автентичних телекомунікаційних системах процес поширення сигналу майже завжди відбувається в умовах наявності перешкод. Перешкоди є основним фактором, що сприяє погіршенню якості та надійності каналів зв'язку. Це пов'язано з спотворенням корисного сигналу, зниженням відношення сигнал/шум і збільшенням ймовірності помилок під час передачі інформації [11]. У зв'язку з цим вивчення природи перешкод і механізмів їх впливу на канал зв'язку є важливим завданням у галузі теорії та практики телекомунікацій.

Системний шум визначається як сукупність небажаних впливів, що виникають у каналі зв'язку або в елементах телекомунікаційної системи внаслідок її внутрішніх властивостей, конструктивних особливостей або взаємодії з іншими системами. Системні перешкоди зазвичай мають постійний або повторюваний характер і здатні протягом тривалого часу суттєво впливати на параметри каналу зв'язку. Вплив цього явища характеризується змінами амплітуди, фази та частотних характеристик сигналу, що ускладнює процеси його правильного прийому та відновлення.

Системні перешкоди можуть виникати на різних етапах процесу передачі інформації. До них належать формування сигналу з боку передавача, поширення сигналу через канал зв'язку, а також прийом сигналу та його подальша обробка. Багаторівневий характер перешкод вимагає детального аналізу та систематизації.

Залежно від джерела походження, системні збої можна класифікувати за кількома основними характеристиками. Переважна система класифікації базується на походженні системних збоїв, які поділяються на внутрішні та зовнішні (2.1). Явище внутрішнього системного втручання пов'язане з роботою самої телекомунікаційної системи. Таке втручання пов'язане з недосконалістю апаратного забезпечення, тепловим шумом електронних компонентів, помилками

синхронізації та нелінійними спотвореннями. Явище зовнішніх системних перешкод можна пов'язати з впливом навколишнього середовища або роботою технічних систем третіх сторін. Ці перешкоди найбільш очевидні в контексті бездротових каналів зв'язку.



Рис. 2.1 Класифікація системних завад у каналах зв’язку

За характером впливу на корисний сигнал системні завади поділяються на адитивні та мультиплікативні (2.2). Адитивні завади додаються до сигналу незалежно від його параметрів і зазвичай проявляються у вигляді шумів, що знижують відношення сигнал/шум. Мультиплікативні завади, у свою чергу, впливають на параметри самого сигналу, змінюючи його амплітуду, фазу або частоту. Такі завади є особливо небезпечними, оскільки вони ускладнюють процес демодуляції та можуть призводити до значних спотворень переданої інформації.

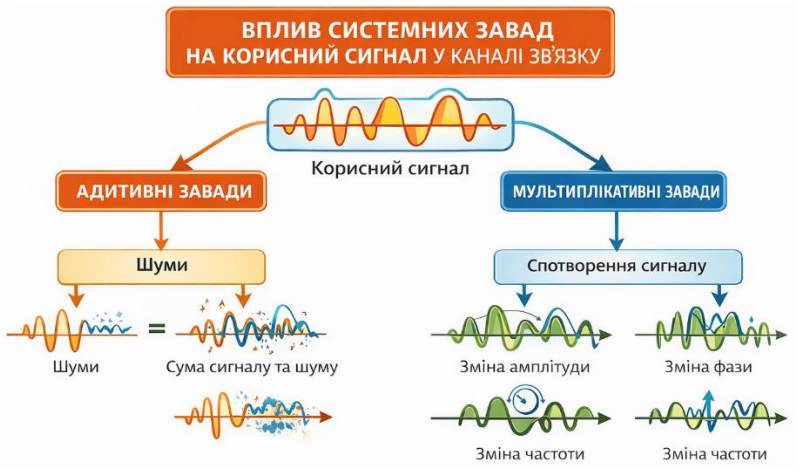


Рис. 2.2 Вплив системних завад на корисний сигнал у каналі зв’язку

Що стосується часових характеристик системних перешкод, то вони поділяються на дві окремі категорії: стаціонарні та нестаціонарні. Стаціонарні перешкоди відрізняються відносною стабільністю своїх статистичних параметрів у часі, що полегшує застосування традиційних методів їх аналізу та компенсації. Нестаціонарні перешкоди мають мінливі характеристики, які залежать від умов роботи каналу зв'язку. Отже, застосування адаптивних методів обробки сигналів є обов'язковим.

Важливою особливістю класифікації системних перешкод є їх спектральні властивості. Згідно з вищезазначеною особливістю, перешкоди можна розділити на дві окремі категорії: вузькосмугові та широкосмугові. Вузькосмугові перешкоди займають обмежену частину спектру і часто пов'язані з роботою конкретних технічних засобів або каналів зв'язку. Очевидно, що широкосмугові перешкоди охоплюють значну частину частотного діапазону, що може значно обмежити пропускну здатність каналу зв'язку.

Окрему групу складають системні перешкоди, спричинені взаємодією сигналів у багатоканальних телекомунікаційних системах. Такі перешкоди можна класифікувати як міжканальні спотворення або міжсимвольні спотворення. Перші виникають у результаті перекриття сигналів у часі, а другі - у результаті перекриття сигналів у частоті. Наявність цих елементів свідчить про системи, що характеризуються підвищеною швидкістю передачі даних і складною структурою сигналів.



Рис. 2.3 Вплив системних завад на корисний сигнал у каналі зв’язку

Таким чином, можна зробити висновок, що системні перешкоди є невід'ємною частиною справжніх каналів зв'язку і чинять різноманітний вплив на сигнал, тим самим знижуючи його ефективність. Система класифікації дозволяє глибше зрозуміти механізми виникнення перешкод, тим самим створюючи теоретичну основу для подальшого аналізу їх впливу на параметри каналів зв'язку та розробки методів оптимізації, які розглядаються в наступних підрозділах цього розділу.

Таким чином, аналіз системних перешкод свідчить про їх комплексний і багатовимірний характер, який визначає реальні умови функціонування каналів зв’язку. На відміну від ідеалізованих теоретичних моделей, у практичних телекомунікаційних системах вплив завад проявляється одночасно в часовій, частотній та амплітудній областях, що суттєво ускладнює процеси формування, передавання та відновлення корисного сигналу. Саме наявність системних перешкод обмежує досяжні показники якості зв’язку та визначає граничні можливості використання каналу в конкретних умовах експлуатації.

Побудована класифікація системних перешкод дозволяє не лише впорядкувати їх різновиди, а й встановити причинно-наслідкові зв’язки між джерелами завад і характером їх впливу на сигнал. Це є важливим етапом у формуванні наукового підходу до аналізу каналів зв’язку, оскільки правильна ідентифікація типу перешкоди безпосередньо впливає на вибір методів її компенсації або мінімізації. Зокрема, для стаціонарних адитивних завад доцільним є застосування класичних методів фільтрації, тоді як нестаціонарні мультиплікативні спотворення потребують використання адаптивних алгоритмів обробки сигналів.

У сучасних телекомунікаційних системах актуальність дослідження системних перешкод зростає у зв’язку з тенденцією до підвищення швидкостей передачі даних та зменшення тривалості елементарних сигналів. За таких умов навіть незначні часові або фазові спотворення можуть призводити до суттєвого зростання міжсимвольної інтерференції та деградації якості приймання. Це

особливо характерно для цифрових систем із високими порядками модуляції, де щільність інформації в сигнальному просторі є максимальною.

Окрему увагу слід приділити тому, що вплив системних перешкод не обмежується лише фізичним рівнем телекомунікаційної системи. Погіршення параметрів сигналу на фізичному рівні призводить до каскадного ефекту, який відображається на роботі протоколів канального та мережевого рівнів. Зростання кількості помилок передачі спричиняє повторну передачу кадрів, збільшення затримок та зниження ефективної пропускної здатності, що негативно впливає на якість обслуговування користувачів.

Крім того, системні перешкоди істотно ускладнюють процеси планування та оптимізації телекомунікаційних мереж. У реальних умовах параметри каналу можуть змінюватися в часі під впливом як внутрішніх, так і зовнішніх факторів, що вимагає постійного моніторингу стану каналу та динамічної адаптації параметрів передавання. Це зумовлює необхідність використання інтелектуальних систем управління та алгоритмів самоорганізації, які здатні реагувати на зміну рівня завад у режимі реального часу.

Важливим аспектом дослідження системних перешкод є також їх вплив на енергетичну ефективність телекомунікаційних систем. З метою компенсації завад часто застосовується підвищення потужності передавання або використання надлишкового кодування, що призводить до зростання енергоспоживання та зниження загальної ефективності системи. В умовах обмежених енергетичних ресурсів, зокрема в мобільних та автономних системах, ця проблема набуває особливої актуальності.

Отже, системні перешкоди слід розглядати як один із визначальних факторів, що формує вимоги до архітектури, алгоритмів обробки сигналів та режимів роботи сучасних каналів зв’язку. Усвідомлення їх ролі та характеру впливу створює необхідні передумови для переходу від описового аналізу до кількісного оцінювання параметрів каналу та розробки практичних методів оптимізації. Подальший розгляд цих методів дозволить обґрунтувати підходи до підвищення стійкості каналів зв’язку в умовах дії системних завад і шумів.

2.2 Фоновий шум та внутрішні завади приймально-передавальних систем

Функціонування будь-якої телекомунікаційної системи супроводжується шумом і внутрішніми перешкодами, які істотно впливають на якість передачі інформації. На відміну від явища зовнішніх перешкод, джерела яких знаходяться за межами комунікаційної системи, фоновий шум і внутрішні перешкоди генеруються безпосередньо в приймальних і передавальних пристроях і є невід'ємною частиною їх апаратної реалізації [12]. Саме ці фактори визначають межі системи з точки зору забезпечення необхідного відношення сигнал/шум і прийнятної ймовірності помилки. Фоновий шум визначається як сукупність випадкових коливань електричних або оптичних сигналів, які присутні в системі навіть при повній відсутності корисного сигналу. Розглянуте явище має стохастичний характер і викликане фундаментальними фізичними процесами, що відбуваються в елементах приймального та передавального трактів. Наявність фонового шуму диктує мінімальний рівень спотворення, при якому стає неможливим зменшити ефект перешкод, незалежно від використовуваних технічних рішень.

Основним джерелом фонового шуму в електронних системах є тепловий шум, який виникає внаслідок теплового руху носіїв заряду в провідниках і напівпровідникових елементах. Тепловий шум є властивою характеристикою резисторів, підсилювачів, фільтрів та інших компонентів, і його прояв залежить від таких факторів, як температура, пропускна здатність і параметри електричного кола. Цей ефект є універсальним і характерним для всіх типів каналів зв'язку.

Окрім теплового шуму, в системах прийому та передачі присутні й інші внутрішні процеси шуму, включаючи імпульсний шум та мерехтливий шум. Розсіяний шум є наслідком дискретного характеру електричного заряду і проявляється в напівпровідникових та оптоелектронних пристроях. Мерехтливий шум є характерною особливістю низькочастотного діапазону і пов'язаний з

технологічними особливостями виробництва електронних компонентів. Сукупний вплив цих шумів формує рівень фонового шуму системи.

Явище внутрішніх перешкод у системах прийому та передачі є більш складним і, на відміну від фонового шуму, часто залежить від режимів роботи обладнання. Такі перешкоди можна класифікувати наступним чином: нелінійні спотворення, фазовий шум генераторів, нестабільність опорних частот та помилки синхронізації. Нелінійність каскадів підсилювачів і модуляторів призводить до появи додаткових спектральних компонентів, які можуть перекривати корисний сигнал, погіршуючи тим самим умови його прийому.

Вплив фазового шуму генератора на якість передачі інформації має особливе значення. Ці випадкові коливання спричиняють зміни фази та частоти сигналу, тим самим заважаючи процесу синхронізації між передавальною та приймальною сторонами системи. У системах, що характеризуються високою швидкістю передачі даних, такі перешкоди можуть значно збільшити ймовірність помилок та знизити ефективність використання пропускної здатності. Крім того, було доведено, що наявність фазового шуму має згубний вплив на роботу когерентних алгоритмів прийому та демодуляції. Ці алгоритми вимагають високого ступеня точності для відновлення фази опорного сигналу. Як наслідок, зростають вимоги до стабільності генератора та складності схем синхронізації, що безпосередньо впливає на вартість та енергоспоживання телекомунікаційної системи.

У волоконно-оптичних системах зв'язку внутрішні перешкоди також відіграють важливу роль, незважаючи на високу стійкість таких каналів до зовнішніх електромагнітних впливів. Очевидно, що внутрішні перешкоди можуть бути спричинені низкою факторів. До таких факторів належать, зокрема, шум, що випромінюється джерелами лазерного випромінювання, фотодетекторами та підсилювальними елементами. Крім того, квантовий шум, пов'язаний з дискретним характером світлового випромінювання, був визначений як потенційна причина перешкод. Ці фактори обмежують чутливість приймачів і,

таким чином, визначають обмежувальні параметри волоконно-оптичних каналів зв'язку.

Для того щоб надати стислий огляд відмінностей між фоновим шумом і внутрішніми перешкодами в системах приймачів-передавачів, рекомендується провести порівняльний аналіз їх основних характеристик (2.1).

Таблиця 2.1

Порівняння фонового шуму та внутрішніх завад

Ознака порівняння	**Фоновий шум**	**Внутрішні завади**
Природа виникнення	Фундаментальні фізичні процеси	Особливості апаратної реалізації
Залежність від сигналу	Не залежить від корисного сигналу	Може залежати від режимів роботи
Часовий характер	Випадковий, стохастичний	Може мати систематичний характер
Можливість усунення	Неусувний, лише зменшується	Частково компенсується
Основні джерела	Теплові, квантові шуми	Нелінійності, фазові шуми
Вплив на якість зв’язку	Знижує відношення сигнал/шум	Викликає спотворення сигналу
Залежність від температури	Висока	Помірна
Тип каналів	Усі типи каналів	Залежить від типу системи

Характерною особливістю фонового шуму та внутрішніх перешкод є їх постійна присутність у телекомунікаційних системах, що унеможливлює їх повне усунення. Незважаючи на використання сучасних технологій та високоякісних компонентів, вплив цих явищ можна пом'якшити шляхом впровадження оптимальної конструкції системи, вибору режимів роботи та застосування спеціалізованих методів обробки сигналів.

Очевидно, що якість каналів зв'язку в основному обмежується фоновим шумом і внутрішніми перешкодами в системах прийому та передачі. Необхідною умовою для подальшого аналізу зовнішніх перешкод і розробки методів

оптимізації каналів зв'язку в умовах системних перешкод, що є предметом наступного розділу, є розуміння їх природи та механізмів впливу.

Необхідно підкреслити, що вплив фонового шуму та внутрішніх перешкод не є постійним у часі і може змінюватися залежно від умов експлуатації телекомунікаційної системи. Важливо зазначити, що навіть в межах однієї апаратної платформи існує ймовірність коливань параметрів шуму. Такі коливання можуть бути пов'язані зі змінами температури, старінням компонентів, нестабільним електроживленням або коливаннями навантаження. Це ускладнює процес прогнозування характеристик каналу і вимагає застосування методів статистичного аналізу при проектуванні систем зв'язку.

Крім того, наявність фонового шуму і внутрішніх перешкод часто призводить до взаємодії цих двох факторів, що створює багатогранне середовище перешкод. Щоб проілюструвати це, розглянемо випадок нелінійних спотворень, що відбуваються в каскадах підсилювача. Такі спотворення можуть призвести до розширення компонентів шуму в спектрі, що, в свою чергу, призведе до погіршення селективності приймального каналу. У таких випадках навіть незначне збільшення фонового шуму може мати непропорційно великий негативний вплив на якість прийнятого сигналу.

Роль внутрішніх перешкод у багатоканальних і багатокористувацьких системах зв'язку заслуговує на особливу увагу. У таких системах взаємний вплив окремих каналів може призвести до додаткових внутрішніх перешкод, пов'язаних з недосконалою ізоляцією каналів, перехресними спотвореннями та обмеженою динамікою апаратного забезпечення. Це характерна риса сучасних систем, що демонструють високу спектральну ефективність, в яких використовується щільне частотне або часове мультиплексування.

У контексті цифрових телекомунікаційних систем вплив фонового шуму та внутрішніх перешкод характеризується двома основними явищами. По-перше, збільшується ймовірність бітових помилок. По-друге, погіршується стабільність алгоритмів синхронізації, вирівнювання та виправлення помилок. Зокрема, було доведено, що фазовий шум від генераторів призводить до нестабільної роботи

когерентних приймальних схем, що значно ускладнює використання високоефективних методів модуляції. Як наслідок, система змушена переходити на більш стабільні, але менш продуктивні режими роботи.

Важливо також зазначити, що внутрішні перешкоди визначають мінімальний досяжний рівень якості каналу зв'язку, навіть за відсутності зовнішніх перешкод. Це вказує на наявність внутрішньої межі, за якою неможливо зменшити рівень спотворення сигналу, незалежно від умов навколишнього середовища. Отже, при проектуванні телекомунікаційних систем необхідно враховувати не тільки зовнішні фактори, але й внутрішні обмеження апаратної реалізації.

Таким чином, можна зробити висновок, що фоновий шум і внутрішні перешкоди відіграють ключову роль у формуванні характеристик каналу зв'язку та визначенні його обмежень. Для розробки ефективних методів аналізу та оптимізації телекомунікаційних систем необхідне детальне дослідження. У наступних розділах рекомендується зосередитися на вивченні зовнішніх перешкод та їх впливу на канали зв'язку, а також на розгляді сучасних підходів до зменшення загального впливу перешкод з метою підвищення надійності та ефективності передачі інформації.

2.3 Багатопроменевість та інтерференція сигналів

Відмінною рисою автентичних каналів зв'язку, особливо тих, що працюють за допомогою бездротових засобів, є багатопроменеве поширення сигналів. Це явище виникає, коли електромагнітна хвиля проходить від передавача до приймача не по одному шляху, а по декількох траєкторіях, що утворюються в результаті відбиття, дифракції та розсіювання сигналу на об'єктах навколишнього середовища [16]. Як наслідок, приймач не отримує єдину «копію» сигналу, а отримує набір сигналів, кожен з яких має унікальну затримку та зсув фази. Такий сценарій призводить до спотворення сигналу, що є значним фактором, який сприяє погіршенню якості передачі інформації.

Багатопроменеве поширення - це явище, яке виникає в умовах, коли на шляху поширення сигналу є перешкоди, неоднорідності середовища та відбивні поверхні (2.4). У міських районах, будівлях або на складній місцевості багатопроменеве поширення є особливо вираженим через велику кількість можливих шляхів поширення хвиль [13]. Важливо зазначити, що амплітуда кожної копії сигналу може змінюватися залежно від втрат, що виникають на шляху поширення. Крім того, фаза та час прибуття цих копій також можуть відрізнятися.

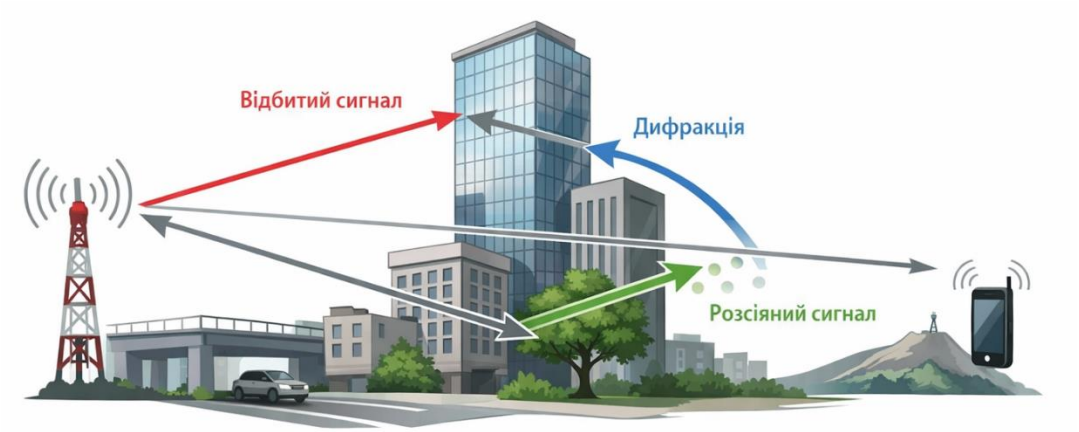


Рис. 2.4 Схема багатопроменевого поширення сигналу

Наявність декількох копій сигналу в точці прийому безпосередньо пов'язана з явищем інтерференції. Явище інтерференції сигналу можна визначити як процес накладення електромагнітних хвиль, що в результаті призводить до посилення або ослаблення сигналу на вході приймача. У разі надходження сигналів у фазі відбувається конструктивна інтерференція, що призводить до збільшення амплітуди [14]. У разі надходження копій сигналу поза фазою відбувається деструктивна інтерференція, яка може значно знизити рівень прийнятого сигналу, навіть до «падіння» рівня.

У реальних умовах картина інтерференції є змінною через її залежність від геометрії навколишнього середовища, руху об'єктів, змін положення передавача або приймача та коливань параметрів навколишнього середовища. Це явище називається «затуханням», при якому рівень сигналу в точці прийому змінюється з часом або залежно від положення приймача. Затухання вважається одним з найкритичніших проявів багатопроменевого поширення, оскільки воно може

спричинити різке погіршення якості зв'язку навіть при відносно стабільній потужності передавача (2.5).



Рис. 2.5 Приклад завмирань сигналу

Іншим важливим наслідком багатопроменевого поширення є виникнення часових затримок між копіями сигналу, що надходять до приймача. У разі незначних затримок приймач може інтерпретувати загальний сигнал як спотворену версію корисного сигналу. У разі значних затримок існує ймовірність часткового перекриття копій сигналу з сусідніми елементами передачі інформації (наприклад, імпульсами або символами), що призводить до міжсимвольної інтерференції. Така інтерференція становить значну загрозу для цілісності цифрових систем зв'язку, враховуючи її здатність підвищувати ймовірність помилок і порушувати стабільність прийому.

Вплив багатопроменевості та інтерференції на параметри сигналу виходить за межі звичайних параметрів амплітуди, охоплюючи спектральні характеристики сигналу. Важливо зазначити, що через рух об'єктів або зміни траєкторій поширення можуть відбуватися доплерівські зсуви частоти. Це, в свою чергу, ще більше ускладнює процес прийому та синхронізації. Тому ефекти багатопроменевості є за своєю суттю складними явищами, що призводять до складних і мінливих у часі умов передачі сигналу.

Важливо зазначити, що багатопроменевість не завжди має шкідливий вплив; за допомогою відповідної технічної стратегії її можна використовувати як

додаткове джерело інформації або енергії сигналу. Однак у базовому випадку багатопроменевість та пов'язані з нею перешкоди вважаються значними факторами перешкод, які погіршують якість передачі та ускладнюють забезпечення стабільної комунікації.

Очевидно, що багатопроменевість і перешкоди сигналу є ключовими механізмами виникнення системних перешкод у каналах зв'язку. Доведено, що ці явища призводять до згасання, спотворення часу та погіршення відношення сигнал/шум. Це, в свою чергу, безпосередньо впливає на ймовірність помилок і пропускну здатність каналу. Необхідною умовою для подальшого аналізу впливу системних перешкод на показники якості каналу зв'язку, як обговорюється в наступному розділі, є розуміння природи ефектів багатопроменевості та перешкод.

Важливо також зазначити, що характер багатопроменевого поширення значною мірою залежить від співвідношення між тривалістю елементарних сигналів і величиною часових затримок між окремими копіями сигналу. У системах, що характеризуються низькою швидкістю передачі даних, ефект міжсимвольної інтерференції може бути менш вираженим. І навпаки, у високошвидкісних цифрових системах навіть незначні затримки можуть призвести до значного перекриття символів. Це робить багатопроменевість одним з основних факторів, що перешкоджають підвищенню швидкості передачі інформації в бездротових каналах.

Крім того, багатопроменеве поширення сигналу тісно пов'язане з просторовими характеристиками каналу зв'язку. Було доведено, що незначні зміни положення приймача або передавача можуть призвести до істотних змін амплітуди та фази прийнятого сигналу через зміни умов інтерференції. Отже, в обмеженій просторовій області можуть бути зони значного затухання та зони поліпшеного прийому сигналу. Було доведено, що просторова та часова мінливість параметрів каналу має значний вплив на стабільність якості зв'язку.

Важливо також підкреслити, що ефекти багатопроменевого поширення можуть проявлятися по-різному залежно від діапазону частот системи. У системах, що працюють на високих частотах, довжина хвилі зменшується, що

збільшує чутливість сигналу до незначних неоднорідностей у навколишньому середовищі та об'єктах відбиття. Це явище призводить до прискорених коливань рівня сигналу та підвищених вимог до методів синхронізації та обробки сигналу.

Отже, поширення багатопроменевих сигналів слід розглядати як багатогранне явище, на яке впливають численні фактори, що визначають умови бездротових каналів зв'язку. Вплив цього явища проявляється в ряді областей, включаючи часову, частотну та просторову, і створює складне середовище перешкод. Необхідно визнати ці особливості як передумову для проведення подальшого аналізу перешкод у системі та оцінки їх впливу на якість передачі інформації в реальних каналах зв'язку.

2.4 Вплив системних завад на якісні показники каналу зв’язку

Показники якості каналу зв'язку є визначальними характеристиками, що відображають здатність телекомунікаційної системи забезпечувати надійну та ефективну передачу інформації. У реальних умовах експлуатації ці показники значною мірою залежать від наявності та інтенсивності системних перешкод, що обмежує можливості каналу зв'язку та ускладнює процес прийому корисного сигналу [15]. Оцінка ефективності телекомунікаційних систем вимагає аналізу впливу системних перешкод на параметри якості каналу.

Відношення сигнал/шум є ключовим показником якості каналу зв'язку (2.6). Воно визначається як відношення потужності корисного сигналу до сумарної потужності шуму та перешкод. Доведено, що системний шум призводить до збільшення фонового шуму, тим самим знижуючи значення цього показника. Зі зменшенням відношення сигнал/шум погіршуються умови прийому, збільшується ймовірність помилкового розпізнавання переданих символів і зменшується стійкість системи до додаткових перешкод.

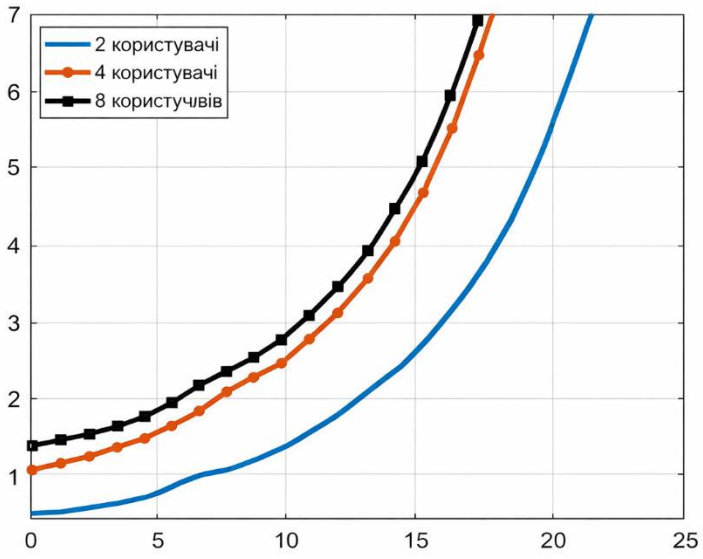


Рис. 2.6 Вплив рівня системних завад на відношення сигнал/шум у каналі зв’язку

Важливим наслідком системних перешкод є підвищена ймовірність помилок при передачі інформації. Адитивні шуми, перешкоди та ефекти багатопроменевого поширення призводять до спотворення сигналу, що ускладнює процес демодуляції та декодування. Цифрові системи зв'язку особливо чутливі до таких впливів, в яких навіть незначні відхилення в параметрах сигналу можуть спричинити помилки в отриманих послідовностях бітів або символів.

Очевидно, що системний шум безпосередньо впливає на пропускну здатність каналу зв'язку. Щоб підтримувати прийнятний рівень помилок в умовах шуму, часто доводиться знижувати швидкість передачі інформації, використовувати більш стійкі до шуму, але менш ефективні методи модуляції або застосовувати схеми надлишкового кодування. Як наслідок, ефективна пропускна здатність каналу зменшується, що обмежує здатність системи передавати значні обсяги даних.

Іншим важливим показником якості каналу зв'язку є затримка передачі інформації. При наявності системного шуму збільшується ймовірність повторної передачі даних, буферизації та застосування більш складних алгоритмів обробки сигналу. Було доведено, що зазначені фактори призводять до збільшення загальної затримки, що може бути особливо проблематичним для систем реального часу, таких як системи управління, передача відео та дистанційне керування.

Очевидно, що системні перешкоди мають значний вплив на стабільність параметрів каналу зв'язку в часі. Було доведено, що коливання рівня сигналу, затухання та зміни спектральних характеристик призводять до нестабільності показників якості. У таких умовах забезпечення стабільних характеристик каналу є складним завданням і вимагає використання адаптивних механізмів для контролю параметрів передачі інформації.

Важливо зазначити, що різні типи системних перешкод по-різному впливають на показники якості каналу зв'язку. Для узагальнення цього ефекту доцільно провести порівняльний аналіз основних типів перешкод та характеру їх впливу на ключові параметри каналу.

У бездротових каналах зв'язку вплив системних перешкод на показники якості є особливо вираженим через відкритість середовища передачі та мінливість умов поширення сигналу. У контексті дротових та волоконно-оптичних каналів умови характеризуються підвищеною стабільністю. Однак наявність внутрішнього шуму, дисперсії та нелінійних ефектів накладає обмеження на досягнення оптимальних показників якості.

Необхідно визнати взаємопов'язаність показників якості каналів зв'язку. Важливо зазначити, що поліпшення одного аспекту системи часто призводить до погіршення іншого. Ця взаємозалежність ускладнює процес проектування та оптимізації телекомунікаційних систем і вимагає пошуку компромісних рішень.

Очевидно, що системні перешкоди мають багатогранний вплив на показники якості каналів зв'язку. Ці перешкоди можуть знижувати відношення сигнал/шум, збільшувати ймовірність виникнення помилок, накладати обмеження на пропускну здатність і подовжувати тривалість передачі інформації. Теоретичні основи аналізу характеристик перешкод у конкретних системах бездротового зв'язку будуть розглянуті в наступному підрозділі, і цей аналіз базується на розумінні природи впливу.

Необхідно провести додатковий аналіз для визначення впливу системних перешкод на показники якості каналів зв'язку. Цей аналіз повинен враховувати особливості конкретних телекомунікаційних технологій та умови їх застосування.

У практичних системах зв'язку параметри каналу піддаються динамічним змінам, що робить фіксовані налаштування для передачі інформації непрактичними і вимагає постійної оцінки поточного стану каналу. У таких умовах ключову роль відіграють методи адаптивного управління, що дозволяють регулювати параметри модуляції, кодування та потужності сигналу відповідно до рівня системних перешкод.

Ця проблема є особливо актуальною в сучасних бездротових мережах, де необхідно гарантувати надійну якість зв'язку для значної кількості абонентів з обмеженими спектральними ресурсами. У таких системах навіть короткочасне погіршення якості каналу може призвести до втрати з'єднання або значного зниження якості послуг. Впровадження ефективних механізмів моніторингу та прогнозування впливу системних перешкод є надзвичайно важливим.

Крім того, оцінка показників якості каналу зв'язку є обов'язковою для проектування та модернізації телекомунікаційних систем. У даному дослідженні аналізується взаємозв'язок між рівнем системних перешкод та параметрами якості. Цей аналіз дозволяє визначити критичні режими роботи системи. Доведено, що подальше збільшення навантаження або швидкості передачі даних стає недоцільним у цих режимах роботи. Отримані результати можуть бути використані для вибору оптимальної архітектури системи та обґрунтування технічних рішень.

Отже, вплив системних перешкод на показники якості каналів зв'язку повинен бути ретельно досліджений як фундаментальний компонент комплексного аналізу телекомунікаційних систем. Це сприяє розробці математичних моделей каналів зв'язку та методів їх оптимізації, що дозволяє підвищити надійність і ефективність передачі інформації в умовах реальних перешкод. У наступному розділі будуть розглянуті теоретичні підходи до моделювання каналів зв'язку з урахуванням впливу системних перешкод і шуму.

2.5 Особливості прояву завад у бездротових системах зв’язку

Бездротові системи зв'язку характеризуються підвищеною чутливістю до перешкод у середовищі передачі, що пояснюється відкритим характером системи та складністю умов поширення сигналу. На відміну від дротових каналів, поширення корисного сигналу в бездротових системах відбувається у вільному просторі. Цей сигнал піддається впливу різних зовнішніх і внутрішніх факторів, що призводить до спотворень, нестабільності параметрів каналу та зниження якості передачі інформації [17]. Щоб проілюструвати характеристики системних перешкод у бездротових системах, доцільно розглянути системи FPV, які наочно демонструють вплив факторів перешкод у реальному часі.

Функціональність систем FPV базується на бездротовій передачі відео з мінімальною затримкою, а стабільність каналу зв'язку є критичним фактором їхньої роботи. У таких системах будь-які перешкоди безпосередньо впливають на якість зображення та безперервність передачі сигналу (2.7). Саме тому системи FPV є зручним прикладом для аналізу прояву системних перешкод у бездротових каналах зв'язку без заглиблення в конкретні аспекти застосування.



Рис. 2.7 Приклад спотворення відеосигналу в FPV-системі під впливом завад

Погіршення якості зв'язку в системах FPV в першу чергу пов'язане з багатопроменевим поширенням сигналу і супутніми перешкодами. У складних умовах сигнал може досягати приймача по декількох шляхах, що призводить до накладення копій сигналу з різними фазовими зсувами і часовими затримками.

Наслідком цього явища є прояв декількох проблем, включаючи, але не обмежуючись, згасання, коливання рівня сигналу та характерне спотворення відеозображення. Такі ефекти характерні для більшості бездротових систем і значно впливають на нестабільність параметрів каналу зв'язку.

Також було доведено, що перешкоди від інших радіоелектронних пристроїв мають значний вплив на якість передачі інформації в системах FPV. Використання спільних або суміжних частотних діапазонів призводить до взаємних перешкод між сигналами, що особливо помітно в умовах інтенсивного використання радіочастотного спектра. Це ще більше ускладнюється обмеженою потужністю передавачів, що призводить до зниження відношення сигнал/шум і відповідного зниження надійності зв'язку.

Одночасно з цим, в контексті впровадження систем FPV, досліджуються альтернативні підходи до організації каналу зв'язку. Одним із найцікавіших підходів є використання волоконно-оптичного каналу для передачі інформації. На відміну від бездротового радіоканалу, волоконно-оптичний канал є фізично обмеженим середовищем, що ефективно усуває вплив більшості зовнішніх системних перешкод. Це дозволяє порівняти характеристики перешкод у системах FPV з характеристиками бездротових та волоконно-оптичних каналів зв'язку, а також оцінити фундаментальні відмінності між цими підходами.

Крім того, застосування волоконно-оптичного каналу в системах FPV дозволяє суттєво знизити залежність якості зв’язку від радіочастотного середовища та умов електромагнітної обстановки. Відсутність радіовипромінювання під час передавання сигналу усуває проблему взаємних завад із іншими радіоелектронними засобами, а також робить канал нечутливим до багатопроменевості, інтерференції та атмосферних факторів. Це створює принципово інші умови функціонування системи FPV, за яких якісні показники каналу зв’язку визначаються переважно фізичними властивостями оптичного волокна та характеристиками приймально-передавального обладнання, а не випадковими змінами зовнішнього середовища. Саме ця відмінність робить доцільним подальший порівняльний аналіз радіоканалів і волоконно-оптичних

каналів у контексті забезпечення надійного керування та передавання відеоінформації в системах FPV (2.2).

Таблиця 2.2

Порівняння прояву системних завад у FPV-системах з бездротовим та оптоволоконним каналами зв’язку

Ознака порівняння	**FPV із бездротовим каналом зв’язку**	**FPV з оптоволоконним каналом зв’язку**
Тип каналу	Відкритий радіоканал	Закритий провідний канал
Чутливість до зовнішніх завад	Висока	Практично відсутня
Вплив електромагнітних завад	Значний	Відсутній
Фоновий шум	Значний при великих відстанях	Мінімальний
Внутрішні завади	Обмежують якість сигналу	Менш критичні
Стабільність параметрів каналу	Низька, змінна в часі	Висока, практично постійна
Залежність від просторового положення	Критична	Відсутня
Затримка передавання	Змінна	Стабільна

Це порівняння демонструє, що основні проблеми, пов'язані з передачею інформації в системах FPV, які використовують бездротові канали зв'язку, переважно спричинені впливом системного шуму, багатопроменевого поширення сигналу та зовнішніх радіочастотних перешкод. У таких умовах якість зв'язку залежить від електромагнітного середовища, просторового розташування передавача та приймача, а також щільності використання радіочастотного спектру. Як наслідок, відбуваються коливання рівня сигналу, знижується відношення сигнал/шум і збільшується ймовірність помилок під час передачі відео та контрольної інформації, що є критично важливим для стабільної роботи систем FPV.

Використання волоконно-оптичного каналу зв'язку дозволяє усунути або значно мінімізувати більшість цих несприятливих факторів. Середовище передачі

характеризується фізичними обмеженнями, які практично усувають вплив зовнішніх електромагнітних перешкод, ефектів багатопроменевого поширення та перешкод від інших радіоелектронних пристроїв. Це забезпечує значно вищий рівень стабільності параметрів каналу, передбачуваність його характеристик у часі та поліпшену якість передачі сигналу, що особливо важливо для систем реального часу, включаючи системи FPV.

Порівняння систем FPV, що використовують бездротові та волоконно-оптичні канали зв'язку, наочно ілюструє фундаментальну різницю в характері впливу системних факторів шуму та перешкод. У бездротових системах шум і перешкоди мають переважно стохастичний і змінний характер, тоді як у волоконно-оптичних системах вони визначаються головним чином внутрішніми фізичними обмеженнями елементів каналу та параметрами оптичного обладнання. Це призводить до істотних розбіжностей у відношенні сигнал/шум, ймовірності помилки та загальній надійності каналу зв'язку.

Комплексний аналіз цих характеристик показує, що вибір типу каналу зв'язку має істотний вплив на показники якості систем FPV.

3 МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ЗВ’ЯЗКУ В УМОВАХ СИСТЕМНИХ ЗАВАД

3.1 Загальні підходи до оптимізації каналів зв’язку

У контексті сучасних телекомунікаційних систем оптимізація каналів зв'язку в умовах системних перешкод є надзвичайно важливим завданням. Як було продемонстровано в попередньому розділі, фоновий шум, внутрішні перешкоди, багатопроменевість та інтерференція мають значний вплив на показники якості каналу зв'язку, тим самим знижуючи відношення сигнал/шум, пропускну здатність та стабільність передачі інформації. Це вимагає впровадження спеціалізованих підходів та методологій, спрямованих на пом'якшення негативних наслідків перешкод та оптимізацію ефективності використання каналів зв'язку.

Оптимізація каналу зв'язку визначається як процес вибору, конфігурації та адаптації параметрів системи передачі інформації з метою досягнення найвищих можливих показників якості за заданих умов перешкод. Основні параметри, що потребують оптимізації, включають силу сигналу, швидкість передачі даних, пропускну здатність, методи модуляції та режими роботи приймально-передавального обладнання. Важливою особливістю оптимізації є її компромісний характер, оскільки поліпшення одного показника часто призводить до погіршення іншого.

Можна запропонувати класифікацію загальних підходів до оптимізації каналів зв'язку, які можна розділити на такі категорії: апаратні, сигнальні та системні підходи (3.1). Ця класифікація полегшує систематичний огляд основних напрямків підвищення стійкості каналів зв'язку до перешкод та оцінки їх можливостей і обмежень. Ефективність і сфера застосування кожного з цих підходів залежать від типу каналу зв'язку та умов експлуатації.

Апаратні підходи до оптимізації передбачають вдосконалення фізичних компонентів телекомунікаційної системи. Ці заходи включають інтеграцію компонентів, що мають кращі характеристики шуму, тим самим підвищуючи чутливість приймачів. Крім того, вони передбачають оптимізацію антенних

систем та зменшення власного шуму обладнання. Доведено, що такі заходи зменшують внутрішні перешкоди та покращують базову якість каналу. Однак вони зазвичай пов'язані зі збільшенням вартості та складності впровадження системи.

Підходи, засновані на сигналах, базуються на методологіях обробки сигналів і не вимагають істотних модифікацій апаратного забезпечення. Ці методи включають використання фільтрації, компенсації перешкод, адаптації параметрів сигналу та вибір методів модуляції та кодування, стійких до перешкод. Основною перевагою підходів, заснованих на сигналах, є їх гнучкість і здатність адаптуватися до мінливих умов каналу зв'язку, що є особливо важливою особливістю в контексті бездротових систем.

Системні підходи до оптимізації каналів зв'язку мають комплексний характер і охоплюють управління всією телекомунікаційною системою. Вони включають адаптацію швидкості передачі, регулювання потужності сигналу, використання протоколів повторної передачі та резервування ресурсів. Такі методи дозволяють підтримувати прийнятний рівень якості зв'язку навіть за наявності значних системних перешкод. Однак вони можуть призвести до збільшення затримок і зниження ефективної пропускної здатності.



Рис. 3.1 Класифікація основних підходів до оптимізації каналів зв’язку

Для узагальнення особливостей різних підходів до оптимізації каналів зв’язку доцільно виконати їх порівняльний аналіз (3.1).

Таблиця 3.1

Загальна характеристика підходів до оптимізації каналів зв’язку

Підхід до оптимізації	**Основна ідея**	**Переваги**	**Обмеження**
Апаратний	Покращення фізичних параметрів обладнання	Зменшення власних шумів	Висока вартість
Сигнальний	Обробка та адаптація сигналу	Гнучкість, універсальність	Обмежена ефективність
Системний	Керування параметрами всієї системи	Комплексний підхід	Зростання затримок
Адаптивний	Динамічна зміна параметрів	Висока завадостійкість	Складність реалізації

Порівняння показує, що жоден із розглянутих підходів не є універсально застосовним. Найбільш ефективна оптимізація каналів зв'язку досягається шляхом поєднання різних методів з урахуванням особливостей каналу зв'язку та умов його функціонування. Особливе значення в цьому контексті мають адаптивні підходи, оскільки вони сприяють здатності системи реагувати на зміни рівнів перешкод у режимі реального часу.

Таким чином, розглянуті підходи до оптимізації каналів зв’язку формують узагальнену методологічну базу, яка дозволяє систематизувати способи підвищення завадостійкості телекомунікаційних систем у реальних умовах експлуатації. Аналіз показує, що ефективність оптимізації визначається не лише вибором окремого методу, але й правильним поєднанням апаратних, сигнальних і системних рішень з урахуванням специфіки каналу зв’язку, типу переданої інформації та вимог до якості сервісу. Саме комплексний підхід дозволяє досягти збалансованого покращення основних параметрів якості каналу.

Особливу роль у сучасних телекомунікаційних системах відіграють адаптивні методи оптимізації, які забезпечують динамічну зміну параметрів

передачі інформації відповідно до поточного стану каналу. На відміну від статичних методів, адаптивні алгоритми дозволяють реагувати на зміну рівня шуму, інтерференції та багатопроменевих спотворень у режимі реального часу. Це є критично важливим для бездротових систем зв’язку, де умови поширення сигналу мають стохастичний характер і можуть істотно змінюватися навіть протягом коротких проміжків часу.

Застосування адаптивних підходів дає змогу оптимізувати компроміс між пропускною здатністю, завадостійкістю та затримкою передачі інформації. Наприклад, у разі погіршення відношення сигнал/шум система може автоматично переходити на більш стійкі методи модуляції або зменшувати швидкість передачі даних, зберігаючи при цьому прийнятний рівень ймовірності помилок. У сприятливих умовах параметри передачі можуть бути скориговані у зворотному напрямку, що дозволяє максимально ефективно використовувати ресурси каналу.

Крім того, важливо зазначити, що оптимізація каналів зв’язку не може розглядатися ізольовано від загальної архітектури телекомунікаційної системи. Рішення, прийняті на фізичному рівні, безпосередньо впливають на роботу протоколів вищих рівнів, зокрема механізмів керування трафіком, повторної передачі та забезпечення якості обслуговування. Це обумовлює необхідність міжрівневої координації процесів оптимізації та впровадження системного підходу до управління передачею інформації.

Отже, подальше дослідження методів оптимізації каналів зв’язку доцільно здійснювати з фокусом на практичні алгоритми зменшення впливу системних перешкод та шумів. У наступних підрозділах третього розділу буде детально розглянуто адаптивні методи фільтрації сигналів, алгоритми компенсації перешкод, а також оптимізацію параметрів модуляції та кодування з урахуванням змінних умов каналу. Застосування цих методів дозволяє підвищити надійність та ефективність телекомунікаційних систем, що підтверджує їх актуальність і практичну значущість.

3.2 Адаптивна фільтрація та методи компенсації завад

В умовах, коли системні перешкоди є поширеною проблемою, одним з найефективніших підходів до оптимізації каналів зв'язку є впровадження методів адаптивного фільтрування та компенсації перешкод [18]. На відміну від методів фіксованої обробки сигналів, адаптивні підходи дозволяють змінювати параметри системи в режимі реального часу відповідно до поточного стану каналу зв'язку та рівня перешкод. Це має особливе значення в контексті бездротових систем, де умови передачі можуть значно змінюватися з часом.

Адаптивна фільтрація базується на використанні фільтрів, параметри яких автоматично регулюються на основі аналізу вхідного сигналу та фону перешкод. Основна функція цих фільтрів полягає у вилученні корисних компонентів сигналу при одночасному ослабленні впливу шуму та перешкод, тим самим зберігаючи цілісність інформаційного вмісту сигналу в розумних межах. Як наслідок, адаптивне фільтрування стало поширеною технікою в системах зв'язку, спрямованою на поліпшення відношення сигнал/шум та зменшення кількості помилок.

Відмінною рисою адаптивних фільтрів є вбудований механізм зворотного зв'язку, який полегшує оцінку ефективності процесу фільтрації та дозволяє змінювати параметри фільтра під час роботи [19]. Мінімізація середньоквадратичної похибки, зниження рівня шуму або стабілізація вихідного сигналу можуть використовуватися як критерії оптимізації. Такий підхід забезпечує здатність системи адаптуватися до мінливих умов каналу зв'язку.

Окрім процесу фільтрації, для зменшення впливу системного шуму надзвичайно важливим є впровадження методів компенсації шуму. Основна мета цих методів є двоякою: по-перше, придушення шуму, а по-друге, усунення або зменшення конкретних спотворень сигналу, спричинених перешкодами, багатопроменевістю та іншими факторами шуму. Визнано, що компенсація шуму може здійснюватися як на рівні сигналу, так і на рівні параметрів каналу зв'язку.

Загальний підхід до компенсації шуму полягає у використанні опорних сигналів або оцінок фонового шуму для відокремлення шумової складової від корисного сигналу. У цьому сценарії перешкоди оцінюються, а потім віднімаються від отриманого сигналу, тим самим покращуючи якість прийому. Ефективність таких методів залежить від передбачуваності або повторюваності перешкодних сигналів.

Методи адаптивного фільтрування та компенсації перешкод часто застосовуються разом, доповнюючи один одного. Процес фільтрування служить для зниження загального рівня шуму, тоді як методи компенсації призначені для усунення конкретних спотворень сигналу. Такий комплексний підхід підвищує стійкість каналу зв'язку до перешкод та стабільність його параметрів.

Важливо визнати, що ефективність адаптивного фільтрування та компенсації шуму залежить від складності використовуваних алгоритмів та швидкості їх адаптації. Недостатній час відгуку на зміни умов каналу може бути наслідком занадто повільної адаптації, тоді як надто швидкий відгук може призвести до нестабільності системи. Отже, при проектуванні систем зв'язку необхідно знайти компроміс між швидкістю та стабільністю алгоритмів.

Доведено, що застосування методів адаптивного фільтрування та компенсації перешкод призводить до істотного поліпшення якості каналів зв'язку, усуваючи необхідність істотних модифікацій апаратного забезпечення системи. Це робить ці методи особливо привабливими для сучасних цифрових і бездротових систем зв'язку, де гнучкість і адаптивність є найважливішими вимогами.

Отже, методи адаптивного фільтрування та компенсації перешкод є необхідними інструментами для оптимізації каналів зв'язку за наявності системних перешкод. Вплив цих методів є потрійним: по-перше, вони покращують відношення сигнал/шум; по-друге, вони зменшують ймовірність помилок; і по-третє, вони стабілізують параметри каналу. Це створює основу для подальшого застосування шумостійкого кодування та оптимізації модуляції, що розглядається в наступному розділі.

3.3 Завадостійке кодування та оптимізація модуляції

В умовах, коли системні перешкоди є поширеною проблемою, оптимізація каналів зв'язку може бути складним завданням. Використання шумостійкого кодування та розумний вибір методів модуляції визнано високоефективним підходом до пом'якшення негативних наслідків таких перешкод [20]. На відміну від методів фільтрації та компенсації перешкод, які призначені для зменшення впливу перешкод на рівень сигналу, шумостійке кодування та оптимізація модуляції підвищують надійність передачі інформації, використовуючи унікальні характеристики представлення та обробки інформації в каналі зв'язку.

Концепція шумостійкого кодування передбачає включення надлишкової інформації в переданий повідомлення. Ця надлишкова інформація призначена для виявлення та виправлення помилок, які можуть виникнути під час передачі. Наявність шуму, перешкод та багатопроменевих спотворень неминуче призводить до помилок у прийнятому сигналі; тому використання кодів контролю та виправлення помилок є важливою складовою сучасних цифрових систем зв'язку. Доведено, що такий підхід значно зменшує ймовірність помилкового прийому інформації без необхідності істотного збільшення потужності сигналу.

Найпоширеніші підходи до кодування з виправленням помилок включають блокові та згорткові коди, а також їх різні модифікації. Блокові коди полегшують виявлення та виправлення помилок у конкретних блоках даних. Навпаки, згорткові коди призначені для послідовного управління інформацією. Вибір конкретного типу кодування залежить від вимог до надійності зв'язку, прийнятної затримки та обчислювальних можливостей обладнання приймача-передавача.

Окрім процесу кодування, вибір методу модуляції має першочергове значення для забезпечення стійкості до шуму каналу. Метод модуляції визначає представлення інформаційних символів у параметрах сигналу і, отже, має прямий вплив на чутливість системи до перешкод [21]. В умовах сильних перешкод доцільно застосовувати простіші та надійніші методи модуляції. І навпаки, в

сприятливих умовах можна використовувати більш складні схеми з вищою спектральною ефективністю.

Оптимізація модуляції може бути визначена як процес вибору методу, який забезпечує прийнятний компроміс між стійкістю до перешкод, пропускною здатністю та складністю реалізації. Очевидно, що збільшення порядку модуляції забезпечує вищу швидкість передачі інформації, однак одночасно це призводить до зниження стійкості до перешкод [22]. Як наслідок, в реальних системах зв'язку часто застосовуються адаптивні підходи, при яких метод модуляції модифікується відповідно до поточного стану каналу.

Очевидно, що оптимізація кодування та модуляції, стійких до шуму, тісно пов'язані між собою і, як правило, застосовуються разом. Кодування служить для компенсації помилок, спричинених перешкодами, а оптимальний вибір модуляції - для зменшення ймовірності їх виникнення. Доведено, що такий комплексний підхід значно підвищує надійність передачі інформації навіть у випадках, коли умови каналу зв'язку є неоптимальними.

Для узагальнення особливостей впливу кодування та модуляції на завадостійкість каналу доцільно навести їх порівняльну характеристику.

Наведене порівняння показує, що завадостійке кодування та оптимізація модуляції не є взаємозамінними методами, а доповнюють одне одного. Їх спільне використання дозволяє досягти кращих якісних показників каналу зв’язку без істотного ускладнення системи або збільшення апаратних витрат [23].

Таким чином, завадостійке кодування та оптимізація модуляції є важливими складовими оптимізації каналів зв’язку в умовах системних завад. Вони забезпечують підвищення надійності передавання інформації, зменшення ймовірності помилок і більш ефективне використання ресурсів каналу. У наступному підрозділі буде розглянуто практичні аспекти застосування розглянутих методів оптимізації в бездротових системах зв’язку.

3.4 Практичне застосування методів оптимізації в бездротових системах зв’язку

У даному підрозділі наведено результати практичного дослідження методів оптимізації каналу зв’язку в умовах дії системних завад, шуму та багатопроменевого поширення сигналу. Метою проведених експериментів є наочна демонстрація впливу різних алгоритмів обробки сигналів на показники якості каналу зв’язку та підтвердження теоретичних положень, розглянутих у попередніх розділах роботи [24]. Моделювання виконувалося в середовищі Google Colab з використанням мови програмування Python та стандартних бібліотек для чисельних обчислень і візуалізації результатів. Як основні критерії оцінювання якості каналу зв’язку використовувалися відношення сигнал/шум (SNR) та ймовірність бітової помилки (BER).

На першому етапі дослідження було розглянуто вплив адитивного шуму на корисний сигнал та можливість покращення його якості шляхом фільтрації (3.2). Для цього було змодельовано детермінований багаточастотний сигнал, до якого додано білий гаусівський шум, що імітує типові завади в каналі зв’язку. Початковий рівень зашумленості сигналу оцінювався за допомогою показника SNR.

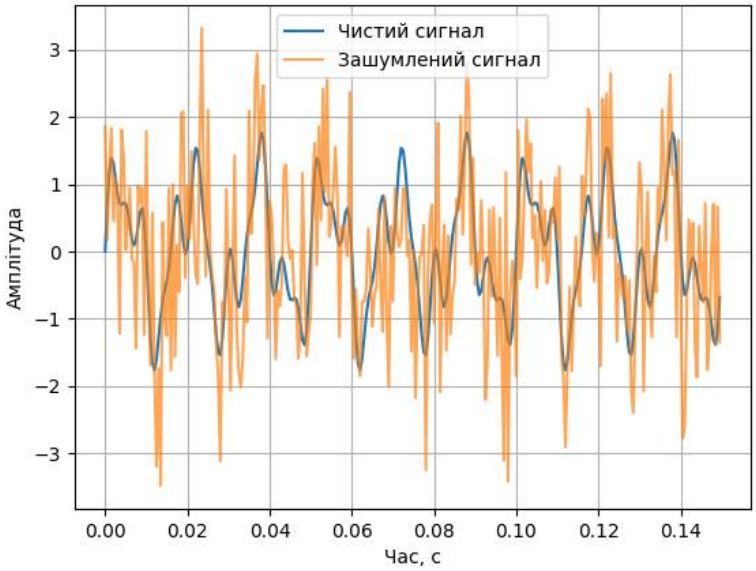


Рис. 3.2 Сигнал до та після додавання шуму

З рисунка видно, що додавання адитивного шуму призводить до значних випадкових коливань амплітуди, внаслідок чого форма корисного сигналу частково втрачається. У пікових значеннях шумова складова є порівнянною з амплітудою сигналу, що ускладнює його подальшу обробку та надійне приймання. Це обґрунтовує необхідність застосування методів фільтрації для підвищення якості сигналу [25].

З метою зменшення впливу шуму було застосовано як класичні, так і адаптивні методи фільтрації, зокрема метод ковзного середнього, фільтр Вінера, а також адаптивні фільтри на основі алгоритмів LMS та RLS. Порівняння результатів фільтрації здійснювалося шляхом аналізу часових реалізацій сигналу та обчислення значень SNR після застосування відповідних алгоритмів (3.3).

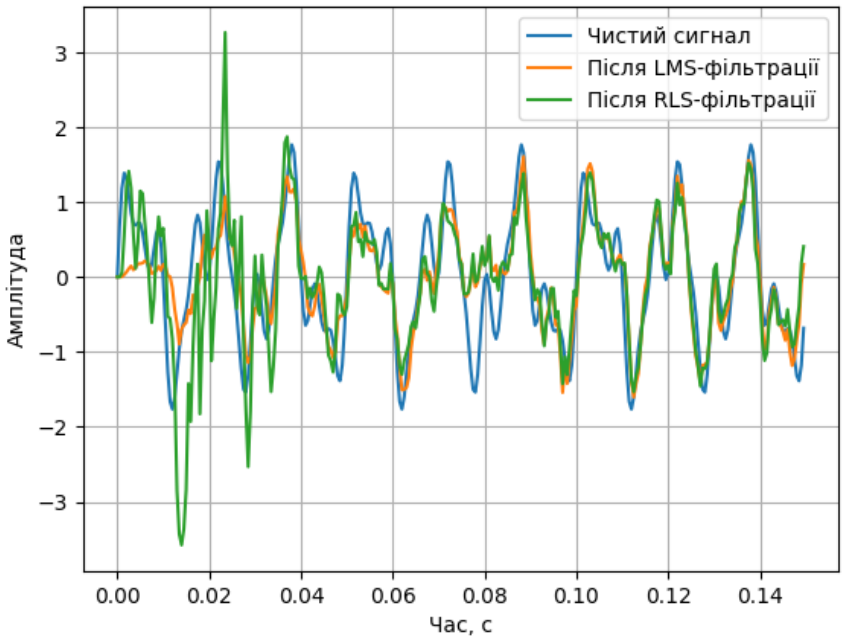


Рис. 3.3 Результати адаптивної фільтрації

Аналіз отриманих результатів показує, що після застосування адаптивної фільтрації форма сигналу стає значно ближчою до початкової. Високочастотні шумові коливання суттєво зменшуються, а загальна структура сигналу відновлюється [26]. При цьому LMS-фільтр забезпечує стабільну роботу, тоді як RLS-фільтр демонструє швидшу адаптацію до змін характеристик завад.

Кількісна оцінка ефективності фільтрації за показником SNR підтверджує перевагу адаптивних алгоритмів над фіксованими методами, особливо в умовах змінного шумового середовища. Отримані результати свідчать про доцільність використання адаптивної обробки сигналів у реальних телекомунікаційних системах.

Після аналізу впливу шуму та ефективності фільтрації аналогового сигналу доцільно перейти до оцінювання якості цифрової передачі інформації, оскільки в сучасних телекомунікаційних системах дані передаються у цифровій формі. Основним показником якості цифрового каналу зв'язку є ймовірність бітової помилки (BER).

Для цього було змодельовано систему цифрового зв'язку з використанням різних схем модуляції та проведено аналіз залежності BER від відношення сигнал/шум (3.4). У ході експерименту розглядалися схеми BPSK та QPSK, як без застосування корекційного кодування, так і з використанням коду Хеммінга [27].

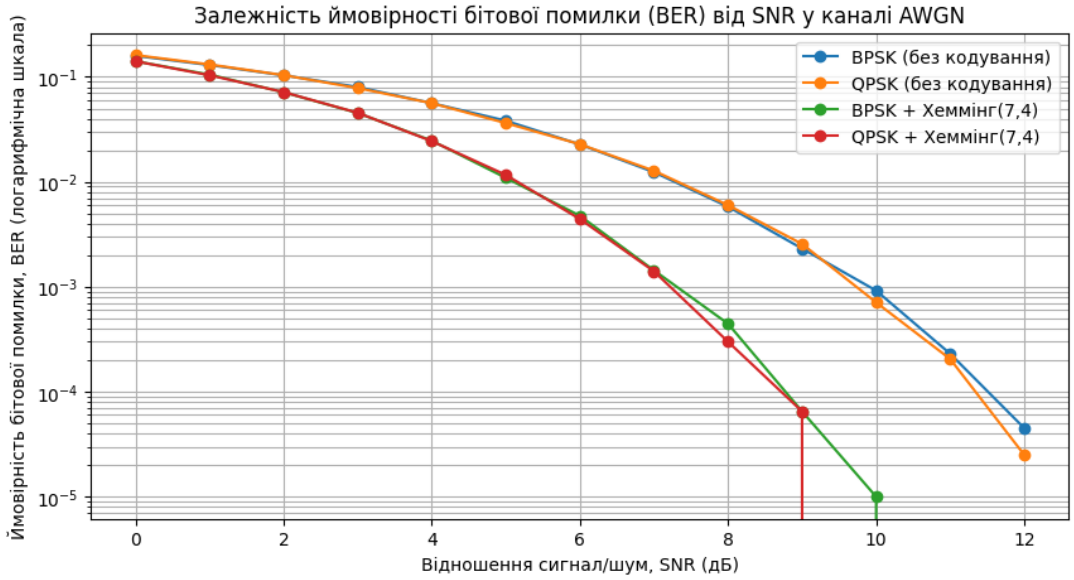


Рис. 3.4 Залежність ймовірності бітової помилки BER від відношення сигнал/шум для різних схем модуляції

З отриманого графіку видно, що зі зростанням значення SNR ймовірність бітової помилки монотонно зменшується. Використання корекційного кодування дозволяє істотно підвищити завадостійкість системи, однак супроводжується

зменшенням ефективної швидкості передачі, що відображає характерний для цифрових систем компроміс між надійністю та пропускною здатністю.

Наступним кроком дослідження стала демонстрація принципів адаптивної оптимізації параметрів передавання інформації в умовах змінного каналу. Для цього було змодельовано канал зв'язку зі змінним у часі значенням SNR, що імітує реальні умови бездротового середовища [28].

У межах експерименту реалізовано алгоритм адаптивного вибору схеми модуляції, відповідно до якого система автоматично перемикається між BPSK та QPSK залежно від поточного стану каналу (3.5).

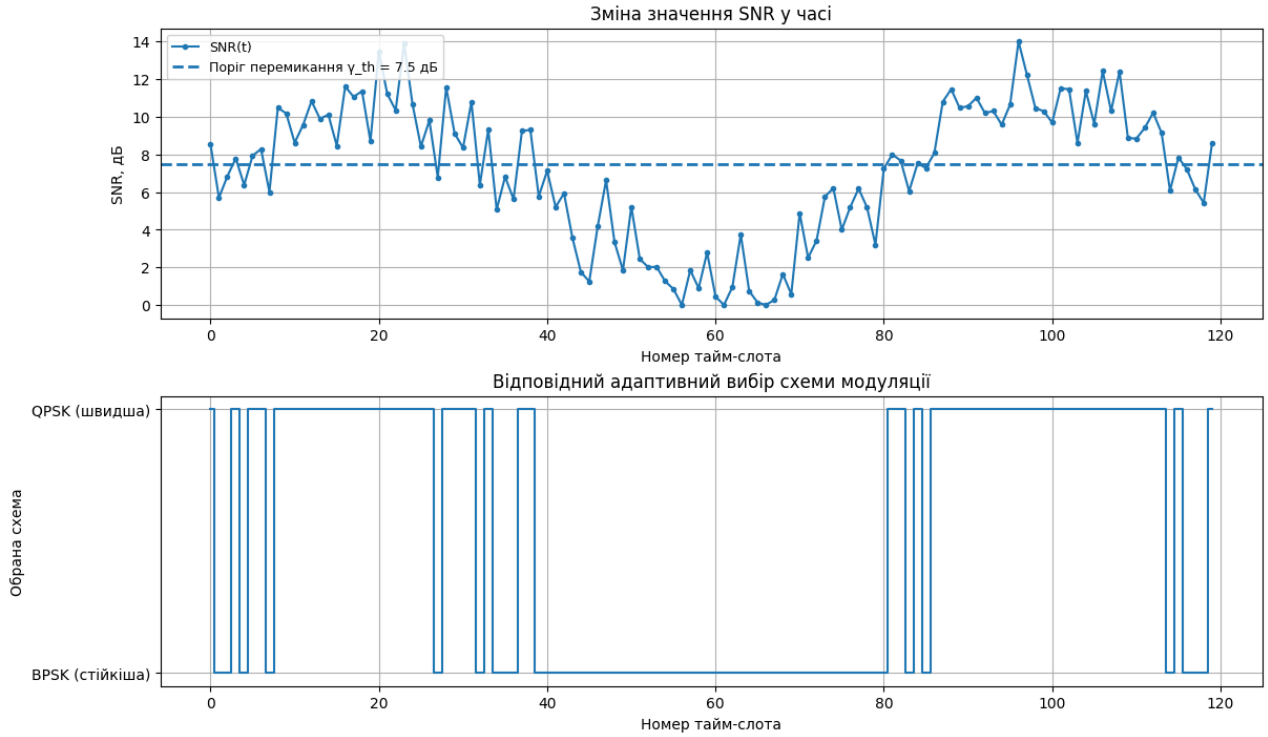


Рис. 3.5 Зміна значення SNR у часі та відповідний адаптивний вибір схеми модуляції

Результати моделювання підтвердили, що адаптивна модуляція дозволяє підтримувати стабільну якість зв'язку завдяки динамічному узгодженню параметрів передавання (типу модуляції та швидкості) з поточним станом каналу. У випадках, коли рівень шуму та завад зростає, система переходить на більш завадостійкі режими, зменшуючи ймовірність помилок, а за сприятливих умов - підвищує спектральну ефективність.

Окрему увагу приділено впливу багатопроменевого поширення сигналу, яке є характерним для більшості бездротових систем і часто призводить до міжсимвольної інтерференції (ISI) (3.6). Для практичної демонстрації було змодельовано багатопроменевий канал у вигляді набору затриманих та ослаблених копій сигналу. Отримана імпульсна характеристика каналу відображає наявність декількох домінантних шляхів поширення, що й формують часові спотворення.

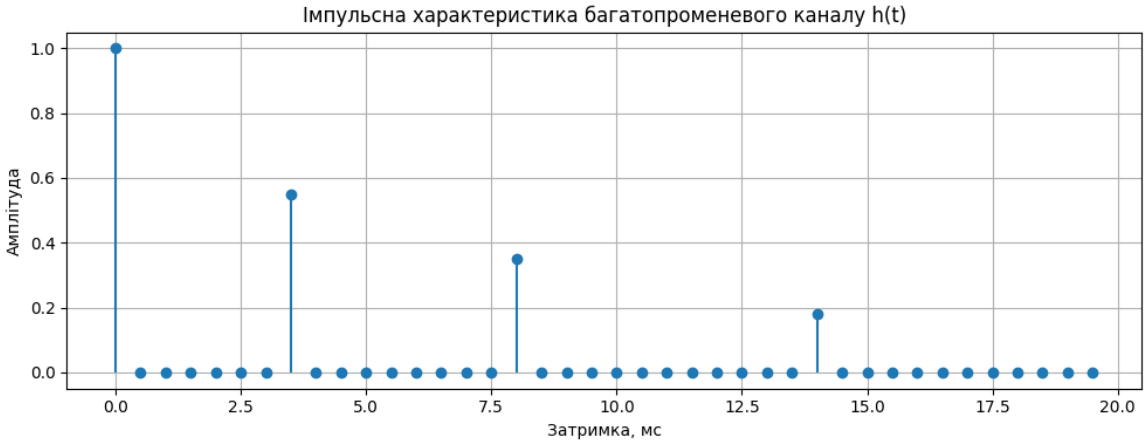


Рис. 3.6 Імпульсна характеристика багатопроменевого каналу

Наявність кількох затриманих компонентів у каналі безпосередньо спричиняє ISI, що погіршує приймання цифрових символів і підвищує BER [29]. З метою компенсації цих спотворень було реалізовано адаптивний еквалайзер на основі алгоритму LMS, який навчається на відомій послідовності та підлаштовує вагові коефіцієнти для мінімізації похибки.

Для оцінювання ефективності еквалізації виконано порівняння якості прийнятого сигналу до та після обробки еквалайзером (3.7). Аналіз часових реалізацій демонструє зменшення “розмазування” символів і покращення відновлення форми сигналу після компенсації багатопроменевого впливу.

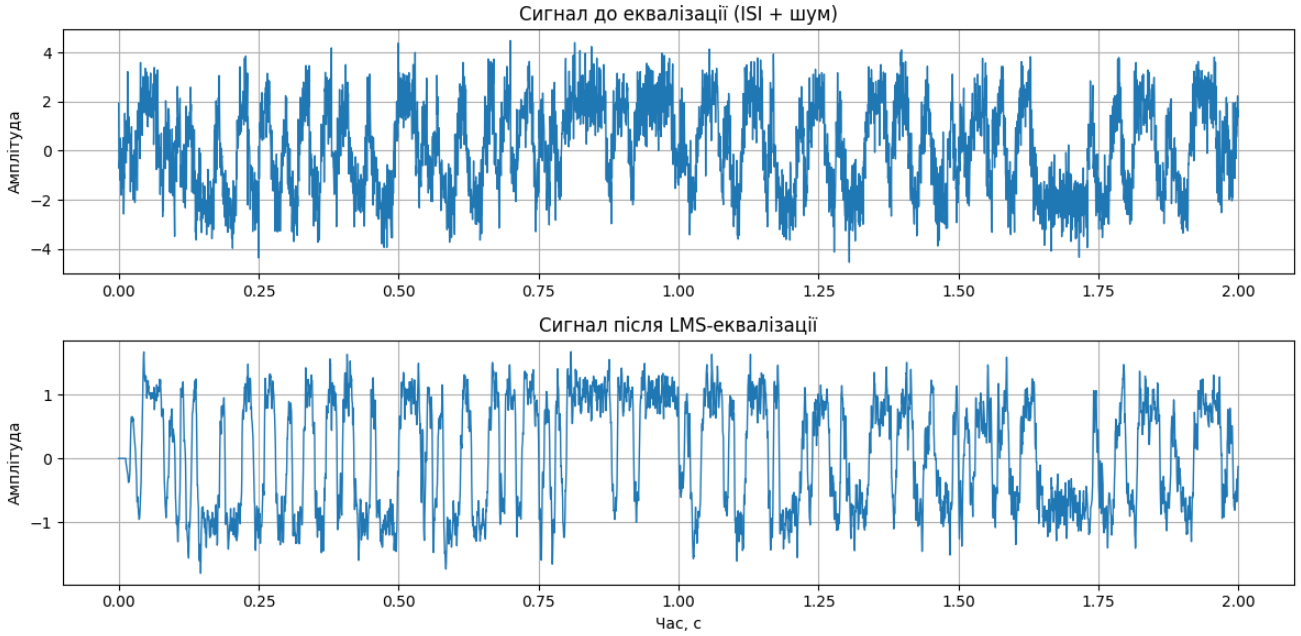


Рис. 3.7 Порівняння сигналу до та після еквалізації (LMS)

Отримані результати підтвердили, що застосування LMS-еквалайзера забезпечує істотне зменшення ISI, що проявляється у більш коректному відновленні символів та покращенні показників якості каналу. Для кількісної оцінки ефекту було виконано аналіз BER до та після еквалізації.

Завершальним етапом практичного дослідження стало моделювання та аналіз роботи системи з ортогональним частотним мультиплексуванням (OFDM) в умовах багатопроменевого каналу зв’язку. OFDM є базовою технологією більшості сучасних телекомунікаційних стандартів, оскільки забезпечує ефективне використання спектра та високу завадостійкість у середовищах із часовими спотвореннями [30]. У межах експерименту було досліджено вплив міжсимвольної інтерференції на якість передавання інформації та оцінено ефективність застосування компенсаційних методів обробки сигналу.

Наведено залежність ймовірності бітової помилки BER від відношення сигнал/шум SNR для OFDM-системи в багатопроменевому каналі за двох умов: без застосування еквалізації та з використанням адаптивного LMS-еквалайзера (3.8).

Отримані криві наочно демонструють, що за відсутності вирівнювання вплив багатопроменевого поширення призводить до значного збільшення BER, особливо

в діапазоні низьких і середніх значень SNR. Це явище можна пояснити наявністю міжсимвольної інтерференції, яка порушує ортогональність несучих сигналів OFDM.

Було продемонстровано, що використання еквалайзера LMS ефективно компенсує спотворення, спричинені багатопроменевим каналом, про що свідчить істотне зниження BER у всьому діапазоні досліджуваних значень SNR. Найбільш значне поліпшення з точки зору коефіцієнта підсилення спостерігається в умовах, що характеризуються середнім рівнем шуму. У таких сценаріях вирівнювання забезпечує надійне відновлення символів без необхідності збільшення потужності передавача. Отже, результати моделювання підтверджують доцільність використання вирівнювання в системах OFDM для підвищення стійкості до шуму та надійності передачі інформації в реальних каналах бездротового зв'язку.

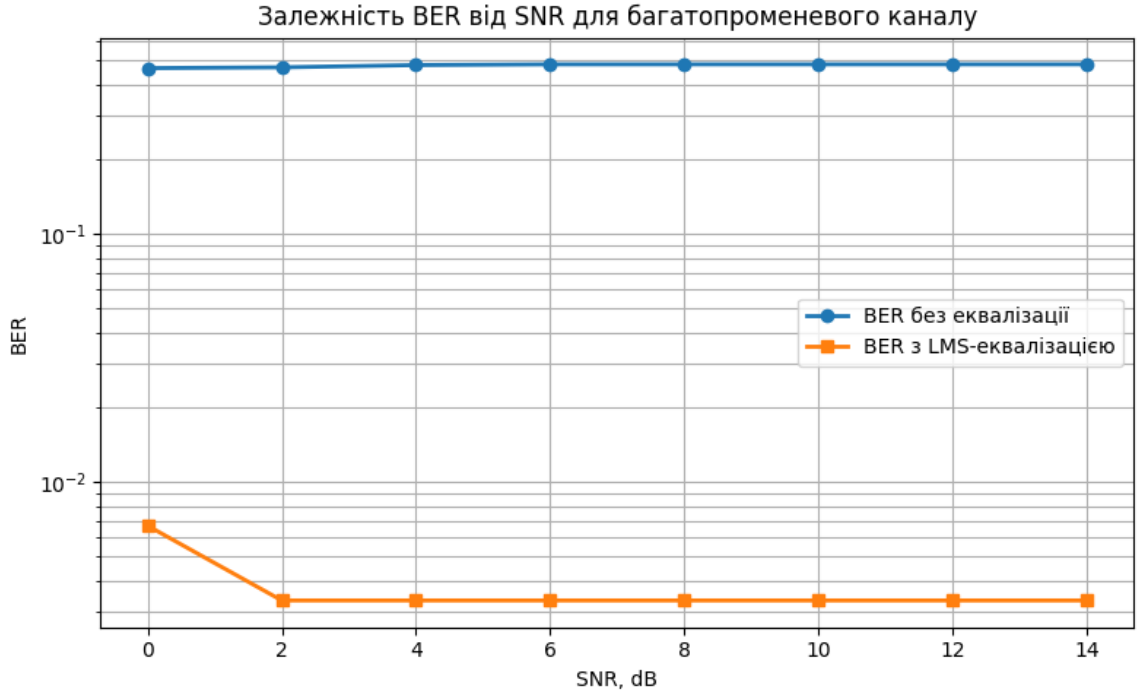


Рис. 3.8 Залежність BER від SNR для сигналу без еквалізації та з LMS-еквалізацією

Емпіричні дослідження показали, що на ефективність каналів зв'язку в реальних умовах переважно впливають системні перешкоди, шум і багатопроменеве поширення сигналу. Результати моделювання однозначно демонструють, що за відсутності спеціальних методів обробки сигналу передача

інформації супроводжується погіршенням показників якості, зокрема зниженням відношення сигнал/шум і збільшенням ймовірності бітових помилок.

На попередньому етапі дослідження було продемонстровано, що адитивний гаусівський шум спричиняє істотне спотворення часової структури сигналу, ускладнюючи його подальшу обробку та прийом. Навіть при помірному рівні шуму коливання амплітуди можуть бути порівнянні з корисною складовою сигналу, що підтверджує фундаментальні обмеження каналів зв'язку. Застосування методів фільтрації дозволило зменшити вплив шуму, причому адаптивні алгоритми продемонстрували вищу ефективність порівняно з фіксованими фільтрами в умовах змінного шуму.

Ретельний аналіз цифрових систем зв'язку, заснований на коефіцієнті помилок Бхаттачарія (BER), продемонстрував характерну залежність ймовірності помилки від значення відношення сигнал/шум (SNR). Результати моделювання підтвердили, що зі збільшенням відношення сигнал/шум якість передачі інформації поліпшується. Використання кодування з корекцією помилок дозволяє зменшити BER за рахунок введення надмірності. Однак це супроводжується зниженням ефективної швидкості передачі, що відображає компроміс між надійністю та пропускною здатністю в цифрових системах. Важливим практичним результатом цього дослідження є підтвердження ефективності адаптивної оптимізації в контексті параметрів передачі інформації. Було продемонстровано, що впровадження алгоритму адаптивної модуляції сприяє здатності системи адаптуватися до переважаючих характеристик каналу зв'язку, забезпечуючи тим самим надійну якість передачі та підвищену спектральну ефективність в оптимальних умовах.

Особлива увага приділяється дослідженню багатопроменевого каналу зв'язку, оскільки він вважається одним з основних джерел міжсимвольної інтерференції в бездротових системах. Моделювання імпульсної характеристики такого каналу виявило наявність декількох домінуючих шляхів поширення сигналу з різними затримками. Ці затримки призвели до часового перекриття символів і погіршення прийому цифрової інформації

ВИСНОВКИ

У першому розділі розглядаються теоретичні основи функціонування каналів зв'язку та аналізуються фактори, що визначають якість передачі інформації в телекомунікаційних системах. Основна увага в цьому дослідженні приділяється природі системного шуму, фонового шуму та внутрішніх спотворень у системах прийому та передачі. Крім того, розглядається взаємозв'язок між ключовими показниками якості каналів зв'язку, причому особлива увага приділяється відношенню сигнал/шум, ймовірності бітової помилки та пропускній здатності.

Другий розділ присвячений аналізу бездротових та волоконно-оптичних каналів зв'язку, а також дослідженню багатопроменевого поширення сигналу та явищ інтерференції. Було проведено порівняльний аналіз характеристик цих каналів, що дозволило визначити їхні переваги, обмеження та сфери застосування. Було продемонстровано, що бездротові канали забезпечують високий рівень гнучкості та мобільності, але є більш чутливими до інтерференції. Навпаки, волоконно-оптичні канали відрізняються високою пропускною здатністю та стійкістю до інтерференції.

У третьому розділі представлено практичне дослідження методів оптимізації каналів зв'язку в умовах системних перешкод з використанням комп'ютерного моделювання. Отримані результати підтверджують ефективність адаптивного фільтрування, шумостійкого кодування, адаптивної модуляції та вирівнювання, про що свідчить зниження рівнів шуму, ймовірності бітових помилок та підвищення стабільності передачі. Моделювання багатопроменевого каналу у поєднанні з використанням вирівнювача LMS для зменшення міжсимвольних перешкод без збільшення потужності передавача має практичну цінність.