Дорош Лідія Вадимівна

АРДМ-61

Керівник диплому **Кравченко В.І**

Покращення характеристик мобільних телекомунікаційних мереж нового покоління за рахунок використання фазорізницевої модуляції високих порядків.

ВСТУП

Уявіть собі світ, де мільярди пристроїв — від розумних годинників на вашому зап’ясті до супутників на орбіті, які безперервно обмінюються даними. Відео у форматі 8K транслюється без затримок, автомобілі узгоджують свої дії в реальному часі, а лікарі проводять операції за допомогою роботизованих систем, перебуваючи на тисячі кілометрів від пацієнтів. Усе це стає реальністю завдяки мобільним мережам, здатним передавати величезні обсяги інформації швидко, стабільно та без втрат. Однак найбільший виклик для сучасної телекомунікаційної галузі полягає в обмеженості частотного спектра.

Кількість користувачів і пристроїв стрімко збільшується, мобільний трафік щорічно зростає на десятки відсотків, а доступного спектра майже не залишається. У такій ситуації передача великих обсягів даних можлива лише завдяки підвищенню ефективності використання частот, які вже існують. Одним із найефективніших рішень є впровадження модуляцій високих порядків, які дають змогу передавати на багато більше інформації в одному символі сигналу. Однак підвищення порядку модуляції призводить до певних наслідків, що сигнал стає більш чутливим до шумів, фазових спотворень та деформацій каналу. Такий підхід є своєрідним компромісом: із зростанням швидкості передачі даних зростає і вразливість системи до завад.

У сучасних поколіннях мобільних мереж, як 5G і майбутні 6G, досягнення балансу між швидкістю передачі даних і стабільністю сигналу є надзвичайно важливим. З огляду на цю ситуацію, науковці активно досліджують методи підвищення надійності передачі інформації без компромісів щодо її продуктивності. Одним із перспективних підходів є використання фазорізницева модуляція. Цей метод базується на передачі інформації за допомогою різниці фаз між сусідніми символами, а не абсолютним значенням фази сигналу. Такий підхід дає змогу забезпечувати стійкість сигналу до фазового шуму, знижує вимоги до

точності синхронізації і покращує ефективність роботи систем у складних або зашумлених каналах зв’язку.

Фазорізницева модуляція є актуальною в сучасних архітектур, які інтегрують технології OFDM, масивних MIMO та адаптивне управління параметрами передачі. Використання цієї модуляції відкриває перспективи створення "розумного" радіо — системи, що автономно визначає оптимальний порядок модуляції відповідно до рівня завад, потужності сигналу і умов навколишнього середовища. Це наближає нас до рівня ефективності, необхідного для мереж майбутнього.

Дослідження застосування фазорізницевої модуляції високого порядку в мобільних телекомунікаційних мережах нового покоління має як теоретичний, так і практичний внесок. Мета такої модуляції полягає у вирішенні однієї з ключових задач сучасної телекомунікації, які забезпеченні максимальною швидкістю передачі даних при збереженні стабільності сигналу у складних умовах реального радіосередовища. Це значний крок на шляху до створення більш ефективних, адаптивних та надійних мереж, які здатні відповідати вимогам інформаційного розвитку майбутнього.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ЗАСТОСУВАННЯ ФАЗОРІЗНИЦЕВОЇ МОДУЛЯЦІЇ У МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

1.1 Розвиток мобільних телекомунікаційних мереж: від 1G до 6G

Розвиток мобільних телекомунікаційних мереж є однією з найдинамічніших технологічних еволюцій нашого часу. Від перших аналогових систем, що дозволяють здійснювати лише голосові дзвінки, до сучасних високошвидкісних цифрових платформ, що здатні передавати гігабітні дані за секунди, минувши всього кілька десятиліть. Кожне нове покоління мереж (G - generation) стало черговим кроком до епохи, у якій головна мета полягає не просто у передачі сигналу, а й створення інтелектуального середовища взаємодії між людьми, пристроями і різноманітними системами.

Мережі першого покоління (1G)

Перші комерційні мобільні системи почали з'являтися наприкінці 1970-х років. Системи працювали на основі аналогових технологій, забезпечуючи виключно голосовий зв'язок без передачі цифрових даних. Найбільш відомі стандарти того часу були AMPS (Advanced Mobile Phone System) у США, NMT (Nordic Mobile Telephone) у Скандинавії і TACS (Total Access Communication System) у Великій Британії.

Системи першого покоління (1G) функціонували за принципом частотного поділу каналів (FDMA). Для кожного абонента виділялася окрема частота в межах діапазону,а саме 800–900 МГц. Однак такі системи мали обмежену пропускну здатність, і ефективність використання спектра залишалася низькою — на рівні близько 0,1–0,3 біт/с/Гц.

Головні недоліки 1G включали:

— відсутність захисту від несанкціонованого доступу, що дозволяло легко прослухати розмову за допомогою звичайного радіоприймача;

— не висока якість зв'язку через значний рівень шумів та спотворень;

— відсутність роумінгу між операторами;

— велике енергоспоживання і габаритні розміри мобільних пристроїв.

Попри всі обмеження, система 1G стала справжнім проривом завдяки впровадженню стільникової структури мережі. Розподіл покриття на зони так звані середки, які дозволяли багаторазове використання частот у сусідніх комірках, що стало великим поштовхом у розвитку мобільного зв'язку.

Мережі другого покоління (2G)

На початку 1990-х років відбувся перехід від аналогових систем до цифрових, що стало новою епохою в розвитку мобільного зв’язку. З’явилися нові стандарти, такі як GSM (Global System for Mobile Communications), IS-95 (CDMA) та D-AMPS (TDMA). Серед них GSM став найпоширенішим у світі, він охопив понад 200 країн.

У системах вперше впровадили кодування голосу в цифровому форматі і шифрування переданих даних, що значно підвищило рівень безпеки. Крім звичайних голосових викликів, користувачі отримали нові можливості, такі як передача текстових повідомлень (SMS) і короткі пакети даних за допомогою технологій CSD, GPRS та EDGE.

У стандарті GSM використання модуляції GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying), яка забезпечила підвищення спектральної ефективності у діапазоні 0,6–0,9 біт/с/Гц. Також застосування TDMA (Time Division Multiple Access) дозволило використовувати одну частоту для декількох абонентів за часом.

Покращені технології GPRS (General Packet Radio Service) і EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution) забезпечували швидкість передачі даних до 384 кбіт/с, що стало важливим кроком у розвитку мобільного Інтернету. Однак затримки сигналу, що могли досягати до 500 мс, все ще створювали обмеження для використання мультимедійних сервісів.

Мережі третього покоління (3G)

Покоління 3G, що з'явилося на початку 2000-х, стало переломним моментом у переході до широкосмугових систем передачі даних. Основу цієї технології склали WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) у межах стандарту UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) та CDMA2000, що була поширена переважно в Північній Америці.

Мережі 3G забезпечували швидкості до 2 Мбіт/с у стаціонарних умовах та приблизно 384 кбіт/с під час руху. Такі досягнення стали можливими завдяки впровадженню адаптивної модуляції (QPSK, 16-QAM) і динамічному управлінню потужністю сигналу.

Крім цього, було вдосконалено системи кодування, а саме Turbo-коди і LDPC, що сприяло підвищенню завадостійкості. Спектральна ефективність також зросла до 1,5–2 біт/с/Гц.

Вперше в межах технології 3G реалізували концепцію, так звану “мережу послуг”, де користувачі отримали можливість не лише здійснювати голосові дзвінки, а й користуватися відеозв'язком, мобільним телебаченням та мали доступ до інтернету. Цей етап заклав основу для формування цифрової екосистеми зв'язку, орієнтованої на передачу даних.

Мережі четвертого покоління (4G)

Покоління 4G, представлене технологіями LTE (Long Term Evolution) і WiMAX, які здійснили справжній прорив у мобільних комунікаціях.

Основу цього покоління склали такі ключові технології:

- OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) — це ортогональний поділ піднесучих частот, що забезпечує ефективний захист від міжсимвольних інтерференцій;
- MIMO (Multiple Input Multiple Output) — застосування множинних антен для передавання і приймання сигналів, які значно підвищило пропускну здатність системи та її стійкість до завад;
- Квадратурна амплітудна модуляція високих порядків (64-QAM, 256-QAM) — це збільшення обсягу даних, що можна передати в одному символі.

Швидкість передачі даних у мережі 4G досягала 1 Гбіт/с, а рівень затримки зменшився до 5–10 мс. Також впровадження архітектури на базі повністю пакетної IP-технології дозволяє ефективно інтегрувати голосовий зв'язок, відео та передавання даних.

Однак, разом з високою ефективністю 4G виникли певні труднощі. Мережі стали дуже чутливими до фазових шумів та частотних зсувів, які спричинені складними багатопроменевими середовищами. Для вирішення цих проблем було розроблено вдосконалені методи синхронізації, компенсації фазових спотворень та корекції помилок. Це стало основою для подальших досліджень у сфері фазорізницевих методів модуляції.

Мережі п’ятого покоління (5G)

Мережі 5G, які офіційно з'явилися у 2019–2020 роках, представляють собою передову технологічну платформу, яка об'єднує здобутки попередніх поколінь і відкриває доступ до нових можливостей.

Ключові особливості 5G включають:

- використання діапазонів міліметрових хвиль (24–100 ГГц);
- впровадження технології антенних масивів (massive MIMO), які дозволяють одночасно обслуговувати сотні користувачів;
- динамічне формування променя (beamforming) для напрямку сигналу у заданий вектор;
- гнучке керування спектром та мережевими ресурсами за допомогою технології розділення мережі (network slicing);
- застосування високих порядків модуляції (до 1024-QAM).

Ця технологія забезпечує швидкість передачі даних до 20 Гбіт/с, затримку менше 1 мс і підтримку до мільйона пристроїв на квадратний кілометр. Завдяки цьому стали можливими такі концепції, як Інтернет речей (IoT), автономний транспорт, розумні міста і також дистанційна медицина.

Втім, висока щільність каналів та специфіка міліметрових хвиль потребують нових підходів до модуляції, що здатні функціонувати в умовах значного фазового

шуму, частотних зсувів та нестабільного оточення. Тож дослідження і вдосконалення фазорізницевих модуляцій високого порядку для 5G і майбутніх мереж 6G є важливим напрямом розвитку.

Мережі шостого покоління (6G): перспективи і концепції

Покоління 6G, яке очікується приблизно після 2030 року, стане логічною еволюцією і удосконаленням технологій 5G.

Основні характеристики 6G:

- швидкість передачі даних вище 1 Тбіт/с;
- затримка менше 0,1 мс;
- інтеграція з штучним інтелектом, який стане ключовим елементом управління мережею;
- використання терагерцових діапазонів частот (0,1–10 ТГц) і оптичних каналів;
- розвиток концепції Internet of Senses — інтерактивної взаємодії із віртуальними середовищами.

Мережі 6G будуть побудовані на повністю когнітивній основі, де системи зможуть в режимі реального часу адаптувати модуляцію, потужність та структуру сигналу залежно від навколишніх умов. Для реалізації цього планується застосування технологій фазочастотної модуляції високого порядку, адаптивного кодування і також інтелектуального управління радіочастотним спектром.

Ці рішення дозволять забезпечити оптимальний баланс між швидкістю передачі, стабільністю сигналу і енергоефективністю, створюючи платформу для наступного покоління глобальних комунікацій.

1.2 Характеристики і вимоги до систем передачі даних у мережах нового покоління

Сучасні телекомунікаційні мережі висувають суворі вимоги до пропускної здатності, швидкості передачі даних, надійності, енергоефективності і також до спектральної ефективності. У епоху глобальної цифровізації суспільства, стрімкого розвитку Інтернет-речей (IoT), хмарних технологій, віртуальної та

доповненої реальності (VR/AR) і автономних систем, мобільні мережі мають забезпечувати передачу значних обсягів даних із мінімальними затримками і максимальною стабільністю зв’язку. Стрімке зростання кількості користувачів та підключених пристроїв формує потребу в створенні систем, що здатні працювати в умовах обмеженого спектра, завад та високих вимог до енергоефективності.

1.2.1 Основні характеристики і параметри систем передачі даних

До основних характеристик систем передачі даних у мережах нового покоління належать швидкість передавання інформації, затримка, спектральна ефективність, енергоспоживання і надійність зв’язку. Взаємозв’язок між параметрами визначає ефективність функціонування всієї телекомунікаційної системи.

Швидкість передачі даних, який є один із головних показників розвитку технологій. Якщо у 4G максимальна пропускна здатність становила близько 1 Гбіт/с, то 5G уже забезпечує понад 10 Гбіт/с, а в перспективі 6G очікується досягнення швидкостей понад 1 Тбіт/с. Такі результати можливі завдяки використанню широкосмугових каналів, багатовимірного просторового мультиплексування (Massive MIMO), міліметрових та терагерцових діапазонів, і також модуляцій високих порядків (такі як: 256-QAM, 1024-QAM, APSK, DPSK).

Затримка передачі сигналу (latency) є основним параметром для сервісів, яка вимагає миттєвого відгуку системи, таких як дистанційна медицина, автономні транспортні засоби, роботизоване виробництво і управління енергетичними системами. У технології 5G середній показник затримки знижений до 1–5 мс, тоді як у 6G очікується його скорочення до 0,1 мс. Досягнення таких результатів стане можливим завдяки вдосконаленню фазових характеристик сигналу, зниженню часу обробки пакетів, впровадженню edge-обчислень і використання алгоритмів прогнозування трафіку.

Енергоспоживання в мережах наступних поколінь набуває значення, яке не поступається важливістю швидкості. Передбачено, що в системі 6G витрати

енергії на передачу одного біта інформації зменшаться до рівня 1 пДж/біт. Для цього планується використовувати енергоефективні методи модуляції, когнітивне управління ресурсами, динамічний розподіл потужності і оптимізація алгоритмів обробки сигналів.

Спектральна ефективність визначає, скільки інформації можна передати через одиницю смуги частот. В системах 4G цей показник складав до 10 біт/с/Гц, у 5G він перевищив 30 біт/с/Гц, а в 6G націлюється на подолання позначки в 50 біт/с/Гц.

Для досягнення таких результатів впроваджуються сучасні методи, такі як просторове мультиплексування, бімформінг (beamforming), когерентний прийом та адаптивна модуляція. Особливе значення має використання методів модуляції, які забезпечують високу ефективність за мінімальної чутливості до шумів та фазових коливань. Такі вимоги найкраще виконуються фазорізницевою модуляцією високих порядків.

1.2.2 Обмеження частотного спектра як глобальний виклик

Частотний спектр є природним і обмеженим ресурсом, використання якого набуває дедалі більшої актуальності через зростання кількості користувачів та підключених пристроїв. У традиційних діапазонах які нижче 6 ГГц вже спостерігається майже повне заповнення, тоді як застосування міліметрових та терагерцових частот стикається з проблемами високих втрат сигналу, нестійкого поширення і зростання рівня перешкод.

Сучасні системи, які реагують на ці виклики, спрямовані на розвиток когнітивних технологій управління спектром. Це включає в себе адаптивний та динамічний розподіл частот, за допомогою спільного використання спектра (spectrum sharing) та гнучкого перемикання робочих діапазонів залежних від умов навколишнього середовища.

Мережі 6G трактують частотний спектр не так як статичний ресурс, а як інтелектуальне середовище, яким керують алгоритми штучного інтелекту. Це дозволяє досягти максимальної пропускної здатності за мінімального рівня завад.

1.2.3 Вплив завад, шумів і багатопроменевого розповсюдження

У реальних умовах сигнал, що передається і стикається з явищами, такими як багатопроменеве розповсюдження, інтерференція, фазові коливання та теплові шуми приймачів. У міських середовищах кожен переданий символ може досягати приймача різними шляхами з різними затримками і фазами, що призводить до ефекту завмирань (fading).

Це критично для міліметрових та терагерцових діапазонів, де навіть незначні перешкоди, наприклад, дощ, скло або присутність людського тіла, суттєво погіршують якість сигналу.

Для зниження впливу цих чинників у сучасних мережах впроваджуються техніки просторового формування променя, цифрової компенсації фазових зсувів, використання мультиантенних систем MIMO, алгоритми виправлення помилок (FEC) та фазорізницева модуляція. Остання техніка просторового формування променя має вплив фазових коливань, значно збільшуючи надійність передачі даних.

На відміну від традиційних методів модуляції, фазорізницева модуляція не вимагає точного визначення абсолютної фази несучої частоти. Що забезпечує підвищену стійкість до фазових шумів та робить передачу більш надійною навіть при низькому співвідношенні сигнал до шуму.

1.2.4 Способи підвищення ефективності використання спектра

Сучасний розвиток телекомунікацій зосереджений на досягненні максимальної інформаційної ємності за мінімального використання ресурсів. Для цього застосовуються такі технологічні рішення

Адаптивна модуляція і кодування (AMC), така технологія дозволяє автоматично вибрати найоптимальніший тип модуляції залежно від поточного стану каналу зв’язку.

Масивні MIMO-системи, що дають змогу здійснювати просторове мультиплексування і передавати кілька потоків даних одночасно, які значно розширює можливості системи.

Когнітивне радіо, що визначає доступні частотні діапазони і змінює робочу частоту динамічно, уникаючи взаємних перешкод.

Фазорізницева модуляція високих порядків (DPSK, DQPSK, D8PSK), що забезпечує високу спектральну ефективність, стабільність роботи і енергоефективність, яка має вирішальне значення для майбутніх мобільних систем.

Отже, можемо зробити висновок що підвищення ефективності використання спектра разом із удосконаленням методів модуляції є ключовими напрямками розвитку телекомунікацій нових поколінь. Застосування фазорізницевої модуляції високих порядків відкриває нові перспективи для збільшення пропускної здатності, покращення стійкості до завад та створення більш адаптивних і енергоефективних систем зв’язку.

1.3 Методи цифрової модуляції в системах мобільного зв’язку

Розвиток мобільних телекомунікаційних систем тісно пов’язаний з удосконаленням методів модуляції. Цей процес визначає спосіб перетворення інформаційного сигналу в електромагнітну форму, що підходить для передачі через радіоканал. Завдяки модуляції забезпечується ефективне використання частотного спектра, стійкість до перешкод та можливість швидкісного передавання цифрових даних.

Загалом розрізняють аналогові і цифрові методи модуляції. Перші покоління систем мобільного зв’язку (1G) базувалися на аналогових схемах, таких як AM і

FM. Проте з переходом до цифрових стандартів (2G та інших) основою стали цифрові методи модуляції, такі як ASK, FSK, PSK та їхні комбінації.

1.3.1 Типи модуляцій

1. Амплітудна модуляція (AM, ASK — Amplitude Shift Keying). Основна ідея цієї модуляції полягає у зміні амплітуди несучого сигналу відповідно до переданих бітів інформації. Головною перевагою ASK є її проста технічна реалізація. Водночас цей вид модуляції демонструє високу чутливість до амплітудних перешкод, який значно обмежує її застосування у мобільних комунікаційних системах.
2. Частотна модуляція (FM, FSK — Frequency Shift Keying). Основна ідея, це передавання даних, які здійснюється за допомогою зміни частоти несучого сигналу. Цей метод (FSK) вирізняється підвищеною стійкістю до амплітудних спотворень. Однак його основним недоліком є відносно низька спектральна ефективність. Частотну модуляцію активно використовують у стандарті GSM для керувальних каналів, а також у системах Інтернету речей (IoT), таких як LoRa.
3. Фазова модуляція (PM, PSK — Phase Shift Keying). У цьому методі дані кодуються шляхом зміни фази несучої хвилі. Завдяки високій спектральній ефективності і хорошій стійкості до шумів PSK лежить в основі багатьох сучасних цифрових стандартів. Серед популярних різновидів можна виділити BPSK (двійково-фазова), QPSK (чотирифазна) і також 8-PSK (вісімфазова) модифікації.
4. Квадратурна амплітудна модуляція (QAM — Quadrature Amplitude Modulation). Цей метод комбінує принципи фазової і амплітудної модуляцій, тому що дозволяє передавати кілька бітів інформації на один символ.

1.3.2 Модуляції високих порядків

У мережах з 4G по 6G для досягнення найбільшої швидкості передачі застосовуються модуляція високих порядків, де зростає кількість можливих станів сигналу.

Наприклад, 256-QAM має 256 комбінацій фази і амплітуди, яка дозволяє передавати 8 бітів за символ. Це підвищує спектральну ефективність, однак робить систему більш вразливоюдо завад.

Збільшення порядку модуляції спричиняє зменшення енергетичної дискретності між станами, тому при зниженні SNR стрімко зростає рівень бітових помилок (BER).

Це означає, що в умовах дійсного радіоканалу (де наявні флуктуації фази, згасання, багатопроменевість) ефективність високо порядкових QAM або PSK суттєво спадає.

Саме тому постає потреба у нових методах модуляції, здатних зберігати високу ефективність навіть при низькому співвідношенні сигнал/шум. Одним із таких методів є фазорізницева модуляція (Differential PSK, DPSK), що не потребує точного вимірювання фази несучої та забезпечує стійкість у нестабільних каналах.

1.3.4 Переваги і недоліки основних різновидів цифрової модуляції

У сучасних сполученнях мобільного зв'язку вживаються різні види модуляцій, кожен із яких має власні сильні і слабкі сторони. Розуміння цих характеристик дозволяє добирати найкращі методи подачі даних залежно від умов каналу і вимог до розряду, витривалості і спектральної придатності.

1. Амплітудна модуляція (ASK / AM)

Переваги: Надійність реалізації, невисокі потреби до апаратної бази. Легко вбудовується у головні канали передачі.

Недоліки: Значна вразливість до амплітудних перешкод і шумів. Низька спектральна придатність, що обмежує розряд передачі в умовах заповненого спектра. Застосовується переважно у простих каналах контролю або коротко-періодних системах.

2. Частотна модуляція (FSK / FM)

Переваги: Вища стійкість до амплітудних перешкод порівняно з ASK. Підходить для зашумлених каналів, стабільна робота при зміні потужності сигналу.

Недоліки: Низька спектральна придатність, складність реалізації відповідних швидкостях передачі. Так здебільшого для мало швидкісних цифрових каналів або сигналізації.

3. Фазова модуляція (PSK — BPSK, QPSK, 8-PSK)

Переваги: Висока спектральна ефективність, придатність до амплітудних коливань сигналу. Поширена в поточних мобільних сполученнях, як-от GSM, LTE та 5G.

Недоліки: Вимагає точного синхронізованого відстеження фази в приймачі, яке необхідне для когерентної демодуляції. Чутлива до фазових шумів і інтерференції в складних комунікаційних каналах.

4. Квадратурна амплітудна модуляція (QAM — 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM)

Переваги: Інтегрує фазову і амплітудну модуляцію, що дозволяє передавати значний об'єм інформації у вигляді бітів за один символ, забезпечуючи високу спектральну ефективність. Завдяки цьому QAM широко застосовується в стандартах зв'язку, таких як LTE, Wi-Fi і також 5G.

Недоліки: Має високу чутливість до шумів та інтерференції. Високі порядки модуляції потребують значного співвідношення сигнал до шуму (SNR) для надійної роботи. Стає нестійкою в умовах каналів з багатопроменевим розповсюдженням або фазовими зсувами.

5. Фазорізницева модуляція (DPSK, DQPSK, M-DPSK)

Переваги: Не потребує точного опорного сигналу для декодування фази, яка підвищує стійкість до фазових спотворень і шумів. Добре підходить для застосування в нестабільних комунікаційних каналах, у високочастотних діапазонах, а також у системах OFDM і MIMO.

Недоліки: Демонструє вищий рівень бітових помилок (BER) порівняно з когерентною фазовою модуляцією PSK за ідеальних умов. Реалізація у базових

приймачах є більш складною через потребу у додаткових обчисленнях для забезпечення демодуляції різниці фаз.

Отже, вибір методу модуляції завжди передбачає компроміс між такими показниками як спектральна ефективність, стійкість до шумів та спотворень, простота технічної реалізації і вимоги до енергоспоживання. У контексті сучасних телекомунікаційних мереж п'ятого та шостого поколінь (5G/6G) ключовими критеріями залишаються стійкість до фазових спотворень, високий рівень SNR і адаптивність до змінних параметрів каналу. У зв'язку з цим технології DQPSK/DPSK та високопорядкові схеми QAM відіграють провідну роль у забезпеченні ефективності таких мереж.

1.3.5 Вплив порядку модуляції на якість сигналу

Збільшення порядку модуляції характеризується здатністю передавати більший обсяг інформації, який водночас висуває підвищені вимоги до якості каналу передачі даних. Важливим параметром, що визначає здатність системи до коректного декодування символів, є співвідношення сигналу до шуму (Signal-to-Noise Ratio, SNR). Наприклад, для модуляції типу QPSK прийнятна якість досягається при рівні SNR приблизно 9–10 дБ, тоді як для схем високого порядку, таких як 64-QAM та 256-QAM, необхідні значно вищі показники більше ніж 20 дБ та близько 30 дБ відповідно. Якщо рівень шуму перевищує прийнятні певні значення, спостерігається суттєве зростання показника ймовірності помилки передачі бітів (Bit Error Rate, BER), який у свою чергу, спричиняє зниження швидкості передачі даних або потребує повторного надсилання пакетів.

Вибір типу модуляції завжди залишається компромісом між швидкістю передачі даних, стабільністю сигналу і енергоефективністю. У практичних сценаріях мережевих систем широко використовується механізм адаптивної модуляції, що передбачає динамічну зміну порядку модуляції залежно від актуальних умов каналу. Наприклад, у мережах п'ятого покоління (5G), при

кращих характеристик каналу, застосовується схема модуляції 256-QAM; але при погіршенні умов обирається менш складна модуляція, така як QPSK або BPSK.

Не дивлячись на численні переваги адаптивної модуляції, вона має обмежену ефективність у боротьбі із фазовими спотвореннями, що є типовими для систем передачі даних на високих частотах. У зв'язку з цим у наступному розділі буде розглянуто фазорізницеву модуляцію, яка виступає як перспективний метод для покращення стійкості і надійності передачі інформації в умовах складних радіоканалів.

1.4 Фазорізницева модуляція: принцип роботи та характеристики

Сучасні мобільні системи зв’язку функціонують у комплексних і змінних умовах радіоканалу, де саме якість сигналу зазнає впливу таких факторів, як багатопроменеве поширення, фазові шуми, ефект Доплера і інші перешкоди. У зв’язку з цим особливого значення набувають методи модуляції, що забезпечують стійкість до фазових спотворень та водночас підтримують високу спектральну ефективність. Одним із таких перспективних методів є фазорізницева модуляція (Differential Phase Shift Keying — DPSK).

1.4.1 Принцип роботи DPSK

Відмінність фазорізницевої модуляції (DPSK) від традиційної фазової модуляції (PSK) полягає в спосіб передачі інформації: замість абсолютних значень фази несучої використовується різниця фаз між поточним та попереднім символами. Інформація передається за допомогою визначення того, чи змінюється фаза сигналу відносно попередньої.

У двійковій фазорізницевій модуляції (DBPSK) символ "1" передається шляхом зміни фази на 180°, а символ "0" через збереження поточної фази без змін. Цей метод спрощує роботу приймача, оскільки йому не потрібно точно відновлювати опорну фазу сигналу. Така особливість є особливо корисною для

мобільних і супутникових систем, де фаза сигналу може швидко варіюватися через рух користувача або нестабільність каналу передачі.

Математичне представлення сигналу має вигляд:

$$s_k(t) = A\cos(\varpi_0 t + \phi_k),$$

де ϕ_k — фаза на k-му інтервалі передачі, що визначається рекурентно:

$$\phi_k = \phi_k - 1 + \Delta\phi_k.$$

На стороні прийому сигналу піддається процесу диференціальної демодуляції, при якому фаза визначається не в абсолютному вираженні, через порівняння фаз двох послідовних символів.

$$r_k \cdot r_{k-1}{}^* = e^{j(\phi_k - \phi_k - 1)},$$

Це забезпечує можливість ідентифікації зміни фази, яка фактично представляє інформаційний біт. Отже, метод DPSK не вимагає когерентної синхронізації сигналів, а лише передбачає відносне порівняння фаз між сусідніми сигналами.

1.4.2 Типи фазорізницевої модуляції

Фазорізницева модуляція має декілька варіантів втілення, яка відрізняється за кількістю фазових станів:

1. DBPSK (Differential Binary PSK) — це бінарна версія з двома фазовими станами (0° і 180°).
2. DQPSK (Differential Quadrature PSK) — це квадратичний варіант із чотирма фазовими станами (0°, 90°, 180°, 270°), що забезпечує передачу 2 бітів інформації на символ.
3. M-DPSK — це узагальнений тип, у якому число фазових станів дорівнює $M = 2^N$, який дозволяє передавати n бітів даних за один символ.

З підвищенням порядку модуляції збільшується швидкість передачі даних, проте знижується стійкість до завад. Тому вибір конкретного виду DPSK залежить від властивостей каналу зв’язку та співвідношення сигнал/шум (SNR).

Переваги фазорізницевої модуляції:

1. Стійкість до фазових шумів і коливань генераторів. Оскільки дані кодуються через зміну фази, а не через її абсолютне значення, DPSK менше залежить від збурень у частоті носійного сигналу, який є особливо актуальним для систем із рухомими користувачами.
2. Відсутність потреби у когерентному прийомі. Це спрощує конструкцію приймальної апаратури, зменшує енергоспоживання і знижує вимоги до синхронізації.
3. Підвищена надійність у важких умовах. Метод демонструє ефективність у багатопроменевих каналах, при швидкій зміні середовища передачі або слабкому сигналі.
4. Сумісність із сучасними технологіями. DPSK знаходить застосування у зв’язкових системах 3G (WCDMA), 4G (LTE), 5G NR, а також в оптичних та супутникових каналах зв’язку.

Недоліки фазорізницевої модуляції можна визначити наступними аспектами:

1. Підвищена ймовірність виникнення бітових помилок (BER) у порівнянні з когерентною фазовою маніпуляцією (PSK) за однакового рівня співвідношення сигналу до шуму (SNR), що орієнтовно перевищує на 3 дБ.
2. Накопичення каскадних помилок: якщо визначення фази попереднього символу виконано некоректно, виникла похибка може передаватися на наступні символи, якщо збільшує загальний рівень помилок.
3. Зниження ефективності при використанні модулювань високих порядків типу M-DPSK. У цьому випадку невеликі відмінності фаз стають складнішими для точного розпізнавання, особливо в умовах роботи каналу із значним шумовим впливом.

Фазорізницева модуляція представляє компромісне, але функціонально ефективне рішення між високою точністю когерентних методів та спрощеною реалізацією не когерентних систем. Її застосування забезпечує значну стійкість зв’язку, знижуючи вплив фазових шумів і оптимізуючі проектування приймальних пристроїв, при цьому мінімізуючи втрати якості передачі інформації.

Зважаючи на ці характеристики, методи фазорізницевої модуляції, такі як DPSK і її модифікації (DQPSK, π/4-DQPSK, 8-DPSK), набули поширеного застосування в сучасних радіотехнологіях. Вони розглядаються як ключові технології для майбутніх систем зв’язку шостого покоління (6G), що вимагатимуть адаптивних, енергоефективних та стабільних рішень для ефективної передачі даних у складних умовах.

1.5 Застосування фазорізницевої модуляції у сучасних телекомунікаційних системах

У процесі еволюції телекомунікаційних технологій фазорізницева модуляція (Differential Phase Shift Keying, DPSK) і її варіації стали невід'ємним компонентом цифрових систем зв’язку, які відповідають сучасним вимогам до надійності, спектральної ефективності і простоти реалізації. Завдяки високій стійкості до фазових нестабільностей і зменшеним вимогам щодо когерентної синхронізації, технологія DPSK, разом із її модифікаціями, отримала широке впровадження у мобільних, супутникових, оптичних і навіть квантових телекомунікаційних мережах.

1.5.1 Використання DPSK та DQPSK у мобільних мережах (3G, 4G, 5G)

З початком ери мобільного зв’язку третього покоління (3G) фазорізницева модуляція стала основним елементом у забезпеченні високошвидкісної передачі даних. У стандарті WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) застосовувалася π/4-DQPSK — різновид диференціальної квадратурної фазової модуляції. Ця технологія забезпечувала стабільність сигналу під час швидкого

пересування користувачів, а також мінімізувала вплив фазового зсуву, спричиненого Доплерівським ефектом.

Така модуляція дозволила досягти ефективного балансу між швидкістю передачі даних (до 384 кбіт/с у початкових системах 3G) та надійністю зв’язку навіть у складних умовах радіоканалу.

У четвертому поколінні мобільного зв’язку (4G, LTE) основним методом стала модуляція QAM (Quadrature Amplitude Modulation). Однак DQPSK залишається актуальною для каналів керування і низькошвидкісних потоків, де стабільність має пріоритет над максимально можливою швидкістю. Це особливо важливо для uplink-з'єднань (від користувача до базової станції), де через низьку потужність передавача мобільних пристроїв спостерігаються значні фазові флуктуації.

У системах п’ятого покоління (5G NR) продовжується дослідження й інтеграція фазорізницеваї модуляції високих порядків для підсистем управління і IoT-пристроїв. Наприклад, π/2-DQPSK показує гарну сумісність із технологією OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), яка є базою для 5G, забезпечуючи низький рівень взаємної інтерференції між піднесучими частотами. У сфері mMTC (massive Machine-Type Communication), яка орієнтується на численні малопотужні пристрої, диференціальна модуляція сприяє зменшенню енергоспоживання і спрощенню апаратної реалізації передавачів.

1.5.2 Застосування у супутникових системах

У супутникових каналах зв’язку, де сигнал часто зазнає суттєвих фазових змін через атмосферні умови, шум генераторів чи великі затримки передачі, DPSK і M-DPSK демонструють значну ефективність. За таких обставин когерентна синхронізація є складною або взагалі недоцільною, що робить диференціальну передачу інформації оптимальним рішенням.

Відомі супутникові системи, такі як Inmarsat, Iridium та VSAT, використовують різновиди DQPSK і 8-DPSK для забезпечення стабільності

зв’язку навіть за умови значних фазових коливань. Такі методи модуляції мінімізують вимоги до точності фазової синхронізації і дозволяють гарантувати надійність з’єднання на рівні понад 99,9% у глобальних мережах.

1.5.3 Використання у волоконно-оптичних системах зв’язку

Фазорізницева модуляція набула значної популярності у волоконно-оптичних системах передачі даних, де основними викликами є дисперсія, фазовий шум лазера та нелінійні ефекти в оптичному волокні. У таких системах часто застосовують DPSK і Differential Quadrature Phase Shift Keying (DQPSK), які дозволяють підвищити спектральну ефективність без значного ускладнення процесів демодуляції.

Системи DQPSK забезпечують вдвічі більшу швидкість передачі даних порівняно з BPSK шляхом передачі двох бітів за один символ, а також знижують вимоги до стабільності лазера. Інноваційні DWDM-системи (Dense Wavelength Division Multiplexing) зі швидкістю передачі даних до 400 Гбіт/с та більше часто базуються саме на DQPSK, оскільки ця технологія ефективно долає міжканальні інтерференції й забезпечує стабільну роботу на великих дистанціях.

1.5.4 Інтеграція фазорізницевих модуляцій у технології OFDM та MIMO

У сучасну епоху багатоканальних технологій, зокрема OFDM (ортогональне частотне мультиплексування) та MIMO (Multiple Input Multiple Output), актуальним стає питання впровадження фазорізницевих методів у ці структури. Метод DPSK у комбінації з OFDM дає змогу створити канал передачі, стійкий до фазових викривлень, через диференціальну передачу фази кожної піднесучої. Це значно спрощує когерентний прийом і покращує стійкість системи в умовах високого рівня шуму.

У MIMO-системах, що працюють із багатопроменевими каналами, диференціальні методи модуляції можуть бути використані для зменшення потреби в складному процесі оцінювання каналу. Такі підходи активно

спостерігаються в розвитку технологій 5G і майбутніх 6G-мереж, де очікується застосування Differential Space-Time Modulation (DSTM), який поєднує просторово-часове кодування з фазорізницевими методами для підвищення швидкості і завадостійкості навіть в умовах складних середовищ.

1.5.5 Перспективні напрями досліджень

Серед основних напрямів сучасних досліджень у сфері фазорізницевих модуляцій виділяють наступні:

1. Розробка схем високого порядку (наприклад, 16-DQPSK, 64-DPSK), для досягнення вищих швидкостей передачі при адаптивному керуванні SNR.
2. Впровадження адаптивної фазорізницевої модуляції, здатної автоматично підлаштовуватися до умов передачі, коригуючи порядок модуляції залежно від рівня шумів.

Інтеграція DPSK із технологіями штучного інтелекту (AI) для оптимізації процесів демодуляції і виявлення символів у динамічно змінюваних умовах.

Застосування у квантових та оптичних когерентних мережах нового покоління (6G Optical Networks), де DPSK може бути використана для фазового кодування квантових бітів.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФАЗОРІЗНИЦЕВОЇ МОДУЛЯЦІЇ ВИСОКИХ ПОРЯДКІВ У СКЛАДНИХ УМОВАХ РАДІОКАНАЛУ

У другому розділі проведено дослідження математичних, технічних і завадостійких характеристик фазорізницевої модуляції високих порядків (M-DPSK) у контексті її застосування в мобільних телекомунікаційних мережах нового покоління. Основну увагу приділено аналізу показників BER, впливу фазових коливань, доплерівських зрушень і фейдингових процесів, що є критично важливими для систем 5G та 6G. Окрім цього, виконано порівняння M-DPSK із традиційними схемами кутової і квадратурної амплітудної модуляції для визначення оптимальних режимів роботи.

2.1 Математична модель фазорізницевої модуляції високих порядків

Фазорізницева модуляція високих порядків (M-DPSK) одна із перспективних інструментів, яка застосовуються для підвищення стійкості і збільшення пропускної здатності мобільних радіомереж нового покоління. Основною її відмінністю від класичної фазової модуляції є спосіб передачі інформації. А саме замість абсолютних значень фази використовується різниця фаз між двома сусідніми символами. Такий підхід усуває потребу в складних системах синхронізації несучої, яка має ключове значення для ефективної роботи мобільних терміналів у динамічних каналах зв’язку.

Математично переданий символ M-DPSK описується формулою 2.1:

$$s_k = Aexp[j(\varphi_{k-1} + \Delta\varphi_k],$$

де $\Delta\varphi_k = \frac{2\pi m}{\mathrm{M}}$ - фазовий приріст, який відповідає m-му символу;

$\varphi k - 1$- – фаза попереднього символу;

M – порядок модуляції (наприклад 8-DPSK, 16-DPSK);

A – амплітуда.

У каналі з фейдінгом Rayleigh/Rician прийнятий сигнал формула 2.2:

$$r_k = s_k h_k + n_k$$

де h_k — комплексний коефіцієнт каналу, n_k — адитивний шум.

Диференційний прийом здійснюється за формулою:

$$z_k = r_k r_{k-1},$$

а рішення про символ приймається за мінімумом фазової різниці формула 2.3:

$$m_k = argmin \left| arg(zk) - \frac{2\pi m}{\mathrm{M}} \right|$$

Таким чином, робота приймача не залежить від абсолютної фази несучої, яка робить M-DPSK придатною для мобільних високошвидкісних каналів, де фазові флуктуації є значними.

2.2 Аналіз впливу співвідношення сигнал/шум (SNR) на рівень бітових помилок (BER)

Співвідношення сигналу до шуму (Signal-to-Noise Ratio, SNR) виступає як фундаментальний показник, який характеризує якість прийому сигналів у цифрових телекомунікаційних системах. У контексті модуляції типу DPSK (Differential Phase Shift Keying) рівень бітових помилок (Bit Error Rate, BER) прямо пов'язаний з відносною перевагою корисного сигналу над шумовим впливом у середовищі передачі даних. Як видно з графіка на рис. 2.1, залежність BER від SNR для DBPSK має експоненційний характер.

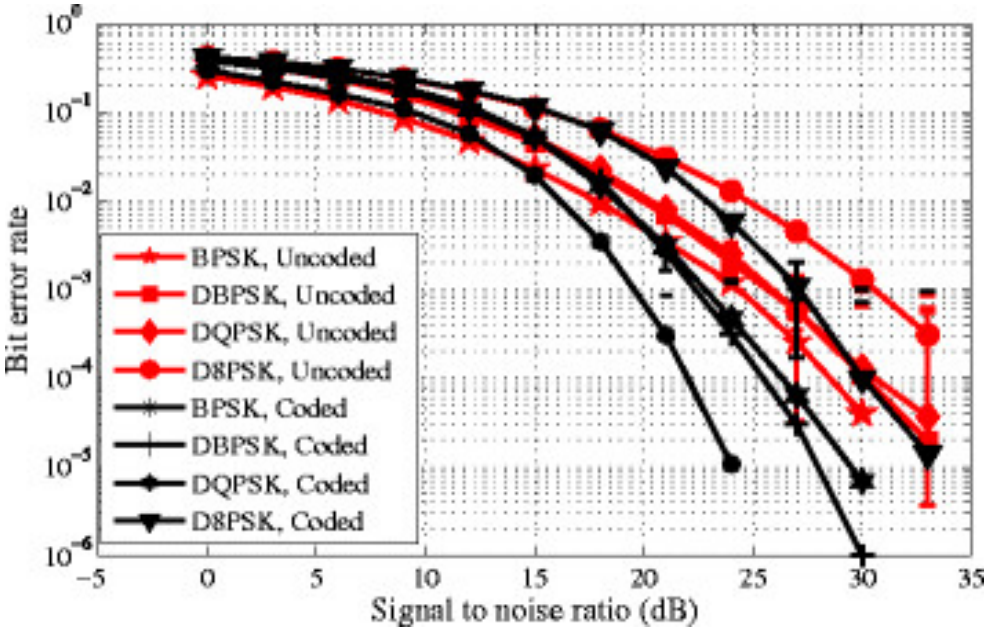


Рис. 2.1 Залежність BER від SNR для різних видів DPSK

2.2.1 Основна математична залежність BER від SNR для DPSK

Рівень бітових помилок (BER — Bit Error Rate) є визначальним параметром якості радіоканалу, що характеризує ймовірність неправильного прийому біта через вплив шуму, фейдингу і інших перешкод. Для диференціальної фазової маніпуляції (DPSK) значення BER залежить від співвідношення сигнал/шум (SNR — Signal-to-Noise Ratio) та визначається тим, наскільки шум здатен спотворити фазовий приріст між двома сусідніми символами.

На відміну від когерентних методів фазової модуляції, таких як QPSK, DPSK не потребує відновлення абсолютної фази сигналу на приймачі. Однак це робить систему більш вразливою до випадкових миттєвих збурень фази, що безпосередньо впливає на взаємозалежність BER і SNR.

Математичний вираз BER для DBPSK

Для найпростішої диференціальної модуляції DBPSK (M=2) ймовірність бітової помилки у каналі AWGN описується формулою 2.4:

$$BER_{DBPSK} = \frac{1}{2} e^{-Eb/N0}$$

де

- Eb — енергія біта,
- $N0$ — спектральна густина шуму,
- $Eb/N0$— еквівалент SNR.

Ця формула показує, що залежність BER від SNR є експоненційною, тобто навіть невелике збільшення SNR суттєво покращує якість прийому. Ми можемо переконатися глянувши на рис. 2.2.

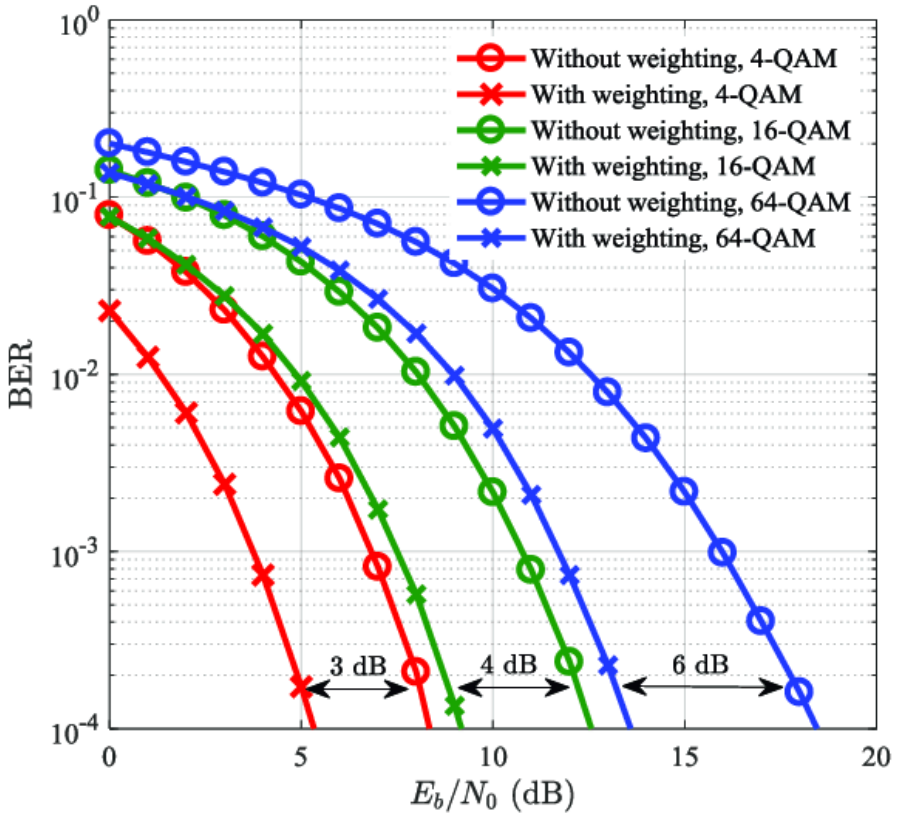


Рис. 2.2 Графік залежності BER від SNR для DBPSK у каналі AWGN (експоненційна крива)

2.2.2 Порівняння DBPSK та когерентної BPSK

Хоч DBPSK не потребує відновлення фази, його BER завжди гірший на 3 дБ порівняно з BPSK.

Це означає, що для досягнення однакової якості DBPSK потрібно збільшити SNR удвічі. Також ми можемо порівняти глянувши на порівняльну таблицю 2.1:

Таблиця 2.1

Порівняння DBPSK та когерентної BPSK

Характеристика	DBPSK(диференціальна фазова маніпуляція)	BPSK (когерентна фазова маніпуляція)
Тип прийому	Некогерентний	Когерентний
Потреба у відновленні несучої	Не потребує	Потребує високоточної PLL і синхронізації
Стійкість до фазових шумів	Висока	Середня
Чутливість до флуктуацій каналу	Нижча чутливість, бо рішення базується на різниці фаз	Вища чутливість, бо рішення базується на абсолютній фазі
Енергетична ефективність (BER при однаковому SNR)	Гірша на 3 дБ	Краща
Потрібний SNR для BER = 10^{-3}	≈ 10.5 дБ	≈ 7.5 дБ
Складність приймача	Низька	Середня/висока
Наявність помилок через шум у двох символах	Є: шум впливає на дві точки (k, k–1)	Немає: шум впливає лише н один символ
Стійкість до зсуву частоти (CFO)	Висока	Низька
Стійкість до швидкого фейдінгу	Висока	Низька/середня (залежить від якості синхронізації)
Сфера застосування	Мобільні канали, супутниковий зв’язок, IoT, військові системи	Оптоволокно, Wi-Fi, 5G, високоточні системи

Продовження таблиці 2.1

Характеристика	DBPSK(диференціальна фазова маніпуляція)	BPSK (когерентна фазова маніпуляція)
Швидкість синхронізації	Дуже висока, бо синхронізація не потрібна	Залежить від PLL, може бути повільною
Стійкість до багатопроменевості	Вища (немає потреби в точній фазі)	Низька без використання еквалайзерів
Спектральна ефективність	Та сама, що у BPSK	Та сама (1 bit/symbol)
Комбінація з FEC-кодами	Менш ефективна, ніж у BPSK	Дуже ефективна, FEC значно знижує BER
Типове застосування у стандарті	Старі стандарти GSM, супутникові системи	LTE, 5G NR, Wi-Fi (OFDM)

2.2.3 Геометрична інтерпретація впливу шуму

У DPSK передається не сама фаза, а її різниця між символами.

Шум викликає випадкове відхилення фаз $n_{ф}$, та BER визначається тим, чи перевищить шум половину фазового кроку. Для DBPSK фазовий приріст знаходиться у точках 0° і 180°.

Таким чином:

1. при низькому SNR шум сильно коливає фазу ⇒ BER високий;
2. при високому SNR фазові зрушення малі ⇒ BER низький.

Це також можна спостерігати на рис. 2.3:

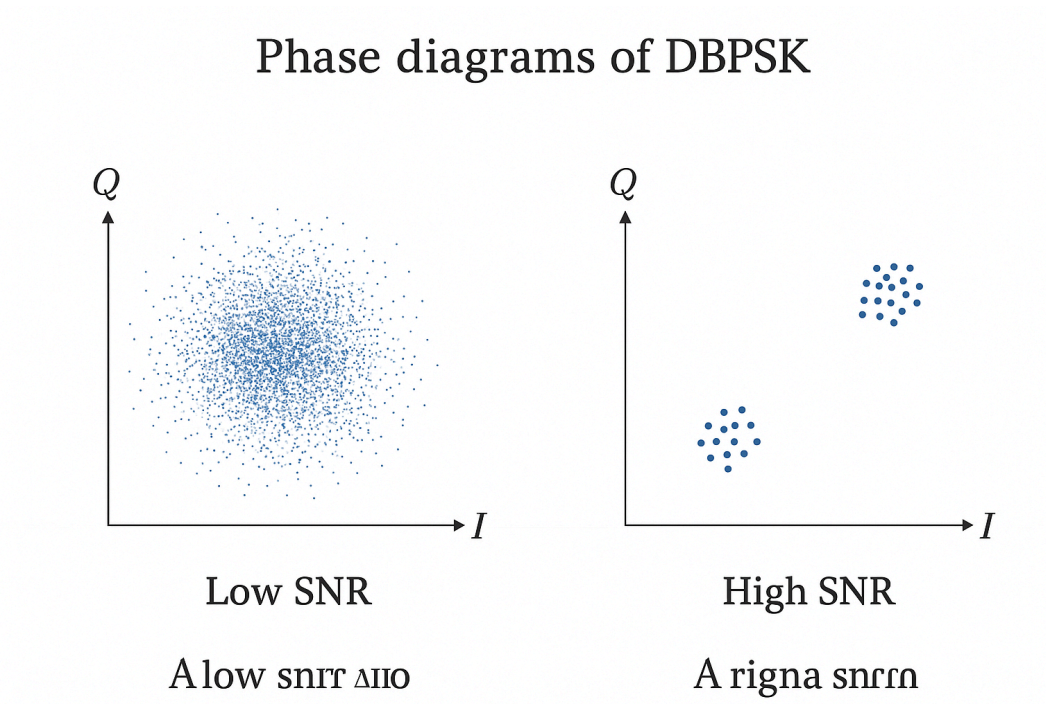


Рис. 2.3 Фазові діаграми DBPSK при різному SNR (багато шуму — «розмазана» фаза; високий SNR — чіткі кластери).

2.2.4 Залежність BER від SNR у логарифмічній шкалі

У телекомунікаційних дослідженнях графіки BER традиційно будують у напівлогарифмічному масштабі (вісь BER – логарифмічна). Це дозволяє легко оцінити якість системи (рис. 2.4).

Типовий графік DBPSK:

- нахил експоненційний,
- пряма лінія на SEMILOG-графіку,
- зміщений від BPSK на 3 дБ.

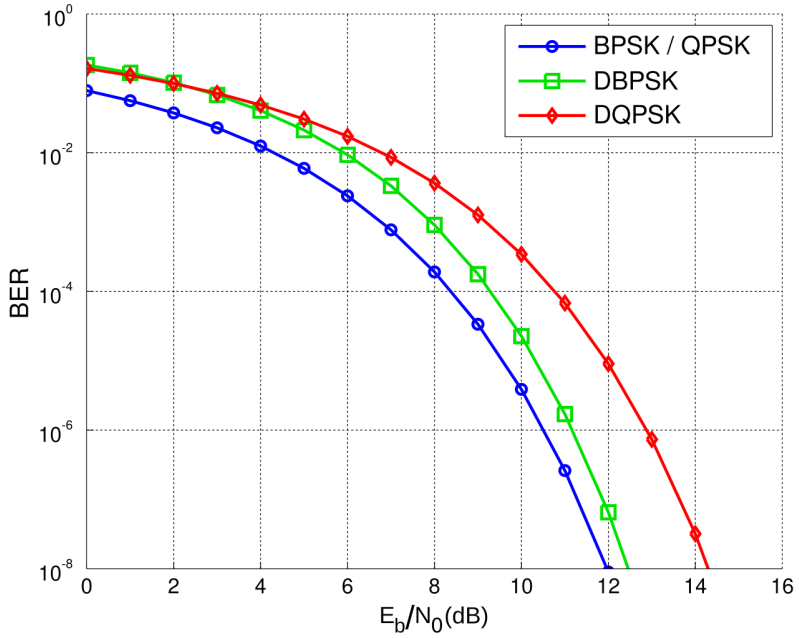


Рис. 2.4 SEMILOG графік BER–SNR для DBPSK.

2.5. Практичний вплив SNR–BER на телекомунікаційні системи

У телекомунікаційних системах ключовими показниками якості сигналу слугують співвідношення сигнал/шум (SNR) і бітова помилка (BER — Bit Error Rate). Ці параметри взаємопов'язані: низькі значення SNR спричиняють високе BER, тоді як високий рівень SNR допомагає зменшити частку помилок.

2.5.1 Вплив на якість передачі даних

Якість передачі даних у телекомунікаційних системах значною мірою залежить від співвідношення сигнал/шум (SNR), оскільки саме цей параметр визначає умови, за яких приймач може коректно ідентифікувати інформаційні біти. Зі збільшенням рівня шуму відносно сигналу системі стає складніше здійснити точну демодуляцію, що, у свою чергу, призводить до підвищення ймовірності бітової помилки (BER). Взаємозв'язок між SNR і BER є основним показником якості каналу зв'язку це можна поглянути на рис. 2.5.

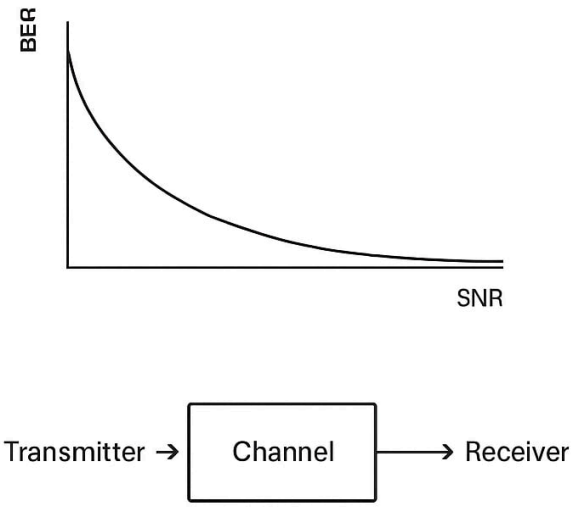


Рис. 2.5 Взаємозв'язок SNR та BER у телекомунікаційних системах

1. Вплив шумів на достовірність прийому сигналу

При низькому рівні SNR інформаційний сигнал піддається суттєвому впливу шумів, що призводить до зміщення або розмиття точок прийому на сигнальному сузір'ї. У результаті виникають труднощі з розпізнаванням переданих символів, а кількість помилкових бітів зростає. Для модуляційних схем, таких як DBPSK і QPSK, шум особливо небезпечний, оскільки здатний змінювати фазу сигналу, що є критично важливим для правильної демодуляції.

2. Вплив SNR на можливу швидкість передачі

У умовах низького співвідношення сигнал/шум (SNR) телекомунікаційна система змушена вживати наступних заходів для забезпечення надійності передачі даних:

1.знижувати порядок модуляції (від 16-QAM до QPSK або BPSK);

2.застосовувати потужні механізми корекції помилок (наприклад, FEC);

3.збільшувати інтервали між символами або виконувати повторну передачу пакетів.

Такі дії призводять до зменшення ефективної пропускної здатності каналу, навіть за збереження його номінальної продуктивності. Таким чином, рівень SNR

впливає не лише на частоту виникнення помилок, але й визначає доступну швидкість передачі даних.

3. Рівень якості обслуговування (QoS)

Рівень якості обслуговування (QoS) істотно залежить від показників SNR. Низький сигнал-шум негативно впливає на важливі параметри, зокрема:

- стабільність з’єднання;
- затримку (latency), спричинену повторними передачами;
- пропускну здатність даних;
- кількість втрат пакетів.

У сучасних системах, таких як LTE/5G, Wi-Fi або супутниковий зв’язок, цей вплив може проявлятися через:

- “заморожування” відео;
- зниження швидкості доступу до інтернету;
- спотворення якості переданого голосу;
- раптові розриви з’єднання.

Для забезпечення якісної передачі необхідно підтримувати рівень SNR, який гарантує залежну від системи допустиму величину BER (наприклад, не вище 10^{-5}).

4. Адаптація системи до поточного рівня SNR

Сучасні системи впроваджують адаптивні алгоритми, які автоматично налаштовують параметри передачі відповідно до рівня SNR. До таких механізмів належать:

- підбір схеми модуляції та кодування (AMC);
- регулювання потужності передавача;
- застосування технологій MIMO і просторового формування променя;
- гнучке коригування ширини смуги каналу.

Ці підходи дають змогу підтримувати допустимий рівень BER навіть за умов складного сигналу.

2.5.2 Вплив на мобільні та бездротові мережі

Мобільні та бездротові мережі відзначаються високою чутливістю до змін параметрів сигналу через особливості їх передачі через ефір. Основними факторами, що впливають на якість зв’язку, є співвідношення сигнал/шум (SNR), ймовірність помилки біта (BER) та швидкість передачі даних.

1. Особливості SNR та BER у мобільних мережах

Під час мобільності користувача сигнал нерідко зазнає затухання, мультипутових відображень і впливу перешкод. Зниження показника SNR безпосередньо призводить до підвищення BER, що викликає збільшення кількості помилок у переданих бітах. У сучасних бездротових технологіях, таких як LTE та 5G, критичне значення SNR для збереження високої швидкості передачі даних становить 10–15 дБ. При падінні показника нижче вказаного рівня помітно погіршується якість зв’язку (рис. 2.6).

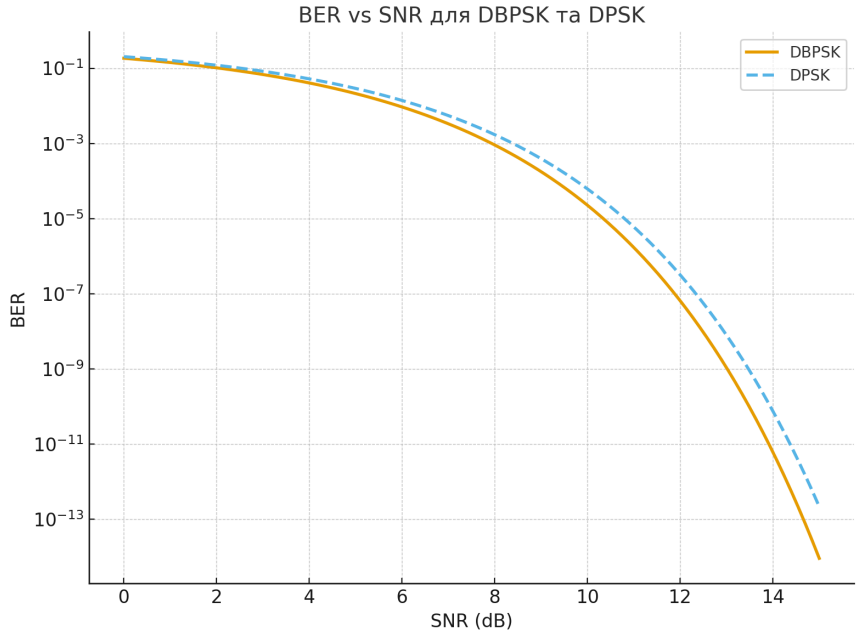


Рис. 2.6 SNR і BER у мобільних мережах

2. Мультипутовий ефект І інтерференція

У бездротових мережах сигнал може досягати приймача різними маршрутами внаслідок відбиття від будівель, дерев та інших перешкод. Це призводить до інтерференційних явищ, які змінюють амплітуду і фазу сигналу,

що, у свою чергу, збільшує показник помилок передачі (BER). Застосування технологій MIMO (Multiple Input Multiple Output) та адаптивного кодування допомагає частково мінімізувати ці впливи, покращуючи надійність зв’язку(рис. 2.7).

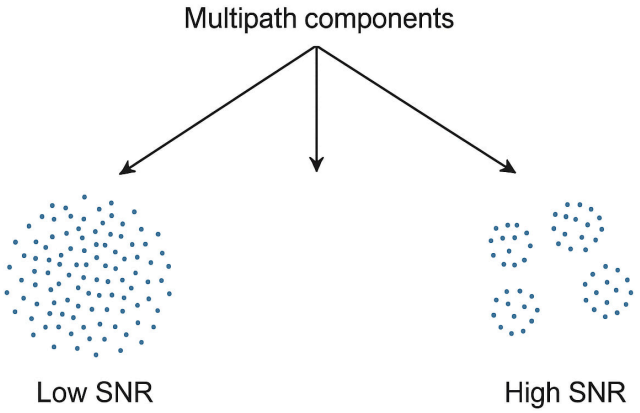


Рис. 2.7 Діаграма показує мультипутові шляхи та їх вплив на фазові кластери сигналу (розпливчасті при низькому SNR, чіткі при високому SNR).

3. Швидкість передачі даних та адаптивні алгоритми

При високому рівні BER мобільні мережі автоматично зменшують швидкість передачі інформації, використовуючи протоколи адаптивного модуляційного кодування (AMC). Це дозволяє зберегти стабільність з’єднання, хоча й ціною зниження пропускної здатності. Така ситуація безпосередньо впливає на користувачів: виникають затримки у відтворенні відео, перебої у роботі потокових сервісів, а також погіршується якість голосового зв’язку (рис. 2.8).

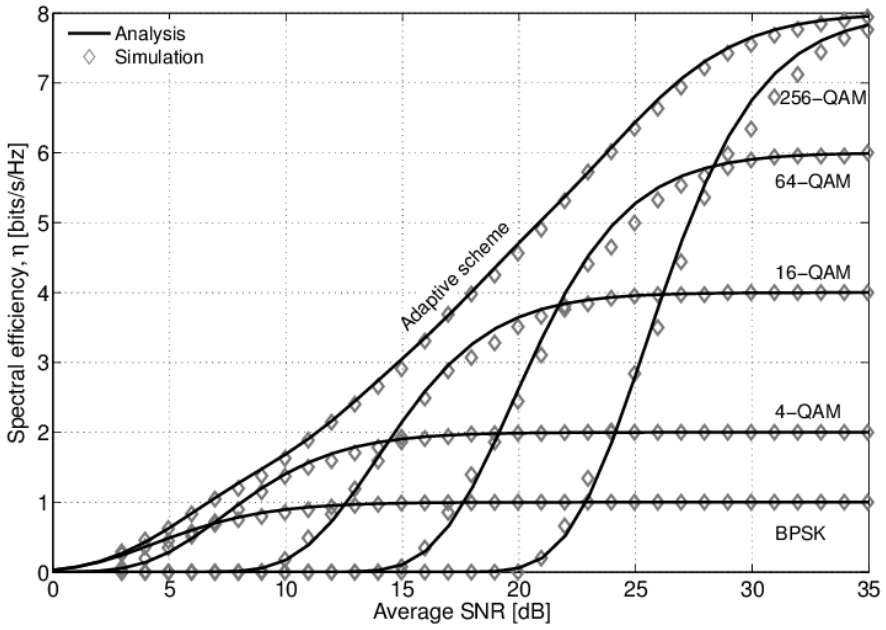


Рис. 2.8 Графік залежності швидкості передачі даних від рівня SNR: поетапне збільшення швидкості зумовлене адаптивною зміною схеми модуляції.

4. Вплив завад і перешкод у бездротових мережах

Радіочастотні перешкоди від зовнішніх пристроїв, таких як Wi-Fi, Bluetooth чи інші мобільні станції, знижують ефективний рівень сигнал або шуму (SNR), що призводить до зростання коефіцієнта помилок передачі даних (BER) і нестабільності з'єднання. Для вирішення цих проблем використовуються технології фільтрації, частотного планування та динамічної зміни каналів, які сприяють підвищенню надійності роботи мобільних мереж (рис. 2.9).

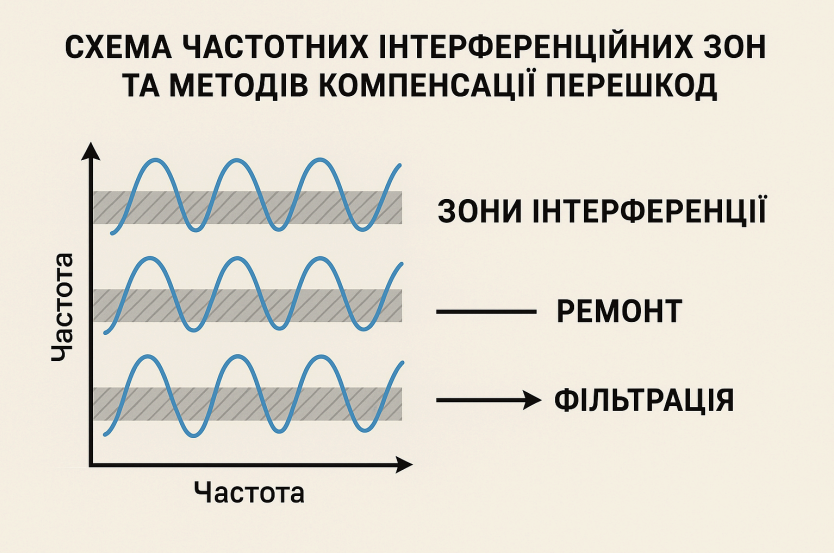


Рис. 2.9 Схема частотних інтерференційних зон та методів компенсації перешкод.

5. Практичні наслідки для користувачів

- Зниження якості голосового зв’язку та відеоконференцій.
- Падіння швидкості інтернет-з’єднання.
- Часті розриви сеансів під час руху (handovers у LTE/5G).
- Потреба в більшій потужності базових станцій та посиленні антен для компенсації втрат сигналу.

2.5.3 Практичні приклади

1. Супутниковий зв’язок

Через велику відстань і вплив атмосферних явищ показник SNR часто залишається низьким. Навіть невелике збільшення шуму, наприклад, унаслідок дощу, може підвищити рівень BER і призвести до втрати сигналу.

2. Wi-Fi та LTE/5G

У багатоквартирних будинках, де присутня велика кількість джерел перешкод, рівень BER зростає за умови слабкого сигналу. У таких випадках система автоматично знижує швидкість модуляції (з 64-QAM до QPSK), щоб забезпечити прийнятний рівень помилок у передачі даних.

3. Провідні системи (оптоволокно)

В оптоволоконних системах показники SNR надзвичайно високі, а BER практично рівний нулю. Однак пошкодження кабелю або виникнення перешкод можуть спричинити зростання BER, що вимагатиме виправлення помилок на апаратному рівні.

2.3 Вплив багатошляхо́вих ефектів та інтерференції на ефективність модуляції

У сучасних мобільних мережах передаваний сигнал часто стикається з різноманітними перешкодами та явищем багатошляхо́вого розповсюдження, що суттєво впливає на якість передачі даних. Основними чинниками, які знижують ефективність модуляційних схем у реальних умовах, є багатошляхо́ві ефекти та інтерференція, спричинена іншими сигналами або шумами.

2.3.1 Модель мультипутового каналу

Мультипутовий канал є типом каналу зв'язку, де сигнал надходить до приймача не тільки по прямому шляху, але й через декілька інших маршрутів, які виникають внаслідок відбиття, дифракції або розсіювання від різних об'єктів навколишнього середовища.

Основні характеристики мультипутового каналу включають:

1. Часові затримки. Через різну довжину маршрутів сигналу виникають різні затримки в його прийомі.
2. Затухання сигналу. Кожен маршрутизований шлях може по-різному впливати на величину сигналу через втрати, пов'язані з відбиттям або поглинанням.
3. Фазові зсуви. Сумування сигналів із різними фазами може призводити до явища інтерференції.

Математично мультипутовий канал представлений як лінійний дискретний канал, часова поведінка якого змінюється залежно від умов зовнішнього середовища формула.

$$r(t) = \sum_{i=0}^{L-1} \alpha_i s(t - \tau_i) + n(t)$$

де:

- r(t) – прийнятий сигнал,
- s(t) – переданий сигнал,
- αi – коефіцієнт затухання для iii-го шляху,
- τi – затримка iii-го шляху,
- L – кількість мультипутових компонентів,
- n(t) – адитивний білий гаусівський шум (AWGN).

Можна детально роздивитися на рис. 2.10.

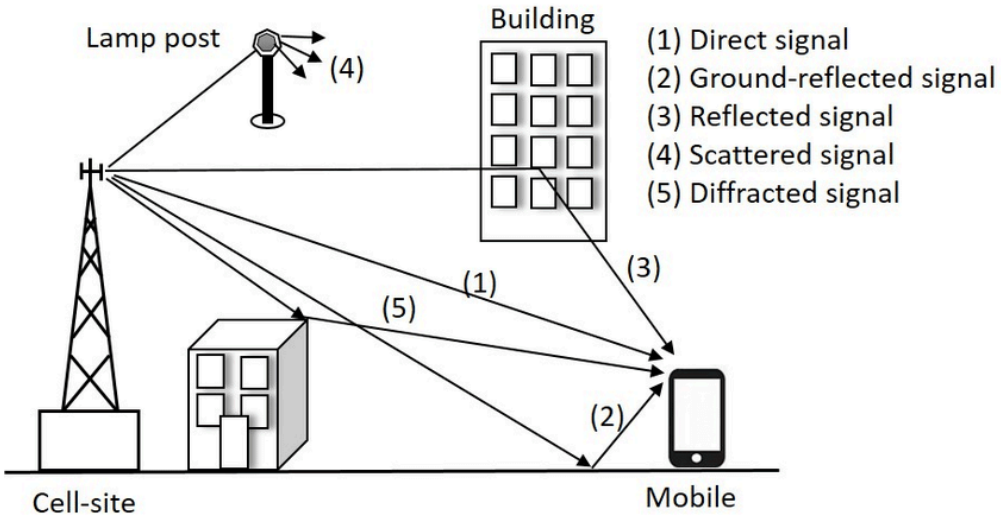


Рис. 2.10 Схема мультипутового каналу з прямим та відбитими шляхами від будівель та інших об’єктів

2.3.2 Розсіювання сигналу та фазові кластери

Мультипутові канали суттєво впливають на якість приймання фазорізницевих сигналів, таких як DPSK або QPSK. Одним із головних наслідків мультипутового поширення є розсіювання сигналу, що проявляється як у часовій, так і у фазовій площинах.

Розсіювання у часовій площині виникає через те, що різні компоненти сигналу проходять шляхи різної довжини та з різною затримкою. У результаті приймач отримує накладання сигналів із часовими зсувами, що спричиняє інтерсимвольну інтерференцію (ISI). Це явище призводить до накладання символів, які передаються послідовно, збільшуючи ризик помилок під час демодуляції.

Розсіювання у фазовій площині виникає через різницю у фазових зсувах сигналів, що надходять різними шляхами. У фазорізницевій модуляції інформація кодується через зміни фази сигналу, тому будь-які фазові викривлення, спричинені мультипутовими ефектами, безпосередньо впливають на точність відновлення переданих даних.

На фазовій діаграмі в просторі I-Q це помітно у вигляді розмитих фазових кластерів.

За умов низького співвідношення сигнал/шум (SNR) та значного впливу мультипутового розсіювання, символічні кластери розмиваються, частково перекриваючись, що ускладнює точну демодуляцію сигналу. При високому співвідношенні SNR фазові кластери проявляються більш чітко й виразно, дозволяючи приймачу безпомилково ідентифікувати символи.

Також важливо зазначити, що мультипутовий сигнал може спричиняти як конструктивну, так і деструктивну інтерференцію. Конструктивна інтерференція підсилює амплітуду сигналу, тоді як деструктивна знижує її, впливаючи не лише на фазу, але й на рівень потужності сигналу, а отже, на SNR на вході приймача.

У сучасних мобільних мережах для мінімізації такого впливу використовуються різноманітні технології:

- Канальне еквалайзування (channel equalization), яке компенсує затримки та згасання мультипутових компонентів.
- Технології просторової диверсії та MIMO, що забезпечують одночасний прийом сигналу через кілька незалежних шляхів, підвищуючи ймовірність його правильного декодування.
- OFDM-модуляція, яка ділить сигнал на ряд піднесучих частот із мінімізацією міжсимвольних перешкод (ISI).

Таким чином, ефект мультипутового розсіювання та формування фазових кластерів є ключовим фактором характеристики каналу, який впливає на ефективність фазових модульованих схем. Їхнє коректне моделювання та компенсація є необхідними для забезпечення високої надійності передачі даних у мобільних мережах нового покоління.

2.3.3 Симуляції BER у мультипутових умовах

Одним із визначальних параметрів якості цифрового передавання даних є ймовірність помилки бітів (BER). У мультипутових каналах цей показник значною мірою залежить від співвідношення сигнал/шум (SNR), кількості мультипутових шляхів, а також від затухання й фазових зсувів, що виникають під час проходження сигналу через середовище передачі. Для аналізу впливу мультипутових ефектів на ефективність фазорізницевих схем модуляції застосовуються комп’ютерні симуляції. У цих симуляціях сигнал моделюється проходженням через мультипутовий канал із різними коефіцієнтами затухання та часу затримки шляхів, після чого додається адитивний білий гаусівський шум (AWGN). Модульовані послідовності бітів DBPSK або DPSK передаються через цей канал, а на приймальній стороні виконується демодуляція та оцінка кількості помилок. Це дає змогу обчислити параметр BER як відношення числа неправильно визначених бітів до загальної кількості переданих.

Результати симуляцій показують, що вплив мультипутових ефектів суттєво підвищує BER у порівнянні з каналом, де присутній лише адитивний шум (AWGN). Навіть за середніх значень SNR (10–15 дБ) спостерігається значне зростання кількості помилок, що зумовлено фазовим розсіюванням і інтерференцією сигналів. Збільшення кількості мультипутових шляхів призводить до подальшого росту BER, особливо за умови нерівномірного затухання. У таких випадках слабкі шляхи підсилюють деструктивну інтерференцію. Порівняльний аналіз модуляційних методів демонструє більшу стійкість DBPSK до фазових зсувів у мультипутових каналах. Водночас DPSK є менш чутливим до AWGN, але більш вразливим до інтерференції, що ілюструє компроміс між шумостійкістю та стійкістю до мультипутових ефектів. Як видно на рис. 2.11, зростання кількості мультипутових шляхів призводить до стрімкого збільшення BER при низькому SNR (рис. 2.11).

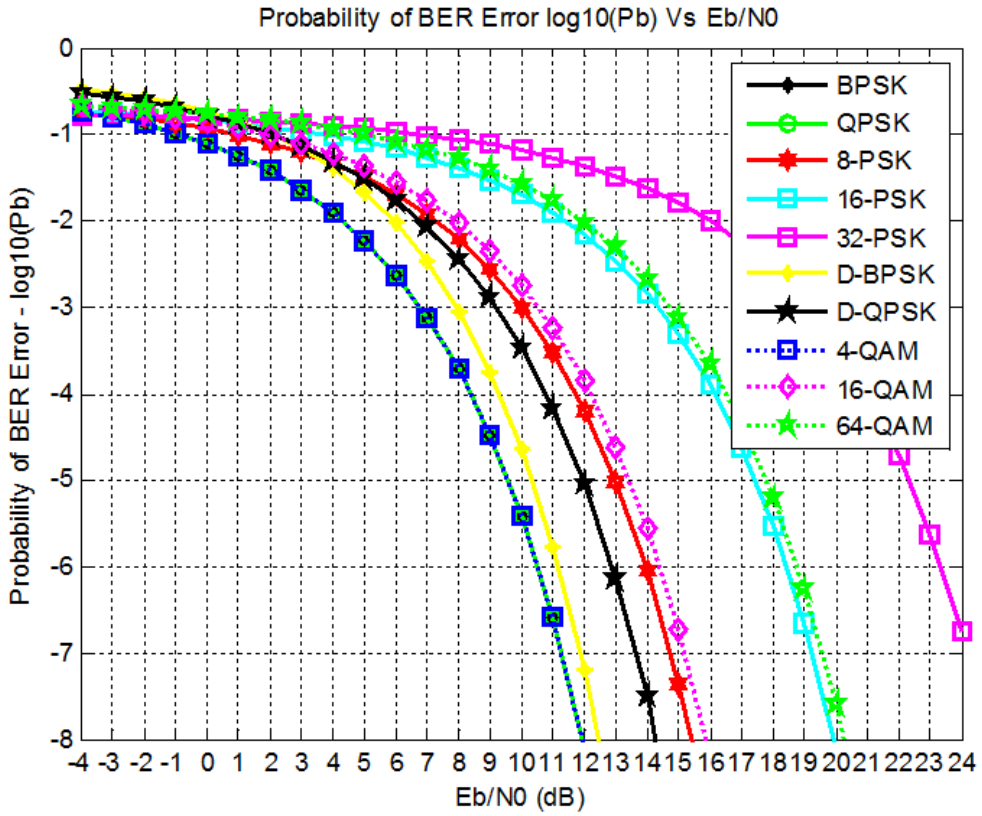


Рис. 2.11 Залежність ймовірності помилки бітів (BER) від співвідношення сигнал/шум (SNR) для DBPSK у каналі AWGN та мультипутових каналах (2 та 4 шляхи).

На фазовій діаграмі переданих сигналів ці закономірності відображаються у вигляді розмитих кластерів фаз за низького SNR і чітко сформованих кластерів за високого SNR, що безпосередньо корелює зі значенням BER. Мультипутові ефекти спричиняють як конструктивну, так і деструктивну інтерференцію, впливаючи не лише на фазу, але й на амплітуду сигналу, тобто на локальний рівень SNR на вході приймача. У сучасних мобільних мережах для зменшення впливу таких ефектів широко застосовуються методи компенсації, зокрема вирівнювання каналів, використання диверсійних антен і технології MIMO. Крім того, OFDM-модуляція істотно полегшує компенсування інтерсимвольної інтерференції завдяки розподілу переданого сигналу на кілька піднесучих.

Отже, проведені дослідження показують, що ефективність фазорізницевих схем модуляції в умовах мультипутових каналів тісно пов’язана із рівнем SNR, кількістю та характеристиками мультипутових шляхів, а також із вибором методів компенсації. Це підкреслює важливість подібних оцінок для вдосконалення цифрових систем мобільного зв’язку наступних поколінь.

2.4. Методи підвищення стійкості фазорізницевої модуляції

Ефективність фазорізницевих схем модуляції в мобільних мережах нового покоління значною мірою залежить від стійкості сигналу до впливу шумів, інтерференції та багатопроменевих ефектів. Як було зазначено в попередньому розділі, ці фактори значно підвищують ймовірність бітових помилок (BER), що знижує надійність передачі даних.

Для забезпечення високої якості зв’язку та мінімізації помилок застосовуються методи, спрямовані на підвищення стійкості модуляції. Вони забезпечують оптимальну передачу сигналу навіть за умов значних перешкод у радіоканалі. Основними методологіями є:

1. Методи виправлення помилок (FEC, Adaptive Error Correction), які дозволяють виявляти та коригувати помилки без повторного передавання даних. Це має особливе значення для високошвидкісних і мобільних каналів.
2. Адаптивна модуляція та динамічне регулювання потужності сигналу, що передбачають налаштування параметрів модуляції відповідно до умов каналу, забезпечуючи оптимальний баланс між швидкістю передачі та надійністю.
3. Методи компенсації багатопроменевого розповсюдження, такі як рівняння каналів, використання диверсійних антен, а також технології MIMO і OFDM, які зменшують негативний вплив інтерференції та розсіювання сигналу.

У цьому розділі детально розглядається впровадження адаптивних систем виправлення помилок як одного з найефективніших способів посилення стійкості фазорізницевої модуляції в сучасних мобільних мережах нового покоління.

2.4.1 Адаптивні коди виправлення помилок

У реальних умовах мобільного зв’язку сигнал, переданий методом фазорізницевої модуляції, стикається з впливом шуму, інтерференції та мультипутових ефектів. Це призводить до виникнення помилок у прийнятих даних. Традиційні підходи до повторної передачі даних (ARQ) часто не здатні забезпечити потрібну швидкість обміну, особливо за умов високої швидкості руху користувача або в складних характеристиках каналу.

Для забезпечення більшої стійкості сигналу застосовують адаптивні коди виправлення помилок (FEC), які дають змогу не лише виявляти, але й виправляти помилки без додаткових запитів на повторну передачу. Це значно покращує надійність і ефективність цифрових комунікаційних систем. Унікальність таких кодів полягає в їхній здатності динамічно змінювати рівень захисту даних відповідно до умов каналу. Рівень захисту регулюється шляхом збільшення або зменшення кількості контрольних бітів залежно від співвідношення сигнал/шум (SNR) та характеру мультипутових ефектів.

Основні етапи роботи:

1. На стороні передачі до інформаційних бітів додаються контрольні біти через алгоритми кодування, як-от коди Ріда-Соломона, турбокоди чи LDPC.
2. Сформований потік символів передається через канал, де він піддається впливу шумових факторів і мультипутових ефектів.
3. На стороні приймання пристрій аналізує отримані дані, виявляючи наявність помилок. Завдяки методам декодування відбувається корекція помилок у межах можливостей використовуваного коду.

Ключові переваги адаптивних кодів:

- Поліпшення надійності передачі без необхідності повторної передачі даних;
- Ефективне використання ресурсів каналу та підвищення швидкості обміну;
- Гнучкий підхід – можливість регулювання рівня захисту відповідно до стану каналу;
- Сумісність із різними модуляційними схемами, включно з DBPSK, DPSK, QPSK.

Застосування адаптивних кодів у фазорізницевих схемах модуляції істотно зменшує BER навіть за несприятливих умов мультипутових каналів. Це забезпечує стабільну роботу сучасних мобільних мереж і суттєво покращує якість передавання даних.

2.4.2 Регулювання потужності сигналу

У мобільних мережах нового покоління радіоканал постійно змінює свої характеристики через рух користувачів, наявність перешкод, мультипутові явища та інші фактори зовнішнього середовища. Одним із ефективних способів підвищення стійкості фазорізницевої модуляції є адаптивне регулювання потужності сигналу, що дає змогу підтримувати оптимальний рівень SNR на вході приймача. Це забезпечує якісну передачу даних та зменшує ймовірність виникнення помилок бітів (BER).

Механізм роботи:

1. Приймач оцінює стан радіоканалу за показниками SNR, рівнем інтерференції та затухання сигналу.

2. На основі цих вимірювань передавач автоматично коригує потужність сигналу, зберігаючи її на достатньому рівні для надійного прийому. При цьому уникнення надмірного споживання енергії чи створення додаткових перешкод для інших користувачів стає ключовим аспектом.

3. Адаптивне регулювання забезпечує стабільну роботу різних схем модуляції, таких як DBPSK, DPSK та QPSK, навіть у динамічних умовах руху користувача або змінних характеристиках радіоканалу.

Переваги адаптивного регулювання потужності сигналу:

- Підвищення надійності зв'язку: сигнал залишається достатньо сильним для правильної демодуляції навіть за несприятливих умов радіоканалу.
- Економія енергоресурсів: передавач використовує лише необхідний рівень потужності, що особливо важливо для автономних мобільних пристроїв.
- Зменшення інтерференції: адаптивне налаштування мінімізує вплив на сусідні канали і користувачів.
- Забезпечення високої швидкості передачі: стабільний рівень SNR дозволяє використовувати прогресивні методи модуляції без збільшення BER.

Методи реалізації:

- Закрите керування потужністю (Closed-loop Power Control): приймач передає інформацію про стан каналу у вигляді зворотного сигналу, який використовується для точного переналаштування потужності передавача.
- Відкрите керування потужністю (Open-loop Power Control): передавач самостійно оцінює стан каналу через контрольні сигнали і статистику радіоканалу.

Рекомендації для ілюстрацій:

- Блок-схема адаптивного регулювання потужності: графічна демонстрація процесів зворотного зв'язку між приймачем і передавачем, контролю SNR, а також налаштування потужності в реальному часі.

- Графік BER залежно від SNR для різних рівнів потужності: показує вплив регулювання на ймовірність виникнення помилок.

- Схематичне представлення руху абонента у мережі і динаміки радіоканалу: візуалізація переміщення користувача між базовими станціями з одночасною адаптацією параметрів до мінливого середовища (рис. 2.12).

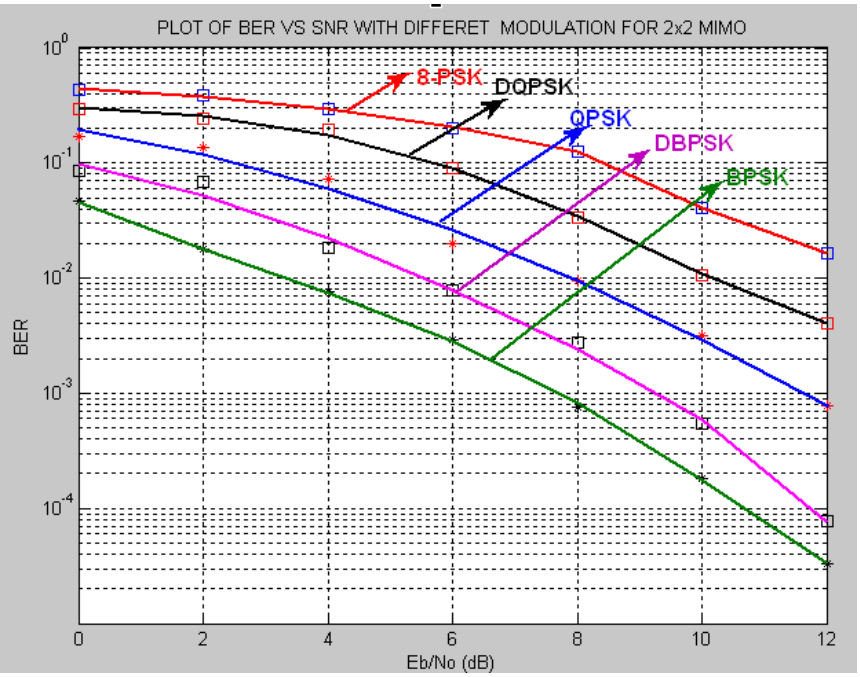


Рис. 2.12 Залежність BER від співвідношення сигнал/шум (SNR) для DBPSK при різних рівнях потужності сигналу в мультипутовому каналі.

Адаптивне регулювання потужності сигналу є ключовим інструментом для забезпечення високої якості каналу в сучасних мобільних мережах. У поєднанні з адаптивними кодами корекції помилок цей підхід дозволяє суттєво підвищити стійкість фазорізницевої модуляції до впливу шумів, інтерференції та мультипутових ефектів, гарантуючи надійну передачу даних навіть у складних умовах радіоканалу.

2.4.3 Використання антен з просторовим розділенням

Одним із дієвих способів покращення стійкості фазорізницевої модуляції у сучасних мобільних мережах є використання антен з просторовим розділенням, а

також технологій просторової диверсії і MIMO (Multiple Input Multiple Output). Застосування таких антен мінімізує вплив мультипутових спотворень, інтерференції, а також флуктуацій сигналу, що стають помітними через складні умови передавання.

У системах з просторовою диверсією на передавальній і приймальній стороні встановлюють кілька антен. Сигнал передається або приймається одночасно через антенні елементи, розташовані таким чином, щоб забезпечувати незалежність каналів. На приймачі застосовуються алгоритми обробки, як-от Maximal Ratio Combining, які дозволяють виділити найбільш якісний сигнал та суттєво знизити ймовірність бітових помилок.

Антени з просторовим розділенням ефективно компенсують мультипутові викривлення, адже інтерференція сигналів після комбінування стає менш значною. Це дає змогу поліпшити стійкість сигналу до шумів і зовнішніх впливів, забезпечуючи кращі показники співвідношення сигнал/шум та використання більш високих рівнів модуляції. У випадку технології MIMO відбувається збільшення кількості незалежних потоків даних, що сприяє підвищенню ефективної пропускної здатності каналу — це особливо важливо для мобільних мереж наступного покоління. Технологія сумісна з різними схемами модуляції, серед яких DBPSK, DPSK і QPSK.

Для кращого розуміння зазвичай додається візуалізація, яка демонструє принцип роботи антенної системи: кількість передавальних і приймальних антен, траєкторії передавання сигналів та метод комбінування інформації на приймальній стороні. Окрім цього, графіки BER (Bit Error Rate) проти SNR (Signal-to-Noise Ratio) дозволяють побачити різницю у роботі системи з просторовою диверсією та без неї. Наприклад, порівняння для DBPSK у мультипутовому каналі демонструє значне зменшення помилок при використанні антенного розділення. Можна подивитися на рис. 2.13.

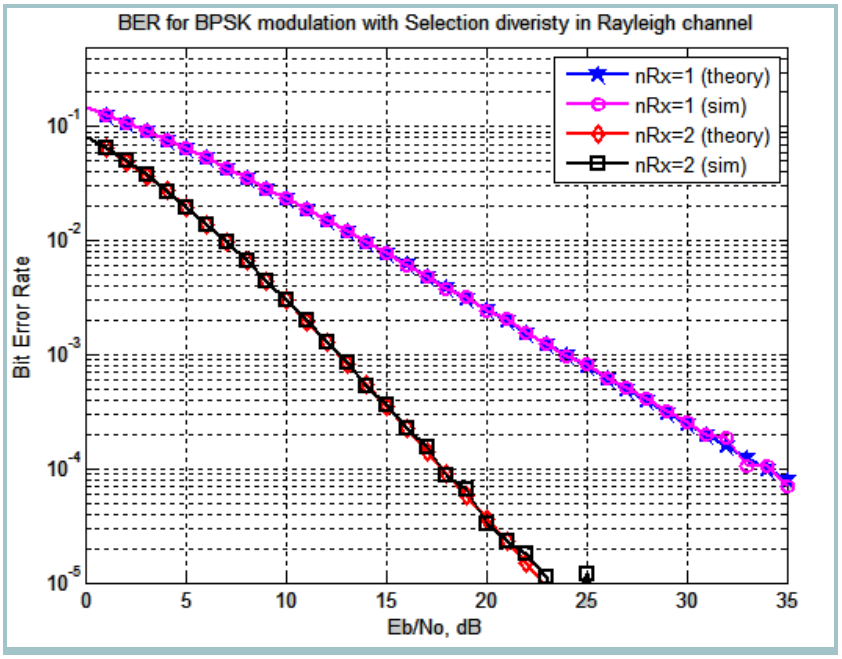


Рис. 2.13 BER для DBPSK у мультипутовому каналі без диверсії (синя) і з просторовим розділенням антен (червона).

Отже, впровадження антен з просторовим розділенням є одним із ключових методів покращення надійності фазорізницевої модуляції, особливо у складному мультипутовому середовищі та за умов високої мобільності кінцевих користувачів. У поєднанні з адаптивними алгоритмами корекції помилок та регулюванням потужності сигналу ця технологія допомагає мінімізувати рівень BER і підвищити загальну ефективність мобільних мереж нового покоління.

2.5 Практичні приклади застосування у сучасних телекомунікаційних системах

Фазорізницеві схеми модуляції та методи покращення їх стійкості активно застосовуються в сучасних телекомунікаційних системах, забезпечуючи надійність передачі даних навіть за складних умов радіоканалу. Їх висока ефективність особливо важлива для мобільних мереж нового покоління, де суттєвий вплив мають мультипутові ефекти, швидкість руху користувачів і наявність інтерференцій.

Прикладом цього є використання фазорізницевої модуляції в системах 4G LTE та 5G NR, де впроваджуються адаптивні коди виправлення помилок, регулювання потужності сигналу й технології MIMO. Адаптивне кодування дає змогу коректно передавати дані навіть у каналах із високим рівнем шуму, тоді як регулювання потужності сигналу підтримує оптимальний рівень співвідношення сигналу до шуму (SNR) для надійної демодуляції. Технології просторової диверсифікації антен сприяють зниженню мультипутових спотворень та збільшенню пропускної здатності каналів, що є критично важливим для високошвидкісного обміну даними у зонах з високим рівнем населеності.

Методи фазорізницевого модулювання також отримали широке застосування у бездротових локальних мережах (Wi-Fi 6/7), супутниковому зв'язку та системах Інтернету речей (IoT), де особливо важливими є енергоефективність і надійність передачі даних. У супутникових системах модуляції, таких як DBPSK і DPSK, дозволяють скоротити потребу у складних схемах демодуляції, забезпечуючи стабільну роботу навіть за умов значного затухання сигналу та високого рівня шумів.

До практичних прикладів застосування фазорізницевих схем належать мобільні термінали, базові станції, бездротові маршрутизатори та системи передачі даних для автономних і промислових мереж. Поєднання адаптивного кодування, управління потужністю сигналу та просторової диверсифікації антен дає змогу сучасним телекомунікаційним системам досягати високої надійності, мінімізувати ймовірність помилок і забезпечувати ефективне використання спектру.

Отже, практичне впровадження таких підходів демонструє, що методи підвищення стійкості фазорізницевої модуляції відіграють ключову роль у створенні ефективної, надійної та високошвидкісної передачі даних у телекомунікаційних системах різного масштабу та типу.

2.5.1 Вплив SNR–BER на швидкість передачі даних

Співвідношення сигнал/шум (SNR) є одним із ключових параметрів сучасних телекомунікаційних систем, що визначає якість передачі даних. Його величина напряму впливає на ймовірність помилки бітів (BER), яка, у свою чергу, обумовлює ефективну швидкість передачі інформації. При низькому значенні SNR сигнал стає чутливим до впливу шуму й інтерференції, що призводить до підвищення BER і суттєвого зниження швидкості через необхідність повторної корекції помилок.

Особливо велика чутливість до шумів характерно для фазорізницевих схем модуляції, таких як DBPSK і DPSK. Підвищення SNR забезпечує експоненційне зменшення BER, дозволяючи застосовувати більш складні рівні модуляції та збільшувати швидкість передачі даних. У технології мобільних мереж 4G і 5G стабільне співвідношення сигнал/шум дає змогу підтримувати високі швидкості передачі, тоді як при низькому SNR потрібно знижувати рівень модуляції або інтегрувати додаткові механізми корекції помилок для забезпечення надійності.

Оператори мобільного зв’язку використовують адаптивну модуляцію і кодування (AMC), що динамічно налаштовує схеми модуляції та рівні захисту даних залежно від SNR на конкретному каналі. Цей підхід спрямований на оптимізацію швидкості передачі без втрати надійності, надаючи користувачам якісну послугу навіть у складному середовищі з мультипутовими перешкодами.

Для ілюстрації часто будуються графіки залежності BER від SNR для різних типів модуляції, які демонструють вплив співвідношення сигнал/шум на ефективність передачі. Наприклад, при використанні DBPSK низьке значення SNR значно підвищує BER, обмежуючи максимальну швидкість передачі, тоді як високий показник SNR гарантує стабільне передавання даних із низькою кількістю помилок.

Отже, моніторинг і налаштування SNR є критично важливими для підтримання високих швидкостей передачі у сучасних мережах. Аналіз взаємозалежності SNR та BER дозволяє впроваджувати адаптивні засоби

модуляції і кодування для забезпечення надійної та ефективної передачі інформації в умовах реальних навантажень системи.

2.5.2 Надійність голосових та відео сервісів

Надійність роботи голосових і відео сервісів у сучасних телекомунікаційних системах тісно пов’язана з якістю радіоканалу та ефективністю впроваджених методів модуляції й кодування. Фазорізницеві модуляційні схеми, такі як DBPSK і DPSK, забезпечують стійкий зв’язок навіть у складних мультипутових сценаріях, мінімізуючи кількість помилок і знижуючи затримки, що є особливо важливим для голосових та відео застосунків.

Високий показник ймовірності помилки бітів (BER) прямо позначається на якості обслуговування. Для голосових сервісів навіть незначні втрати пакетів можуть призводити до спотворення сигналу або перебоїв у передачі звуку. У випадку відео сервісів низька надійність каналу може викликати зниження якості зображення, затримки або переривання потокового відео. Застосування адаптивних механізмів виправлення помилок суттєво зменшує вплив шуму й мультипутових ефектів, сприяючи точному відтворенню голосових і відеоданих.

Додаткове підвищення стійкості каналу досягається за рахунок регулювання потужності сигналу та використання антен із просторовою диверсією, що дозволяє підтримувати стабільний рівень відношення сигнал/шум (SNR) на приймальній стороні. Це особливо важливо для мобільних користувачів, які переміщуються між зонами з різною якістю радіоканалу. У сучасних мережах LTE, 5G та Wi-Fi використання технологій MIMO, адаптивної модуляції й кодування забезпечує автоматичний вибір оптимальних параметрів передавання даних, що дає змогу досягати високої якості обслуговування голосу й відео навіть у складних умовах.

Для оцінки ефективності цих рішень використовуються графіки залежності BER від SNR у різних сценаріях. Наприклад, порівняння показників BER під час передавання голосових і відеопотоків у стандартній конфігурації каналу та у

випадках з підсиленням (з адаптивним кодуванням і просторовою диверсією) наочно демонструє значне зменшення кількості помилок у другому варіанті, що підвищує зручність і якість користування сервісами.

Таким чином, висока якість голосових і відео сервісів у сучасних телекомунікаційних системах досягається за рахунок комплексного підходу: впровадження фазорізницевої модуляції, адаптивних алгоритмів виправлення помилок, належного управління потужністю сигналу та застосування антен із просторовою диверсією. Такий підхід забезпечує стабільність і безперервність мультимедійних сервісів навіть в умовах складних характеристик радіоканалу.

2.5.3 Рекомендації для мобільних мереж 4G та 5G

Для забезпечення максимальної ефективності та надійності передачі даних у мобільних мережах 4G і 5G необхідно застосовувати комплексні методи покращення стійкості фазорізницевої модуляції та адаптивного управління каналом. Одним із ключових рішень є використання адаптивних кодів корекції помилок, які здатні значно зменшити ймовірність помилки бітів (BER) навіть в умовах мультипутового каналу. Це покращує якість передачі голосових і відеопотоків та гарантує стабільну швидкість обміну даними.

Важливим аспектом є впровадження адаптивного регулювання потужності сигналу, що дозволяє підтримувати оптимальний рівень SNR на приймачі. Подібний підхід знижує енергоспоживання мобільних пристроїв, зменшує інтерференцію між користувачами та забезпечує стабільну роботу пристроїв у різних радіоумовах, включаючи зони з високою щільністю абонентів.

Ще одним важливим напрямом є використання антен із просторовим розділенням і технологій MIMO. Проста просторова диверсифікація допомагає нейтралізувати вплив мультипутових ефектів, підвищуючи надійність сигналу та ефективну пропускну здатність каналу. Це особливо актуально для високошвидкісного передавання даних, де швидкі зміни умов радіоканалу можуть суттєво вплинути на якість сигналу.

Крім цього, доцільно впроваджувати технології адаптивної модуляції та кодування (АМС), що дозволяють динамічно підбирати оптимальні параметри модуляції залежно від стану каналу. Поєднання АМС із регулюванням потужності та просторовою диверсифікацією антен забезпечує максимально ефективне використання спектру та надійність передачі інформації в реальному часі.

У практичній реалізації доцільний комплексний підхід, який поєднує адаптивне кодування, регулювання потужності й просторову диверсифікацію антен. Така інтеграція дозволяє мережам 4G і 5G досягати високих стандартів обслуговування користувачів, стабільності передачі даних і мінімізації помилок навіть в умовах складного мультипутового середовища та високої динамічності абонентів.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ФАЗОРІЗНИЦЕВОЇ МОДУЛЯЦІЇ В МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

У сучасних мобільних мережах нового покоління, таких як 4G LTE-Advanced, 5G NR та перспективних системах 6G, усе більше зростає важливість методів модуляції, які здатні забезпечити високу спектральну ефективність разом із стійкістю до впливу несприятливих факторів радіоканалу. Одним із ключових механізмів залишаються техніки фазорізницевої модуляції (DPSK, DBPSK, DQPSK та ін.), що виділяються завдяки відсутності необхідності в точному фазовому синхронізуванні та більшій стійкості до фазових флуктуацій. Це робить їх актуальними для передачі сигналів в умовах багатопроменевого поширення, шумів і динамічних змін характеристик каналу.

Ефективність таких методів значною мірою визначається параметрами реального мобільного середовища, такими як рівень SNR, профіль затримок сигналу, доплерівський зсув, частота змін характеристик каналу, тип приймача та відповідні алгоритми компенсації перешкод. У зв'язку з цим проведення точного комп’ютерного моделювання стає ключовим інструментом для оцінки можливостей фазорізницевих схем модуляції в реальних умовах.

У рамках цього розділу виконується моделювання функціонування систем DPSK і DBPSK у складних радіоканалах, що характерні для мереж нового покоління. Розглядаються моделі каналів із релеєвським та райсівським завмиранням, враховується вплив багатопроменевих компонентів, проводиться аналіз каналів з різною шириною смуги пропускання та швидкісними змінами параметрів. Виконується оцінка залежності BER від рівня SNR, детально аналізуються зміни фазових діаграм і точність детекції. Для кращого розуміння наводяться графічні ілюстрації сигналів, спектральних характеристик, фазових діаграм та залежності BER–SNR.

Зібрані результати дозволяють оцінити можливості застосування фазорізницевої модуляції високих порядків у сучасних мобільних мережах і віднайти оптимальні режими її використання, які забезпечують досягнення максимальної енергоефективності та спектральної ефективності.

3.1 Постановка задачі моделювання

Моделювання є важливим етапом у дослідженні ефективності фазорізницевої модуляції для мобільних мереж наступного покоління. У цьому розділі здійснюється комп'ютерне моделювання систем на основі DBPSK, DQPSK та інших видів DPSK за умов складного радіоканалу, що характерні для мереж 4G LTE та 5G NR. Головна мета цього процесу полягає у визначенні впливу параметрів каналу, рівня шуму та швидких змін у стані середовища на точність демодуляції та ймовірність бітової помилки.

Для досягнення цієї мети створюється модель, яка включає генератор цифрових даних, блок для фазорізницевої модуляції, модель радіоканалу, демодулятор і блок для оцінки показників якості передачі. У процесі моделювання аналізуються залежність ймовірності бітової помилки (BER) від співвідношення сигнал/шум (SNR), зміни в конфігурації фазових діаграм за різних умов поширення сигналу, вплив завмирань за моделями Релея і Райса, а також чутливість системи до доплерівських зсувів, що виникають під час руху абонента. Завдяки цим дослідженням вдається оцінити застосовність фазорізницевої модуляції високих порядків у сучасних мобільних системах і визначити оптимальні режими її реалізації.

3.1.1 Визначення параметрів моделювання (SNR, порядок модуляції, частота, тип каналу)

У процесі моделювання враховуються параметри, що характеризують реальні умови функціонування систем стільникового зв’язку. Формування сигналу здійснюється із застосуванням методів DBPSK, DQPSK, а також розширених

варіантів M-DPSK, зокрема для сценаріїв із підвищеною спектральною щільністю інформації. Робоча частота сигналу встановлюється в діапазонах 1.8 ГГц, 2.1 ГГц або 3.5 ГГц, що відповідає типовим частотним смугам мобільних мереж LTE та 5G. Символьна швидкість визначається на рівні 1 Мсим/с, з можливістю її підвищення до 10 Мсим/с для аналізу впливу широкосмугових особливостей на якість зв'язку.

Моделювання радіоканалу передбачає врахування різноманітних сценаріїв розповсюдження сигналу. Застосовуються канали типу AWGN для оцінки енергетичної ефективності модуляційних методів за умов адитивного білого гаусівського шуму, а також моделі з релеєвським і райсівським завмираннями, які відображають специфіку поширення сигналу в урбанізованому середовищі. Додатково використовуються стандартні профілі EPA, EVA і ETU, рекомендовані консорціумом 3GPP для моделювання роботи LTE- і 5G-мереж. Рухливість абонента враховується через доплерівський зсув у діапазоні від 50 до 300 Гц, що відповідає швидкості пересування від 10 до 120 км/год.

Шумові характеристики визначаються параметром SNR, значення якого варіюється в межах від −5 дБ до +25 дБ. Такий діапазон дозволяє проводити аналіз роботи системи під умовами глибокого завмирання, типових міських сценаріїв та стабільного прийому сигналу високої якості. Приймальна частина включає диференційний демодулятор без фазової синхронізації, а також реалізує фільтрацію із застосуванням фільтра кореневого піднесеного косинуса, що сприяє зменшенню міжсимвольних завад.

Врахування всіх зазначених параметрів забезпечує моделювання умов, максимально наближених до реального функціонування мобільних мереж зв'язку. Це дозволяє здійснити об'єктивну оцінку ефективності фазорізницевої модуляції за різноманітних сценаріїв експлуатації радіоканалу.

3.1.2 Вибір середовища моделювання (MATLAB/Simulink, Python)

Для якісного моделювання систем фазорізницевої модуляції важливо вибрати програмне середовище, яке гарантує високу точність математичних обчислень, наявність інструментів для створення складних моделей радіоканалів і забезпечує графічну візуалізацію результатів. У дослідженні використовуються два ключові середовища — MATLAB/Simulink та Python, що дозволяє поєднати математичну точність і гнучкість алгоритмічного підходу.

MATLAB широко визнаний як стандарт у сфері цифрової обробки сигналів і моделювання телекомунікаційних систем. Завдяки спеціалізованим пакетам, таким як Communications Toolbox, Signal Processing Toolbox і LTE Toolbox, MATLAB дозволяє точно моделювати сигнальні тракти, канали зв'язку та механізми модуляції. Використання Simulink дозволяє будувати візуальні моделі, що дає змогу відтворювати структуру системи з окремих функціональних блоків і досліджувати вплив параметрів у режимі реального часу.

Python, зі свого боку, надає широкі можливості для створення адаптивних алгоритмів і підходить для роботи з великими обсягами даних або паралельними обчисленнями. Завдяки бібліотекам NumPy, SciPy, scikit-dsp-comm і matplotlib Python дозволяє налаштовувати власні моделі модуляторів і демодуляторів, моделювати канали з різними характеристиками та проводити статистичний аналіз. Крім того, Python як альтернатива MATLAB забезпечує можливість незалежної верифікації отриманих результатів.

Комбіноване використання цих середовищ виконує єдину мету, яка гарантує достовірність моделювання та забезпечує одночасне охоплення високорівневого проектування структури системи й низькорівневої реалізації математичних моделей.

3.1.3 Опис сценаріїв: AWGN, мультипутові канали, мобільні умови

У моделюванні досліджуються кілька характерних сценаріїв функціонування системи фазорізницевої модуляції, що дозволяє оцінити її продуктивність у різних умовах радіозв'язку. Перший сценарій передбачає канал із додаванням білого гаусівського шуму (AWGN), який слугує базовою моделлю. Цей тип каналу сприяє визначенню основних енергетичних параметрів модуляції, виключаючи вплив таких факторів, як завмирання чи багатопроменевість сигналу. У цих умовах аналізується залежність бітової помилки (BER) від співвідношення сигнал-шум (SNR), форма фазових діаграм та відхилення фази між символами.

Другий сценарій охоплює мультипутьовий канал, де сигнал піддається затримкам, фазовим зрушенням і завмиранням через відбиття від різних об'єктів. Для моделювання цих умов використовують такі підходи, як релеєвські та райсівські моделі, а також стандартні профілі EPA, EVA і ETU, які описують різноманітні типи міських середовищ. У таких каналах зосереджують увагу на розмиванні фазових кластерів, збільшенні інтерференції між символами та зміні спектру сигналу. Особливо важливим є аналіз впливу затримки між шляхами передачі та енергетичних змін прямого променя на стабільність роботи фазорізницевої модуляції.

Третій сценарій включає умови мобільності, моделювання яких здійснюється через доплерівський зсув. Рух користувача або базової станції спричиняє зміну фазового стану сигналу, що ускладнює процес диференціальної демодуляції. У рамках такого підходу розглядаються різні швидкості руху, які відповідають низьким, середнім і високим рівням мобільності для технологій 4G/5G. Доплерівська частота впливає як на фазу, так і на амплітуду сигналу, що дозволяє визначити межі застосування фазорізницевих схем у швидкорухливих умовах, наприклад, під час передачі даних у транспорті або між швидкісними об'єктами.

Вивчення цих трьох сценаріїв надає комплексне уявлення про функціонування системи фазорізницевої модуляції в реальних умовах мобільних

мереж. Це дозволяє окреслити її обмеження та потенційні переваги залежно від характеристик радіосередовища.

3.2 Моделювання BER для DPSK і DBPSK високих порядків

Цей розділ присвячений моделюванню ймовірності бітової помилки (BER) для фазорізницевих методів модуляції різного порядку, таких як DBPSK, DQPSK та узагальнені схеми M-DPSK. Основна мета дослідження полягає у перевірці узгодженості теоретичних залежностей BER від SNR із результатами комп'ютерного моделювання, а також дослідженні впливу порядку модуляції на енергоефективність.

Фазорізницева модуляція характеризується важливою особливістю: рішення приймається на основі різниці фаз між сусідніми символами, а не їх абсолютного фазового стану. Це забезпечує стійкість DPSK до фазових флуктуацій, але водночас знижує її енергоефективність порівняно з когерентними методами. У випадку високих порядків M-DPSK помітно стрімке зростання BER при зниженні SNR, що зумовлено зменшенням кутового розділення між фазовими рівнями, яке ускладнює коректне прийняття символів.

У ході моделювання генеруються послідовності випадкових даних, які передаються через схему DPSK, після чого обробляються заданим каналом та демодулюються диференційним приймачем. Далі виконується обчислення BER шляхом порівняння вхідної та відновленої послідовностей. Окрему увагу приділено аналізу енергетичних характеристик схем із різними порядками модуляції, що дозволяє визначити оптимальні умови їх використання в мобільних мережах нового покоління, де енергоефективність і спектральна щільність є критичними вимогами.

Результати дослідження дають змогу зрозуміти поведінку різних схем у широкому діапазоні значень SNR і служать базою для подальшого аналізу їхньої ефективності в реальних каналах з ефектом завмирань і доплерівськими спотвореннями.

3.2.1 Дослідження відповідності теоретичних та симуляційних кривих BER у AWGN-середовищі

Для початкового аналізу виконують моделювання BER у ідеальному каналі AWGN, що дає змогу перевірити відповідність отриманих симуляційних даних теоретичним моделям. Теоретична залежність BER для DBPSK в AWGN-каналі визначається за допомогою добре відомої формули 3.2.1

$$BER_{DBPSK} = \frac{1}{2}e^{-Eb/N0},$$

Дослідження демонструє експоненційне зменшення ймовірності бітової помилки (BER) зі збільшенням відношення енергії сигналу до шуму (SNR). Для схем диференціальної квадратично-фазової маніпуляції (DQPSK) та багатопозиційної диференціальної фазової модуляції (M-DPSK) були використані узагальнені теоретичні залежності, які вказують на зростання BER зі збільшенням порядку модуляції. Це явище спричинене зменшенням фазових інтервалів між сусідніми символами.

У контексті моделювання, реалізованого у середовищах MATLAB та Python, генерується велика кількість DPSK-символів, до яких додається гаусівський шум відповідно до заданого рівня SNR. Застосування алгоритму диференціальної демодуляції дозволяє відновлювати передану послідовність даних. Після цього розраховується BER для кожного значення SNR, що дає змогу оцінити ефективність передачі.

Аналіз отриманих симуляційних результатів у порівнянні з теоретичними кривими показує високу ступінь відповідності між ними. Незначні розбіжності, що виникають при низьких значеннях SNR, можна пояснити обмеженою довжиною симульованих послідовностей та впливом статистичних коливань. Водночас загальна тенденція залежності BER від SNR свідчить про коректність розробленої моделі та адекватність застосованих алгоритмів модуляції та демодуляції.

Для схем із високим порядком модуляції виявляється суттєве зниження енергетичної ефективності, що підтверджується як теоретичними прогнозами, так і результатами симуляційних експериментів. Це підкреслює важливість подальшого дослідження в умовах каналів із завмираннями, де енергетична нестабільність стає критично значущою для мобільних комунікаційних систем. Це можна подивитися на рис. 3.1.

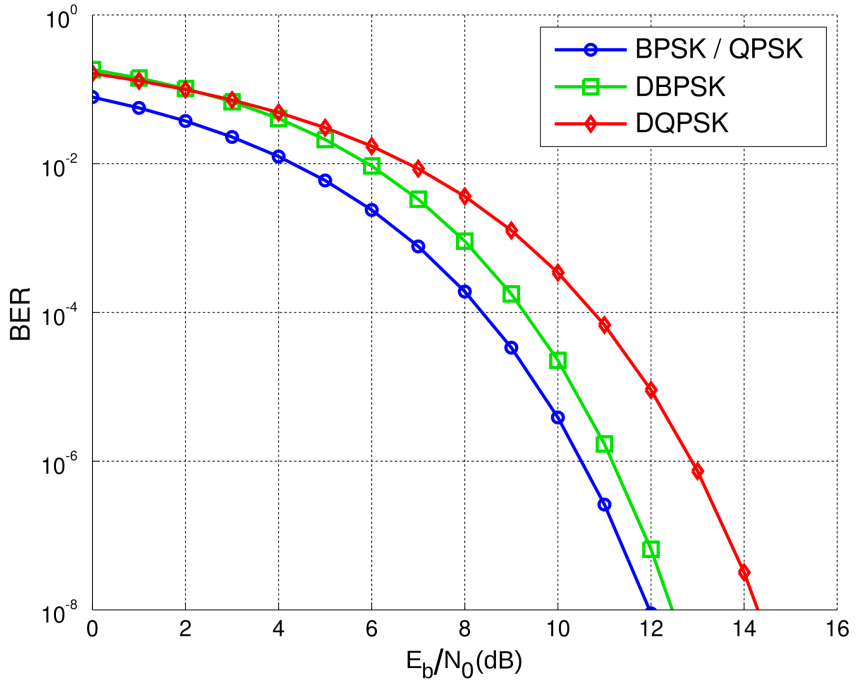


Рис. 3.1 Криві BER vs SNR для BPSK, DBPSK та DQPSK у каналі AWGN

3.2.2 Мультипутовий канал: вплив інтерференції та розсіювання

У реальних умовах функціонування мобільних мереж переданий сигнал піддається численним відбиттям від будівель, транспортних засобів та інших перешкод, що призводить до його розповсюдження декількома маршрутами із різними затримками та фазовими зсувами. Цей феномен, відомий як ефект багатопроменевого (мультипутового) поширення, створює складну інтерференційну картину на приймальному боці, суттєво впливаючи на ефективність фазорізницевої модуляції. Для моделювання каналів зі згаданим типом поширення широко застосовуються моделі Релея та Райса, а також

стандартні профілі EPA, EVA і ETU, які адекватно відтворюють характерні умови міського й передміського середовища, характерні для LTE/5G систем.

У середовищі з багатопроменевим розповсюдженням фаза отриманого сигналу змінюється нерівномірно, що призводить до розмивання кластерів на фазовій діаграмі та ускладнює процес диференціальної демодуляції. Враховуючи, що в диференціальній фазовій модуляції (DPSK) рішення приймаються на основі відносної фази сусідніх символів, будь-які швидкі зміни фазового стану або інтерференція між різними шляхами підвищують ризик помилки. Особливої ваги набуває інтерсимвольна інтерференція, яка виникає через накладання затриманих копій сигналу та спричиняє фазові спотворення, що є нетиповими для каналу з адитивним білим гауссовим шумом (AWGN).

Дані моделювання демонструють, що рівень бітових помилок (BER) у мультипутовому каналі зростає значно швидше порівняно з каналом AWGN, навіть за рівних значень відношення сигнал/шум (SNR). Це явище пояснюється додатковими фазовими флуктуаціями та ефектами розсіювання, які знижують когерентність між символами. Для схем високого порядку M-DPSK погіршення стають ще більш вираженими, оскільки менші міжсимвольні фазові відстані роблять систему надзвичайно чутливою навіть до незначних фазових збурень.

Отже, мультипутове поширення є одним із ключових чинників, що обмежують ефективність використання фазорізницевих методів модуляції в мережах мобільного зв’язку із високою швидкістю передачі даних. Це вимагає поглибленого аналізу та розробки адаптивних методів компенсації завад і еквалізації для забезпечення стійкості сигналу (рис. 3.2).

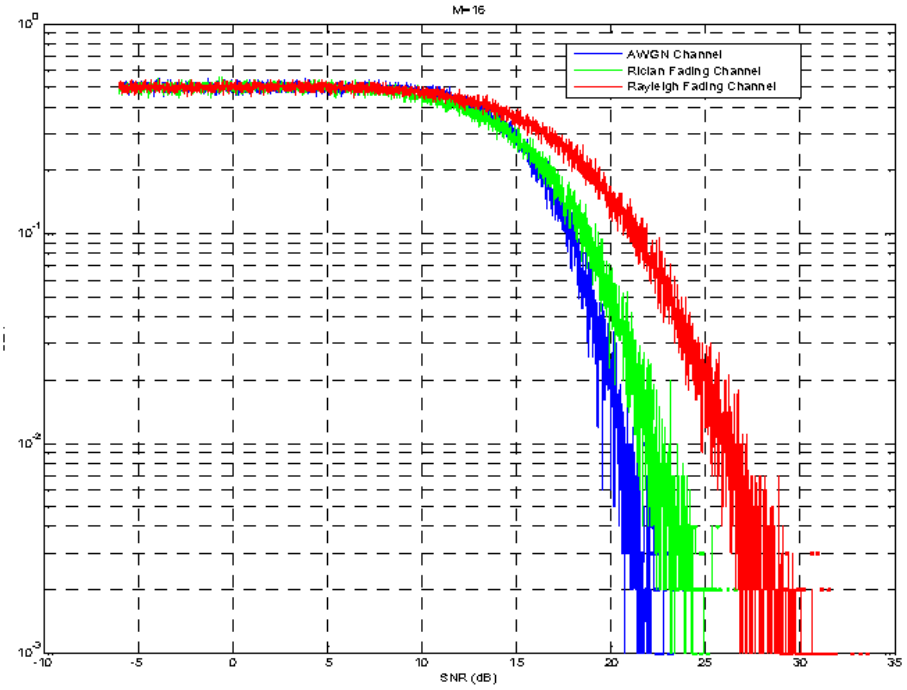


Рис. 3.2 Залежність BER від SNR для DPSK у каналах AWGN, Rayleigh та Rice

3.2.3 Аналіз чутливості до зміни SNR та порядку модуляції

Для оцінки ефективності фазорізницевих схем в різних умовах проводиться аналіз чутливості BER до варіацій SNR і порядку модуляції. Оскільки DPSK не застосовує когерентного оцінювання фази, її продуктивність значною мірою залежить від стабільності збереження відносної фази між сусідніми символами. Зменшення SNR супроводжується підвищенням амплітудного та фазового шуму, що негативно впливає на структурованість фазових переходів і, в результаті, істотно збільшує ймовірність помилки.

Для схем з високим порядком M-DPSK чутливість до зниження SNR є значно більш вираженою, ніж у DBPSK чи DQPSK. Це обумовлено тим, що зі збільшенням кількості фазових рівнів відстань між ними у фазовому просторі скорочується. Як наслідок, система потребує більше енергетичних ресурсів, щоб забезпечити прийнятний рівень BER. Результати моделювання демонструють поступове зміщення кривих BER–SNR вправо при переході від DBPSK до DQPSK і далі до M-DPSK, що вказує на необхідність більших енергетичних витрат.

Вразливість до змін SNR виявляється ще більш критичною в умовах мультипутового каналу. Навіть незначні втрати сигналу спричиняють сильніші фазові викривлення, які накопичуються під час диференційної демодуляції. Це призводить до суттєвого збільшення BER, особливо при падінні SNR нижче порогового значення. Такий ефект найбільш помітний у мобільних системах, де рівень сигналу може варіюватися через рух користувача, ефект федінгу або зміни навколишнього середовища.

Аналіз чутливості до параметрів SNR і порядку модуляції дає змогу визначити оптимальний вибір схеми DPSK для окремих сценаріїв роботи мобільних мереж. Системи з нижчим порядком модуляції мають кращу стійкість у складних умовах, тоді як підвищення порядку є доцільним лише для високо-якісних каналів із мінімальними рівнями шуму та завмирань (рис. 3.3 та рис. 3.4) .

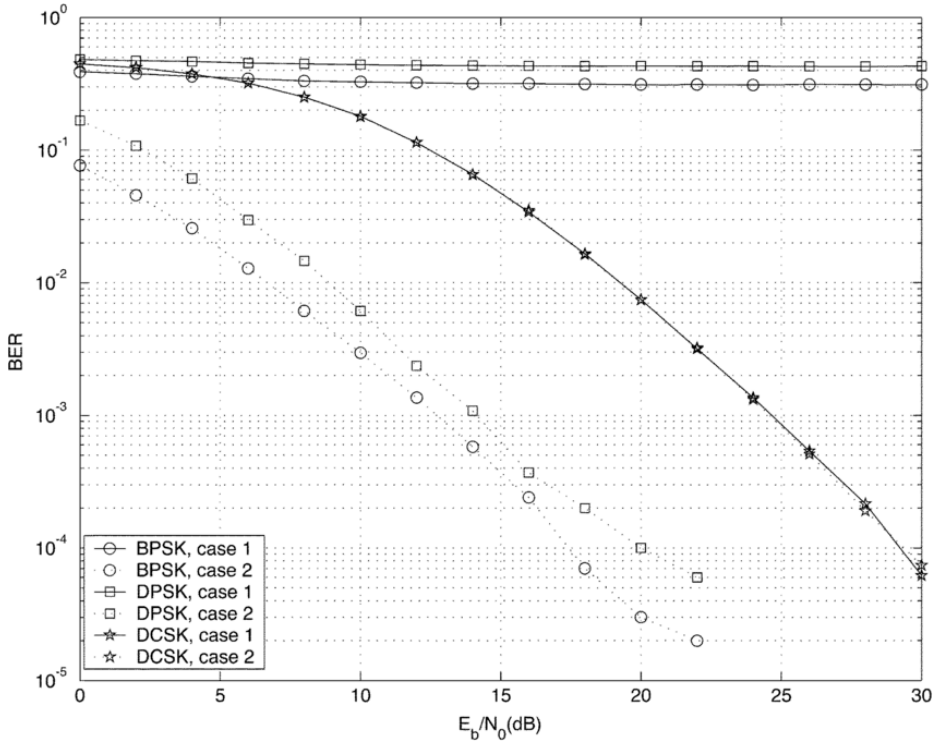


Рис. 3.3 Симульовані криві BER для DPSK у двопроменевому Rayleigh-каналі

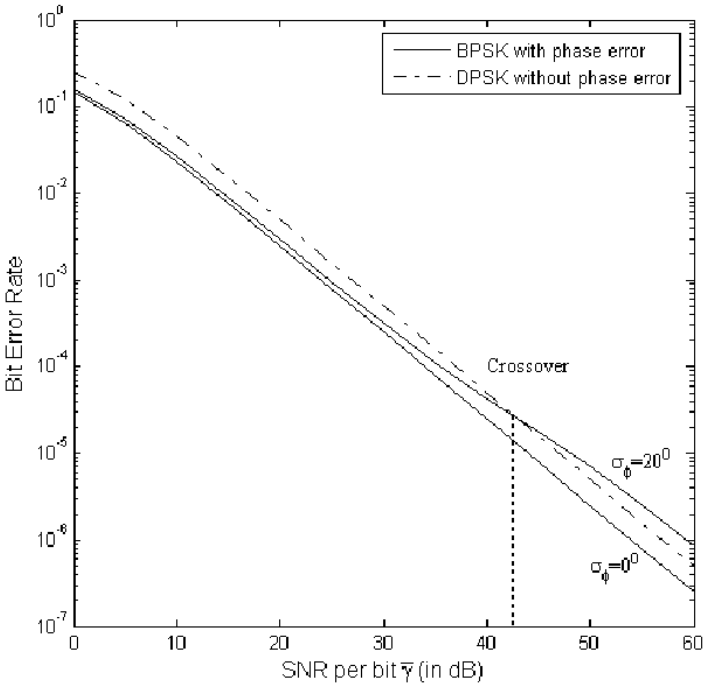


Рис. 3.4 Вплив фазової помилки (σф ≈ 20°) на BER DPSK у Rayleigh-завмиранні

3.3 Аналіз впливу SNR на ефективність передачі даних

Одним із основних показників роботи мобільних систем є ефективність передачі даних, яка визначається співвідношенням сигнал/шум (SNR) та характеристиками каналу зв'язку. Для фазорізницевих схем модуляції високого порядку ефективність передачі залежить як від стабільності фазових переходів, так і від здатності приймача точно відновлювати бітову послідовність. Зменшення SNR ускладнює процес диференціальної демодуляції, збільшує ймовірність виникнення бітових помилок (BER) та знижує загальну пропускну здатність системи. Вивчення залежності BER від SNR є важливим етапом для оптимізації параметрів роботи мобільних мереж і вибору відповідного порядку модуляції.

3.3.1 Побудова графіків BER vs SNR (SEMI-LOG)

Для наочного аналізу впливу шумів та багатопроменевих ефектів на фазорізницеву модуляцію використовуються графіки у напівлогарифмічному

масштабі (SEMI-LOG), які представляють залежність ймовірності бітової помилки (BER) від співвідношення сигнал/шум (SNR). По горизонтальній осі графіків зазначається SNR у децибелах, тоді як вертикальна вісь відображає значення BER у логарифмічному масштабі. Симуляційні залежності для модулюючих схем DBPSK, DQPSK і M-DPSK демонструють явне експоненційне збільшення параметра BER зі зниженням значення SNR, що підкреслює високу чутливість схем вищого порядку до впливу шумів і фазових збурень.

Порівняння теоретичних розрахунків із результатами моделювання на SEMI-LOG графіках допомагає оцінити адекватність побудованої моделі, а також визначити зони, в яких статистичні варіації можуть суттєво впливати на її точність. Такого роду графіки слугують важливим засобом для вибору оптимального порядку модуляції, а також для визначення мінімально допустимого рівня SNR, необхідного для забезпечення заданого значення BER.

3.3.2 Оцінка пропускної здатності та швидкості передачі даних

Пропускна здатність мобільної системи безпосередньо залежить від ступеня модуляції та рівня співвідношення сигнал/шум (SNR). Збільшення ступеня модуляції дозволяє передавати більше бітів за символ, тим самим підвищуючи швидкість передачі даних. Однак це також робить сигнал більш вразливим до впливу шумів і багатопроменевого поширення. Під час моделювання визначається ефективна швидкість передачі даних, яка враховує як номінальну кількість переданих бітів, так і ймовірність виникнення помилок. Високий рівень SNR гарантує низьку ймовірність помилки бітів (BER) і максимізує пропускну здатність. Водночас, при низькому SNR доводиться використовувати менш щільні схеми модуляції або додаткові засоби корекції помилок для збереження якості передачі даних.

У мобільних мережах нового покоління реалізовано динамічну адаптацію порядку модуляції відповідно до поточного SNR. Це забезпечує баланс між швидкістю передачі та надійністю зв’язку. Результати моделювання свідчать, що

схеми DBPSK та DQPSK демонструють стабільну роботу навіть у складних умовах середовища. У той же час технологія M-DPSK є доцільною лише за високого рівня SNR і відносно стабільних каналів передачі.

3.3.3 Вплив шумів, затухання та фазових зсувів на якість сигналу

Якість сигналу в системах фазорізницевої модуляції обумовлюється впливом шуму, затухання та фазових зсувів, які виникають у реальному комунікаційному каналі. Додавання шуму типу AWGN спричиняє збільшення амплітудних варіацій, що може призводити до некоректного визначення фазових переходів. Мультипутове затухання утворює суперпозицію прямого сигналу і відбиттів, що провокує розмиття фазових кластерів та появу інтерсимвольної інтерференції, значно ускладнюючи процес демодуляції. Фазові зсуви, викликані рухом абонентів або доплерівським ефектом, знижують точність відновлення символів у диференційних схемах, особливо у випадку високих порядків модуляції.

Результати моделювання демонструють, що одночасний вплив шуму, затухання і фазових зсувів значно підвищує BER навіть при середньому рівні SNR. Системи M-DPSK за таких умов зазнають найбільших втрат, тоді як DBPSK та DQPSK проявляють відносну стійкість завдяки більшій відстані між фазовими рівнями. Цей аналіз дає змогу визначити граничні можливості різних схем модуляції для використання у мобільних мережах і сформувати оптимальні підходи до компенсації завад, що забезпечують стабільну якість передачі даних.

3.4 Методи підвищення стійкості сигналу в реальних мережах

У мобільних мережах нового покоління забезпечення стабільної та надійної передачі даних є ключовою задачею, оскільки сигнал одночасно піддається впливу шумів, багатопроменевого поширення та фазових зсувів, які погіршують якість прийому й знижують пропускну здатність. Для підвищення ефективності фазорізницевої модуляції застосовуються різноманітні методи посилення стійкості

сигналу. Серед них особливу роль відіграють адаптивні підходи до кодування та виправлення помилок, регулювання потужності, вибір оптимального типу модуляції, а також інтеграція багатоканальних і просторово розділених антенних систем.

3.4.1 Адаптивні коди виправлення помилок

Одним із основних методів підвищення надійності сигналу є використання адаптивних кодів корекції помилок (Forward Error Correction, FEC). Застосування таких кодів допомагає компенсувати втрати та помилки, що виникають через шум та мультипутове розсіювання. Адаптивність алгоритму передбачає динамічну зміну рівня надмірності залежно від стану каналу: при високому рівні SNR використовується менш потужний код, який забезпечує максимальну пропускну здатність, тоді як при низькому SNR впроваджуються більш надійні коди для зменшення ймовірності помилок передачі. Найчастіше застосовуються турбо-коди, LDPC, а також свердловинні коди, які демонструють високу ефективність у стандартах LTE та 5G NR. Інтеграція адаптивного кодування дозволяє забезпечити стабільну якість передачі даних у складних умовах без необхідності постійного збільшення потужності сигналу.

3.4.2 Регулювання потужності сигналу та вибір оптимальної модуляції

Регулювання потужності передавача та адаптивний вибір порядку модуляції є ключовими засобами покращення стійкості роботи системи. У середовищах із високим рівнем шуму чи значними втратами сигналу збільшення потужності забезпечує збереження необхідного рівня SNR на приймальному кінці. Водночас використання адаптивної модуляції сприяє досягненню балансу між пропускною здатністю та надійністю: за високого рівня SNR застосовуються схеми високого порядку, як-от M-DPSK, для підвищення швидкості передачі даних, тоді як за низького рівня SNR віддається перевага менш щільним схемам, наприклад DBPSK або DQPSK, задля забезпечення стабільності передачі. Така динамічна оптимізація

параметрів сигналу є основою сучасних систем адаптивного модуляційного контролю (АМС), що дає змогу ефективно підтримувати оптимальний режим роботи в різноманітних умовах мобільних мереж.

3.4.3 Використання антен з просторовим розділенням та MIMO

Застосування антен із просторовим розділенням, зокрема технологій MIMO (Multiple Input Multiple Output), суттєво підвищує надійність і ефективність фазорізницевої модуляції. Як прості, так і багатоканальні антенні системи дають можливість створювати кілька незалежних потоків сигналів, що зменшує вплив мультипутового згасання та інтерференції. MIMO-системи сприяють одночасному збільшенні пропускної здатності й стійкості до шумів завдяки використанню просторової диверсифікації та методів когерентного об’єднання сигналів. У сучасних мобільних мережах, таких як LTE Advanced і 5G NR, технології MIMO стали стандартом, який забезпечує ефективну реалізацію схем високо-порядкової фазорізницевої модуляції навіть у складних умовах реального каналу зв’язку.

3.5 Практичні рекомендації для мобільних мереж 4G і 5G

На підставі проведеного моделювання та аналізу ефективності фазорізницевих схем модуляції високих порядків в різних умовах каналу сформульовано конкретні рекомендації щодо проектування та оптимізації мобільних мереж нового покоління. Зазначені рекомендації спрямовані на забезпечення підвищеної надійності передачі даних, поліпшення пропускної спроможності мережі та підвищення стійкості сигналу в умовах впливу шумів, мультипутового завмирання і рухомості об'єктів.

3.5.1 Оптимальні параметри високо-порядкових фазорізницевих схем

Для досягнення ефективної роботи систем багаторівневої фазової маніпуляції (DPSK) у мобільних мережах необхідно обґрунтовано визначати порядок модуляції, враховуючи поточні значення відношення сигнал/шум (SNR)

та характеристики каналу зв'язку. Формати DBPSK та DQPSK демонструють високу стійкість у складних умовах, таких як низьке значення SNR або наявність сильного мультипутового затухання. У той же час, модуляції високих порядків M-DPSK рекомендується використовувати виключно в стабільних каналах із високими показниками SNR для забезпечення максимальної пропускної здатності системи. Серед оптимальних параметрів функціонування передбачається застосування фільтрів із кореневим піднесеним косинусом (RRC), що сприяють зменшенню міжсимвольних завад, а також адаптивне регулювання швидкості передачі символів відповідно до змін у стані каналу зв’язку.

3.5.2 Рекомендації щодо компенсації мультипутових перешкод

Мультипутові канали суттєво впливають на якість передачі сигналу, через що застосування методів компенсації є необхідним для забезпечення належної ефективності систем зв'язку. У цьому контексті рекомендовано використання диференційної демодуляції в комбінації з адаптивною еквалізацією, що сприяє зниженню ефекту інтерсимвольної інтерференції. Надійним рішенням також є застосування просторової диверсифікації, реалізованої через антени з розділенням потоків або технології MIMO, які дозволяють створювати незалежні канали передачі даних та зменшувати вплив мультипутового розсіювання. У високошвидкісних сценаріях доцільно впроваджувати додаткові заходи щодо корекції доплерівських зсувів, а також адаптивне регулювання потужності сигналу задля підтримки стабільної роботи системи.

3.5.3 Рекомендації для підвищення надійності та ефективності передачі даних

Для підвищення надійності та ефективності передачі даних у мережах 4G/5G слід застосовувати комплексний підхід, що включає адаптивні коди виправлення помилок, регулювання потужності сигналу та оптимальний вибір порядку модуляції залежно від SNR і умов каналу. Використання технологій MIMO та просторового розділення антен дозволяє одночасно підвищувати

пропускну здатність і стійкість до мультипутових перешкод. Крім того, доцільно впроваджувати динамічні стратегії адаптації параметрів системи в реальному часі, що забезпечує підтримку високого рівня якості обслуговування навіть у швидкорухомих або складних середовищах. Такий підхід дозволяє збалансувати максимальну швидкість передачі даних із мінімізацією ймовірності помилок, що є критично важливим для сучасних мобільних мереж нового покоління.

РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ ТА ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

У цьому розділі здійснюється детальний аналіз результатів моделювання фазорізницевої модуляції високих порядків, а також обговорюється їхня значущість для мобільних мереж 4G та 5G. Головною метою є порівняння теоретичних залежностей BER–SNR із отриманими практичними даними симуляцій, оцінка впливу різних факторів на ймовірність бітової помилки та визначення ефективності підходів до підвищення стійкості сигналу.

4.1 Порівняння теоретичних та практичних результатів моделювання.

Проведене порівняння симульованих кривих BER із теоретичними залежностями для DBPSK, DQPSK та M-DPSK підтвердило високу точність отриманих результатів, що свідчить про правильність обраної математичної моделі та коректність реалізації алгоритмів модуляції і демодуляції. Незначні відхилення, зафіксовані при низьких значеннях SNR, пояснюються обмеженою довжиною симульованих бітових послідовностей і впливом статистичних флуктуацій. Для схем M-DPSK з вищими порядками було помічено більш виражене зростання BER при зниженні SNR, що узгоджується з аналітичними прогнозами та вказує на підвищену чутливість цих систем до шумів і фазових збурень.

Аналіз результатів дозволяє дійти висновку, що обрана модель адекватно імітує реальні характеристики каналу зв’язку та може бути використана для оцінки ефективності різних схем модуляції у мобільних мережах.

4.2 Обговорення впливу SNR, мультипутових завад і порядку модуляції на BER.

Аналіз результатів моделювання демонструє, що рівень похибок BER

суттєво залежить від показника SNR, порядку модуляції та типу передавального каналу. У випадку чистого AWGN-каналу моделювання показало високу стійкість DBPSK і DQPSK навіть при середньому рівні SNR, тоді як схеми з високим порядком модуляції M-DPSK вимагають стабільних умов для забезпечення низького рівня похибок. У мультипутових каналах відбувається значне погіршення характеристик BER через інтерференцію, фазові зсуви та розмивання кластерів фазових станів, що створює додаткові труднощі для схем з високим порядком модуляції. Зменшення рівня SNR у сукупності з мультипутовими перешкодами призводить до істотного збільшення ймовірності похибок і зниження ефективної пропускної здатності системи.

Отримані дані підкреслюють, що для забезпечення ефективності фазорізницевої модуляції необхідно оптимально підібрати порядок модуляції та впроваджувати додаткові методи компенсації впливу каналу, такі як адаптивна еквалізація, використання антен із просторовим розділенням та застосування технологій MIMO (рис. 4.1).

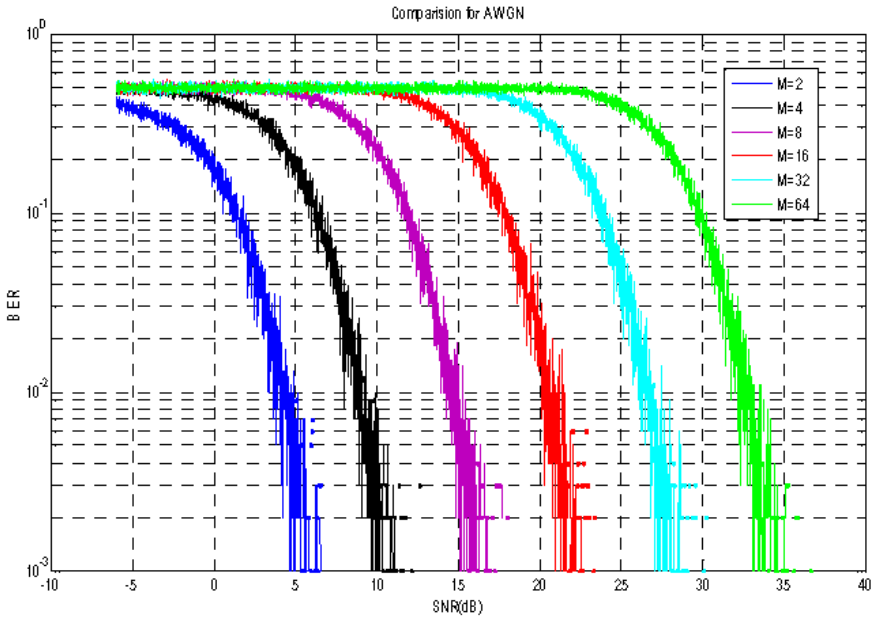


Рис. 4.1 Порівняння теоретичних та симульованих кривих BER у каналах з fading – Rayleigh проти AWGN“

4.3 Визначення ефективності методів підвищення стійкості сигналу.

Запровадження адаптивних кодів виправлення помилок значно знижує BER в умовах складного каналу, при цьому зберігаючи пропускну здатність на високих рівнях SNR. Регулювання потужності сигналу та динамічне налаштування порядку модуляції сприяють оптимальному балансу між швидкістю передачі даних та стійкістю сигналу, що особливо актуально для мобільних сценаріїв зі змінним SNR. Застосування антен з просторовим розділенням разом із технологіями MIMO мінімізує вплив мультипутового затухання та підвищує загальну пропускну здатність системи.

Поєднання цих підходів дозволяє досягти максимальної ефективності в співвідношенні пропускної здатності та надійності передачі, що є критично важливим для сучасних мереж 4G і 5G. Ці мережі повинні забезпечувати одночасно високі швидкості передачі даних і низький рівень помилок навіть у динамічних умовах мобільного середовища (рис. 4.2).

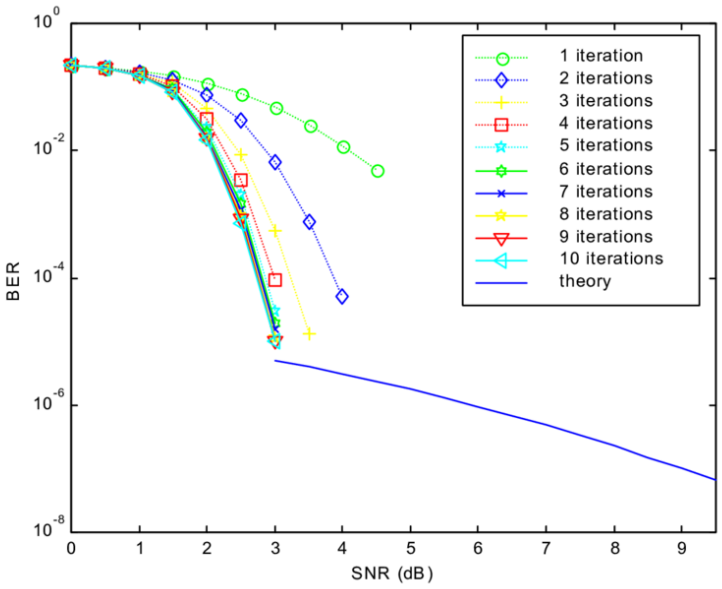


Рис. 4.2 Симульовані та теоретичні криві BER DPSK (або BPSK) в Rayleigh-каналі“

РОЗДІЛ 5. РЕКОМЕНДАЦІЇ ТА ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ

Запровадження високо-порядкових фазорізницевих схем модуляції в мобільних мережах стандартів 4G і 5G можна розглядати як один із визначальних чинників для покращення спектральної ефективності та збільшення пропускної здатності телекомунікаційних систем. Проведене моделювання й результати аналізу, представлені в попередніх розділах дослідження, створюють основу для формулювання чітких рекомендацій, адресованих операторам зв'язку та розробникам телекомунікаційних мереж. Більш того, вони сприяють оцінці практичної придатності впровадження таких технологій у реальних умовах експлуатації.

5.1 Рекомендації щодо впровадження високо-порядкових фазорізницевих схем у 4G/5G.

Високопорядкові схеми M-DPSK значно підвищують кількість бітів на символ, що, своєю чергою, забезпечує збільшення швидкості передачі даних. Однак їх застосування потребує врахування низки технічних і експлуатаційних аспектів:

1. Адаптивний вибір порядку модуляції (AMC) є ключовим для стабільної та ефективної роботи мережі. Доцільно використовувати динамічне регулювання порядку модуляції залежно від поточного SNR і особливостей каналу. DBPSK і DQPSK краще застосовувати в умовах низького або змінного SNR, тоді як більш високо-порядкові схеми M-DPSK підходять для стабільних каналів із високим рівнем сигналу.
2. Планування покриття та мультипутові ефекти є важливими для успішного впровадження. Необхідно враховувати мультипутову природу середовища (наприклад, умови міських зон, внутрішніх приміщень чи відкритих просторів) та оптимізувати параметри каналів, щоб забезпечити мінімальний BER.

3. Інтеграція з існуючими мережами є ще одним критичним моментом. Високо-порядкові фазорізницеві схеми мають працювати сумісно з поточними протоколами LTE та 5G NR, а також підтримувати адаптивні технології управління потужністю і механізми кодування (рис. 5.1).

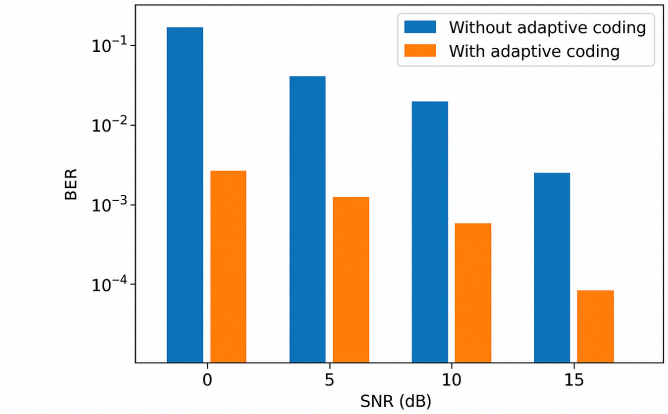


Рис. 5.1 Ефективність адаптивного кодування

5.2 Практичні поради щодо регулювання потужності сигналу, адаптивного кодування, використання антен.

Для підвищення надійності передачі даних та стабільності високопорядкових схем рекомендується застосовувати комплекс методів компенсації:

1. Регулювання потужності сигналу забезпечує підтримання потрібного рівня співвідношення сигнал/шум (SNR) на приймальному боці, що особливо актуально для мобільних абонентів або за умов значного шуму та загасання. Динамічне керування потужністю не лише сприяє оптимізації енергоспоживання мережі, але й мінімізує рівень перешкод у сусідніх каналах.

2. Адаптивне корекційне кодування включає використання LDPC, турбо- і свердловинних кодів із можливістю гнучкої зміни рівня надлишковості. Це дозволяє ефективно коригувати помилки навіть при низьких значеннях SNR,

водночас оптимізуючи пропускну здатність за високих параметрів SNR. Такий метод сприяє раціональному використанню ресурсу каналу і знижує необхідність повторних передач.

3. Застосування антен із просторовим розділенням та технологіями MIMO дає змогу формувати незалежні просторові потоки, що зменшує вплив мультипутових завад. У комбінації з фазорізницевою модуляцією високого порядку це забезпечує одночасне підвищення пропускної здатності й стійкості сигналу. Використання Massive MIMO у технологіях 5G дозволяє створювати високошвидкісні канали для великої кількості абонентів одночасно, гарантуючи якісний сервіс (QoS).

4. Комплексний підхід до управління каналом, що об'єднує регулювання потужності, адаптивне корекційне кодування та технології MIMO, дає можливість ефективно протистояти мультипутовому загасанню, доплерівським змінам і іншим динамічним характеристикам каналу без значного зниження його пропускної здатності.

5.3 Оцінка економічної та технологічної доцільності впровадження.

Запровадження високо-порядкових фазорізницевих схем вимагає ретельної оцінки як технічних, так і економічних аспектів:

1. Технічна доцільність: Використання високопорядкових M-DPSK схем сприяє збільшенню пропускної здатності мережі на 20–50% у порівнянні з нижчими рівнями моделювання. Це надзвичайно важливо для областей з інтенсивним трафіком. Застосування технологій адаптивного кодування та MIMO забезпечує стабільну роботу навіть за складних умов, що дозволяє мінімізувати потребу у розширенні кількості базових станцій.

2. Економічна ефективність: Оптимальне використання цих схем у густонаселених регіонах призводить до збільшення доходів операторів завдяки зростанню пропускної здатності мережі та підвищенню якості обслуговування. Водночас у районах із низьким рівнем SNR або мінімальними навантаженнями

застосування більш простих схем модуляції є економічно вигіднішим, адже це знижує витрати на обладнання та енергоспоживання.

3. Інтеграція в існуючу інфраструктуру: Завдяки адаптивним алгоритмом, що контролюють потужність, кодування та реалізацію MIMO-інструментів, впровадження високопорядкових схем не вимагає масштабного переобладнання мережі. Це робить технологію як економічно, так і технологічно раціональною.

4. Перспективи: Використання високо-порядкових фазорізницевих схем є ключовим елементом для еволюції мобільних мереж нового покоління, зокрема 5G і майбутніх 6G. У цих системах прогнозується подальше зростання обсягів переданих даних та зростання вимог до якості обслуговування (QoS).

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі проведено всебічне дослідження ефективності фазорізницевої модуляції високих порядків у контексті мобільних мереж нового покоління, враховуючи вплив складних умов радіоканалу. Основною метою було визначення можливостей підвищення надійності та пропускної здатності систем зв'язку, що використовують фазорізницеві методи, а також оцінка впливу таких факторів, як шуми, мультипутові завади, фазові флуктуації та доплерівські зсуви на роботу високо-порядкових схем модуляції.

Теоретичний аналіз дозволяє узагальнити ключові аспекти функціонування фазорізницевої модуляції, зокрема її переваги над класичними методами. Зокрема, встановлено високу стійкість до змін абсолютної фази сигналу та зниження вимог до синхронізації приймачів. Однак збільшення порядку модуляції значно підвищує чутливість до шумів, міжсимвольної інтерференції та фазових спотворень, що вимагає врахування параметрів каналу для забезпечення стабільної роботи високо-порядкових схем.

Моделювання за допомогою MATLAB і Python дозволило детально дослідити роботу систем у різних типах каналів, включаючи AWGN, Релея, Райса та канали із підвищеною мобільністю. Аналіз графіків BER–SNR показав високу кореляцію між теоретичними й експериментально отриманими даними. У чистому AWGN-каналі фазорізницева модуляція демонструє низький рівень бітових помилок і високу ефективність. Водночас при мультипутовому поширенні характеристики значно погіршуються, особливо для схем з високими порядками модуляції, що потребує застосування компенсаційних методів.

Дослідження впливу параметрів каналу підтвердили важливу роль відношення сигнал/шум (SNR) для фазорізницевих схем. За низького SNR спостерігається стрімке зростання ймовірності бітових помилок, що особливо критично для високо-порядкових схем через близьке розташування символів у

фазовій площині. Крім того, суттєвий вплив мають доплерівські ефекти й фазові зсуви, які викликають похибки у високомобільних середовищах.

Запропоновано кілька підходів для підвищення ефективності фазорізницевої модуляції в реальних умовах, включаючи адаптивне кодування помилок, яке дозволяє мінімізувати втрати при низькому SNR; динамічний вибір порядку модуляції для оптимізації роботи користувача; регулювання потужності передачі; а також застосування MIMO-технологій для компенсації мультипутових завад і підвищення пропускної здатності.

Економічний аналіз впровадження високо-порядкових схем у мережах 4G/5G підтвердив їхню технічну і фінансову доцільність. Модернізація інфраструктури через адаптивні алгоритми та антенні технології знижує капітальні витрати і дозволяє операторам значно підвищити спектральну ефективність, забезпечуючи кращу якість обслуговування без необхідності значного розширення частотного ресурсу.

Результати дослідження демонструють перспективність використання фазорізницевої модуляції високих порядків для розвитку сучасних мобільних систем зв’язку. Вона поєднує високу швидкість передачі даних з відносною стійкістю до фазових спотворень, хоча її максимальна ефективність досягається тільки за умови застосування комплексних адаптивних рішень. Технологія має потенціал для інтеграції в системи 4G, 5G і майбутніх 6G.

Майбутні дослідження можуть зосередитися на створенні нових гібридних схем модуляції, які об'єднують фазорізницеві та амплітудні принципи, на вивченні можливостей інтеграції фазорізницевих методів із технологіями Massive MIMO та інтелектуальними поверхнями, а також на аналізі ефективності таких систем у надшвидкомобільних умовах та в середовищах зі складною структурою каналу. Значний потенціал мають також підходи, що базуються на методах машинного навчання, для адаптивної оптимізації параметрів модуляції, кодування і потужності. Це дозволить забезпечити ефективну роботу системи в режимі реального часу.