МІЖНАРОДНИЙ ГУМАНІТАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет кібербезпеки, програмної інженерії та комп'ютерних наук
Кафедра інформаційних технологій

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи
другого (магістерського) рівня

на тему АДАПТИВНА СИСТЕМА ЗАВАДОСТІЙКОГО КОДУВАННЯ

Виконав: студент 2 курсу, групи ІКК 2.1
спеціальності
121 Інженерія програмного забезпечення

Павлюк Сергій Олександрович

Керівник Розенвассер Д.М.

Рецензент Педяш В.В.

Одеса – 2023

ДОВІДКА

кафедри ІТ про виконану магістерську роботу

студента 2 курсу ФКПІ та КН групи ІКК 2.1

Павлюка Сергія Олександровича

на тему Адаптивна система завадостійкого кодування

Висновок нормоконтролера пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи викон. з порушенням ДСТУ, робота виконана згідно внутрішнього положення кафедри

Нормоконтролер викл. каф. ІТІ (науковий ступінь, вчене звання, посада) 15.12.2023 (підпис, дата) Вишнівська І.В. (і. б. прізвище)

Висновок відповідального за наявність плагіату згідно з сертифікатом ID 1015677897 унікальність роботи підтверджено.

Відповідальна особа викл. каф. ІТІ. (науковий ступінь, вчене звання, посада) 15.12.2023 (підпис, дата) Вишнівська І.В. (і. б. прізвище)

Попередня експертиза (захист) магістерської роботи

(бакалаврської роботи чи магістерської роботи)

студ. Павлюк С.О. (прізвище і.б.) проведена "15" 12 2023 р.

Висновки Виконана магістерська робота відповідає завданню. Магістерська робота зроблена згідно вимог до випускних магістерських робіт.

В роботі розглядаються системи технології та стандарти, що передбачають використання адаптивного кодування, наведено змодельовані приклади комбінацій класичних та новітніх кодів у адаптивних системах і порівняння їх ефективності. Робота рекомендується до захисту

Члени комісії (підпис) к.т.н., проф. Стеценковська Т.В (науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище і.б.)

(підпис) к.т.н., доц. Григор'єва І.Г. (науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище і.б.)

(підпис) к.т.н., доц. Горбатов В.Є. (науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище і.б.)

МІЖНАРОДНИЙ ГУМАНІТАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет кібербезпеки, програмної інженерії та комп'ютерних наук
Кафедра інформаційних технологій
Освітній ступінь магістр
Галузь знань 12 Інформаційні технології
Спеціальність 121 Інженерія програмного забезпечення

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ІТ
к.т.н., доц.
_____ Т.І.Григор'єва
"25" 09 2023 року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

Павлюка Сергія Олександровича

1. Тема роботи: Адаптивна система завадостійкого кодування
керівник роботи Розенвассер Денис Михайлович
затверджені наказом закладу вищої освіти від 25.09.2023 р. № 1957

2. Строк подання студентом роботи 11.12.2023

3. Вихідні дані до роботи: Система передачі інформації з такими параметрами: швидкість цифрового потоку 70 Мбіт/сек, коефіцієнт розширення спектру 0,2. Необхідно проаналізувати можливості використання адаптивного кодеку у сполученні зі спектрально-ефективними методами модуляції для класичних та новітніх методів завадостійкого кодування (код Ріда-Соломона, каскадний код, турбокод і код з малою щільністю перевірок на парність).

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки
Розділ 1: Завадостійке кодування. Огляд
Розділ 2: Технологія адаптивного кодування та модуляції
Розділ 3: Дослідження адаптивних систем

. Перелік графічного матеріалу (з зазначенням обов'язкових креслень)
лайд 1 – Класичні коди (код Ріда-Соломона, згортковий код)
лайд 2 – Новітні коди (каскадний код, турбокод, код з малою щільністю перевірок на парність)
лайд 3 – Технології, що використовують адаптивне кодування та модуляцію (DVB-S2, DVB-CS, HSPA, WiMAX)
лайд 4 – Порівняння адаптивних систем кодування за завадостійкістю
лайд 5 – Висновки та рекомендації

. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 25.09.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	25.09.2023-5.10.2023	вик
2	Вивчення та огляд класичних та новітніх методів завадостійкого кодування (код Ріда-Соломона, згортковий код, каскадний код, турбокод і код з малою щільністю перевірок на парність)	6.10.2023-19.10.2023	вик
3	Дослідження технології адаптивного кодування та модуляції у різних стандартах та системах	20.10.2023-5.11.2023	вик
4	Моделювання та порівняння адаптивних систем з використанням різних методів завадостійкого кодування	6.11.2023-20.11.2023	вик
5	Висновки та рекомендації	21.11.2023-28.11.2023	вик
6	Перелік посилань	29.11.2023-5.12.2023	вик
7	Оформлення презентації	6.12.2023-11.12.2023	вик

Студент Павлюк С.О. Павлюк
(підпис)

Керівник роботи Д.М. Розенвассер
(підпис)

ВІДГУК КЕРІВНИКА

магістерської роботи студента Павлюка С.О.
на тему: «Адаптивна система завадостійкого кодування»

Завдання вивчення використання адаптивного кодеку для класичних та новітніх методів завадостійкого кодування є актуальною темою для існуючих систем передачі даних.

У роботі розглядаються системи, технології та стандарти, що передбачають використання адаптивного кодування. Наведено змодельовані приклади комбінацій класичних та новітніх кодів у адаптивних системах і порівняння їх ефективності.

Студент Павлюк С.О. добре розібрався з усіма проблемами і основну увагу приділив докладному аналізу ефективності адаптивних систем кодування.

Робота проводилася значною мірою самостійно. Графік консультацій не порушувався.

Завдання на ВКР виконано. Необхідні для цього розрахунки проведені. При оформленні пояснювальної записки та демонстраційних слайдів використовувались комп'ютерні технології.

Під час виконання магістерської роботи студент Павлюк С.О. глибоко вивчив питання організації адаптивних систем кодування, показав уміння користуватись навчальною та технічною літературою, ставити та розв'язувати інженерні задачі.

Магістерська робота відповідає вимогам до випускних магістерських робіт. Робота студента Павлюка С.О. заслуговує оцінки «добре».

Студент Павлюк С.О. заслуговує присвоєння кваліфікації магістр з інженерії програмного забезпечення за заявленою спеціальністю 121 «Інженерія програмного забезпечення».

Керівник
к.т.н., доцент кафедри КН Д.М. Розенвассер

РЕЦЕНЗІЯ

на магістерську роботу студента Павлюка С.О.
на тему: «Адаптивна система завадостійкого кодування»

Магістерська робота містить 3 розділи текстової частини, демонстраційні слайди, виконана згідно з завданням на магістерську роботу.

У роботі розглядається адаптивна система завадостійкого кодування та методи і технології, у яких вона застосовується.

Актуальність теми полягає в тому, що на сьогоднішній день існує безліч технологій, в кожній з яких виникає необхідність збільшення швидкості і якості передачі даних. Для оцінки якості зручно використовувати такий показник як ймовірність помилки біт. Також виникає необхідність універсалізації пристроїв для роботи в різних технологіях і при різних умовах. У даній роботі запропоновано універсальний адаптивний кодек для виправлення помилок, що виникають через шум у каналах зв'язку.

Магістерська робота виконана відповідно до завдання. Демонстраційні матеріали й пояснювальна записка виконані охайно й відповідно до вимог ЄСКД. Прийняті рішення обґрунтовано, розрахунки виконано правильно.

Автором показана достатня теоретична підготовка. Робота виконана грамотно, текст її послідовний та зрозумілий, оформлення роботи та демонстраційних слайдів якісне.

До недоліків роботи варто віднести:

- не всі комбінації кодових конструкцій і модуляцій розглянуто;
- відсутнє економічне обґрунтування вибору адаптивного кодеку для заданих параметрів системи.

Зазначені недоліки суттєво не знижують якості виконаної роботи.

Магістерська робота відповідає вимогам до випускних кваліфікаційних робіт магістрів. Робота студента Павлюка С.О. заслуговує оцінки «добре».

Студент Павлюк С.О. заслуговує присвоєння кваліфікації магістр з інженерії програмного забезпечення за заявленою спеціальністю 121 «Інженерія програмного забезпечення».

Рецензент
к.т.н., доцент кафедри КІ та ІТ Педяш В.В.

UNICHECK
by Turnitin

Ім'я користувача:
Анна Серединко

Дата перевірки:
11.12.2023 23:53:29 MSK

Дата звіту:
12.12.2023 00:02:27 MSK

ID перевірки:
1015995245

Тип перевірки:
Doc vs Internet + Library

ID користувача:
100001433

Назва документа: диплом Павлюк

Кількість сторінок: 38 **Кількість слів:** 8933 **Кількість символів:** 63010 **Розмір файлу:** 1.34 MB **ID файлу:** 1015677897

8.06% Схожість

Найбільша схожість: 3.2% з джерелом з Бібліотеки (ID файлу: 1015327938)

5.21% Джерела з Інтернету	185	Сторінка 40
3.2% Джерела з Бібліотеки	1	Сторінка 40

0% Цитат

Вилучення цитат вимкнене

Вилучення списку бібліографічних посилань вимкнене

0% Вилучень

Немає вилучених джерел

Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи	32

РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської роботи: 51 с., 17 рис., 2 табл., 38 джерел.

АДАПТИВНІ СИСТЕМИ, ЗАВАДОСТІЙКЕ КОДУВАННЯ, КОД РІДА-СОЛОМОНА, ЗГОРТКОВИЙ КОД, КАСКАДНИЙ КОД, ТУРБОКОД, LDPC КОД, DVB-S2, DVB-RCS, HSPA, WIMAX

Об'єкт дослідження – адаптивні системи завадостійкого кодування.

Мета роботи – дослідження адаптивних систем завадостійкого кодування за критеріями завадостійкості та частотної, енергетичної та інформаційної ефективності.

Метод дослідження – аналітичний з використанням комп'ютерних технологій.

У магістерській роботі проведено дослідження адаптивних систем кодування за критеріями завадостійкості та частотної, енергетичної та інформаційної ефективності. Проаналізовані технології, що вимагають використання таких систем та наведено огляд завадостійких кодів, що можуть використовуватися в таких системах.

Зроблено порівняння різних комбінацій завадостійкого кодування в адаптивних системах. Дослідження параметрів адаптивних систем кодування виконано з використанням комп'ютерного моделювання.

ABSTRACT

The text part of the master paper: 51 pp., 17 figures, 2 tables, 38 references.

ADAPTIVE CODING SYSTEMS, REED-SOLOMON CODE, CONVOLUTIONAL CODE, CONCATENATED CODE, TURBO CODE, LDPC CODE, DVB-S2, DVB-RCS, HSPA, WIMAX

Object of research is an adaptive error-control code systems.

The purpose of the work is to study adaptive coding systems based on the criteria of noise immunity and frequency, power and information efficiency.

The research method is analytical with the use of computer technologies.

In the master paper the research of adaptive coding systems according to the criteria of noise immunity and frequency, power and information efficiency has been performed. The technologies that require the use of such systems are analysed and an overview of the error correcting codes that can be used in such systems is given.

The comparison of different combinations of error correcting codes in adaptive systems framework is made. The study of parameters of adaptive coding systems is performed using computer simulation.

ЗМІСТ

ВСТУП……11
1 ЗАВАДОСТІЙКЕ КОДУВАННЯ. ОГЛЯД ……12
1.1 Код Ріда-Соломона ……12
1.2 Згорткове кодування……16
1.3 Каскадний код……19
1.4 Турбокод……21
1.5 Код з малою щільністю перевірок на парність ……23
1.6 Висновки до розділу 1……25
2 ТЕХНОЛОГІЯ АДАПТИВНОГО КОДУВАННЯ ТА МОДУЛЯЦІЇ……27
2.1 DVB-S2……27
2.1.1 Процес передачі інформації в DVB-S2……30
2.2 Інші технології……32
2.2.1 DVB-RCS……32
2.2.2 Протокол високошвидкісного пакетного доступу (HSPA)……33
2.2.2.1 HSDPA……33
2.2.2.2 HSUPA……34
2.2.3 WiMAX……34
2.3 Адаптивне кодування та модуляція (АКМ)……37
2.3.1 Проектування лінії АКМ ……39
2.3.2 Переваги адаптивного кодування та модуляції ……40
2.4 Висновки до розділу 2……41
3 ДОСЛІДЖЕННЯ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ……42
3.1 Моделювання №1. RS код + турбокод ……42
3.2 Моделювання №2. Каскадний код + LDPC код……45
3.3 Порівняння ефективності……47
3.4 Висновки до розділу 3……49
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ……51
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ТА ПОСИЛАНЬ ……52
ДОДАТОК А……54

1 КОДИ ВИПРАВЛЕННЯ ПОМИЛОК. ОГЛЯД

Код виправлення помилок (ECC) — це схема кодування, яка передає повідомлення у вигляді двійкових чисел таким чином, що повідомлення можна відновити, навіть якщо деякі біти помилково перевернуто. Вони використовуються практично у всіх випадках передачі повідомлень, особливо в сховищах даних, де ECC захищають від пошкодження даних [1].

Канальне кодування для виявлення та виправлення помилок допомагає розробникам систем зв'язку зменшити вплив зашумленого каналу передачі. Теорія кодування з контролем помилок була предметом інтенсивного вивчення з 1940-х років і зараз широко використовується в системах зв'язку [2].

1.1 Коди Ріда-Соломона

Коди Ріда–Соломона — це група кодів для виправлення помилок, які були представлені Ірвінгом С. Рідом і Гюставом Соломоном у 1960 році. Вони мають багато застосувань, найвідоміші з яких включають споживчі технології, такі як компакт-диски, DVD-диски, диски Blu-ray, QR-коди, технології передачі даних, такі як DSL і WiMAX, системи трансляції, такі як DVB (Digital Video Broadcasting) і ATSC (Advanced Television Systems Committee), а також системи зберігання, такі як RAID 6. Вони також використовуються в супутниковому зв'язку.

Типова система з кодуванням Ріда-Соломона [1] представлена на рис. 1.1.

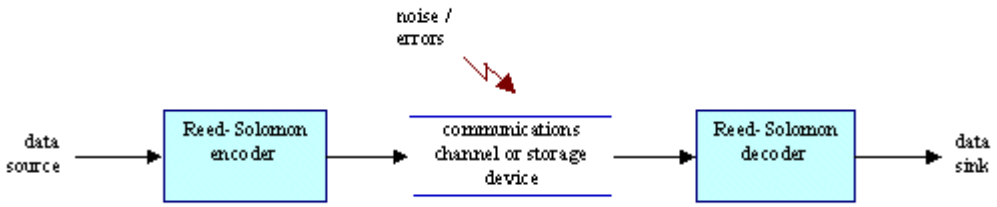

Рисунок 1.1 – Типова система з кодуванням Ріда-Соломона

Коди Ріда-Соломона працюють з блоком даних, який розглядається як набір кінцевих елементів поля, які називаються символами. У кодах Ріда–Соломона кожен код характеризується трьома параметрами: розміром алфавіту q, довжиною блоку n і довжиною повідомлення k, де $k < n \leq q$. Набір символів алфавіту інтерпретується як скінченне поле порядку q, і, таким чином, q має бути степенем простого числа. Процес кодування передбачає код RS (n, k), де k — кількість

символів даних, що кодуються, а n — загальна кількість символів коду в кодованому блоці, кожен з яких зберігає k символів даних, які потім надсилаються через канал стирання.

Коди Ріда-Соломона здатні виявляти та виправляти багатосимвольні помилки. Додавши r контрольних символів до даних, код Ріда–Соломона може виявити будь-яку комбінацію до r помилкових символів або виправити до ⌊r /2⌋ символів. Вибір r залежить від розробника коду та може бути обраний у широких межах.

Код Ріда–Соломона відомий як систематичний код, оскільки дані залишаються незмінними, а символи парності додаються [5]. У найбільш корисних параметризаціях коду Ріда–Соломона довжина блоку зазвичай є деякою постійною кратністю довжини повідомлення, тобто швидкість R = k / n є деякою константою.

Коди Ріда-Соломона досягають максимально можливої мінімальної відстані коду для будь-якого лінійного коду з однаковою довжиною вхідного та вихідного блоку кодера. Для недвійкових кодів відстань між двома кодовими словами визначається (аналогічно відстані Хеммінга) як кількість символів, якими послідовності відрізняються. Для кодів Ріда-Соломона мінімальна відстань коду [4] визначається формулою:

$$d_{min} = n - k + 1$$

Код здатний виправляти будь-яку комбінацію q_{corr} або менше помилок [4], де q можна виразити як:

$$q_{corr} = \left\lfloor \frac{d_{min} - 1}{2} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{n - k}{2} \right\rfloor$$

Можна сказати, що декодер має r = n – k надлишкових символів, які потрібно «витратити», що вдвічі перевищує кількість виправних помилок. Для кожної помилки один зайвий символ використовується для визначення місця помилки, а інший зайвий символ використовується для визначення її правильного значення.

Схема декодера Ріда-Соломона наведена на рис. 1.2 [3].

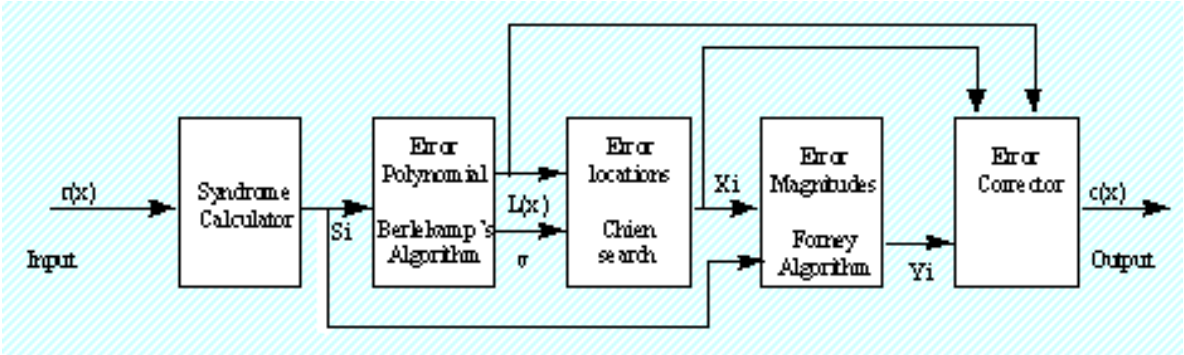

Рисунок 1.2 – Декодер Ріда-Соломона

Коли кодове слово декодується, є три можливі результати:

- Якщо 2s+r < 2q (s помилок, r стирань), то вихідне передане кодове слово завжди буде відновлено,
- Якщо 2s+r > 2q, декодер виявить, що він не може відновити вихідне кодове слово, і вкаже на цей факт.
- Якщо 2s+r > 2q, декодер неправильно декодує та відновить неправильне кодове слово без жодної вказівки [3].

Імовірність кожної з трьох можливостей залежить від конкретного коду Ріда-Соломона, а також від кількості та розподілу помилок.

Перевага використання кодів Ріда-Соломона полягає в тому, що ймовірність помилки, що залишається в декодованих даних, (зазвичай) набагато нижча, ніж ймовірність помилки, якщо Ріда-Соломона не використовується. Це часто описують як приріст кодування [2].

Аналіз продуктивності кодів RS виконується для різних кодових швидкостей за допомогою випадкового потоку даних. Тут ми використали модуляцію та демодуляцію BPSK (двійкова фазова маніпуляція) для всіх симуляцій. Закодовані дані потім передаються через гаусівський канал, який додає до канальних символів, створюваних кодувальником, додатковий білий гаусівський шум (AWGN). На наступних малюнках E_b/N_o dB позначає відношення енергії інформаційного біта до густини потужності шуму, а на осі у ми відкладаємо частоту помилок у бітах (BER). Спочатку ми виконуємо моделювання для кодів RS з різними кодовими швидкостями, тобто 0.96, 0.878, 0.80 і 0.647. Ці моделювання виконуються для постійної довжини блоку або довжини кодового слова, яка становить 255. З рис. 1.3, можна побачити, що коли ми зменшуємо швидкість коду, зберігаючи довжину блоку постійною, продуктивність BER покращується.

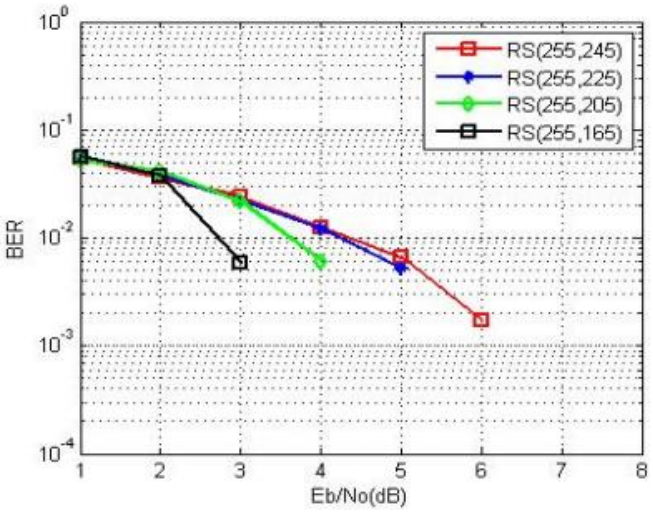

Рисунок 1.3 – Порівняння продуктивності BER кодів RS для різних кодових швидкостей і фіксованої довжини блоку 255

Ми бачимо, що абсолютна продуктивність BER приблизно на 2 дБ краща для кодової швидкості 0.647, ніж 0.96 при BER 0.0066. Далі ми провели моделювання для кодів RS для різних кодових швидкостей, а також довжин блоків.

Ми бачимо з рис. 1.4, оскільки довжина блоку збільшується, продуктивність BER також покращується. Отже, тут найкращий результат виходить з RS (400 240) з m= 9, тобто кількість бітів на символ дорівнює 9 [2].

Тепер ми можемо сказати, що для кодів RS продуктивність BER покращується зі зменшенням кодової швидкості та деякою мірою до більшої довжини блоку. Код RS, який добре підходить для виправлення пакетних помилок, показує низьку продуктивність BER для нижчих значень SNR через переважно випадкові помилки, внесені AWGN.

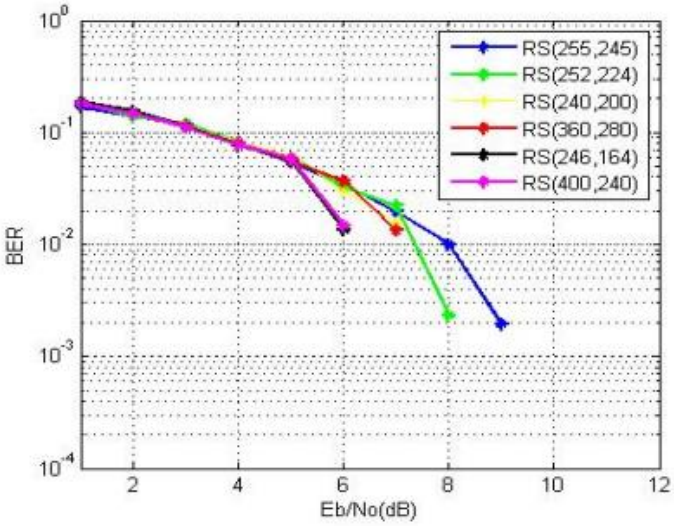

Рисунок 1.4 – Порівняння продуктивності BER кодів RS для різних кодових швидкостей і довжин блоків

1.2 Згорткові коди

Згортковий код, представлений у 1955 році Пітером Еліасом [6], є типом коду з виправленням помилок, який генерує символи парності за допомогою ковзного застосування булевої поліноміальної функції до потоку даних. Ковзне застосування представляє «згортку» кодера над даними, що породжує термін «згорткове кодування» [7].

Згорткові коди широко використовуються для досягнення надійної передачі даних у численних програмах, таких як цифрове відео, радіо, мобільний і супутниковий зв’язок.

Згорткові коди пропонують підхід до кодування контролю помилок, який істотно відрізняється від блокових кодів. На відміну від блокового кодера, згортковий кодер кодує весь потік даних в одне кодове слово; послідовно відображає інформацію в кодові біти шляхом згортання послідовності інформаційних бітів із послідовностями «генератора»; не потрібно сегментувати потік даних на блоки фіксованого розміру; це машина з пам'яттю. Ця фундаментальна відмінність надає інший характер дизайну та оцінці коду. У той час як блокові коди базуються на алгебраїчних/комбінаторних методах, згорткові коди базуються на методах конструювання [8].

Помилки, викликані шумом каналу, зокрема адитивним білим гаусовим шумом (AWGN), зазвичай уникаються програмним забезпеченням для виправлення помилок. Для цієї мети в каналах даних широко використовується згорткове кодування. Його найкраще використовувати в поєднанні з іншими методами виправлення помилок, і разом помилки можна майже повністю видалити.

Схеми згорткового кодування потребують узгодженої пари кодерів і декодерів. Хоча реалізації дещо відрізняються, алгоритми кодера та декодера мають бути однаковими. Кожен повинен містити конкретні знання про найімовірніші переходи, які можуть відбутися. Саме це основне припущення дозволяє найкраще оцінити передбачуване повідомлення. Їхні можливості виправлення помилок відрізняються, і відомо, що деякі конструкції кращі за інші. Схеми кодування, які використовують більшу складність для формування своїх кодованих виходів, як правило, краще виправляють помилки.

Важке прийняття рішень означає зробити вузький вибір між двома цінностями; у цьому випадку між двійковою одиницею або нулем. Інший метод також використовується для деяких програм, м’якого прийняття рішень, де розглядаються більш градуйовані значення. М'яке прийняття рішень може спричинити менший рівень помилок, ніж використання жорстких рішень, хоча, можливо, це занадто складно для вступу в предмет [7].

Ковзний характер згорткових кодів полегшує решітку декодування за допомогою незмінної в часі решітки. Інваріантне в часі решітчасте декодування дозволяє декодувати згорткові коди за допомогою м’якого рішення максимальної ймовірності з прийнятною складністю. Здатність виконувати економічне м’яке декодування з максимальною ймовірністю є однією з головних переваг згорткових кодів. Це на відміну від класичних блокових кодів, які, як правило, представлені решіткою, що змінюється в часі, і тому зазвичай декодуються з жорстким рішенням.

Здатність виконувати економічне декодування з м’яким рішенням для згорткових кодів, а також довжина блоку та гнучкість кодової швидкості згорткових кодів роблять їх дуже популярними для цифрового зв’язку.

Щодо кодування на рис. 1.5 [6], у нульовий час, початковий стан перед отриманням будь-якого введення, усі виходи регістру є нулями, а виходи кодера можна не враховувати. Коли перший біт, то логіка 1, переходить у регістр s_0, стан регістра зсуву змінюється з 000 на 100. У результаті вихід верхнього суматора стає 1, а вихід нижнього суматора стає 1. Потім вони об’єднуються, щоб отримати вихідну пару 11. Після одного інтервалу часу наступний вхідний біт, нуль, переходить у s_0, а його попередній вміст переміщується в s_1. Попередній вміст s_1 переміщується в s_2, а попередній вміст s_2 втрачається. Стан регістра змінюється зі 100 на 010, і новий вихід формується на основі нового стану регістрів (знову 11). Покрокове виконання продовжується таким чином через дискретні інтервали часу, доки останній вхідний біт не виведе свої виходи [6].

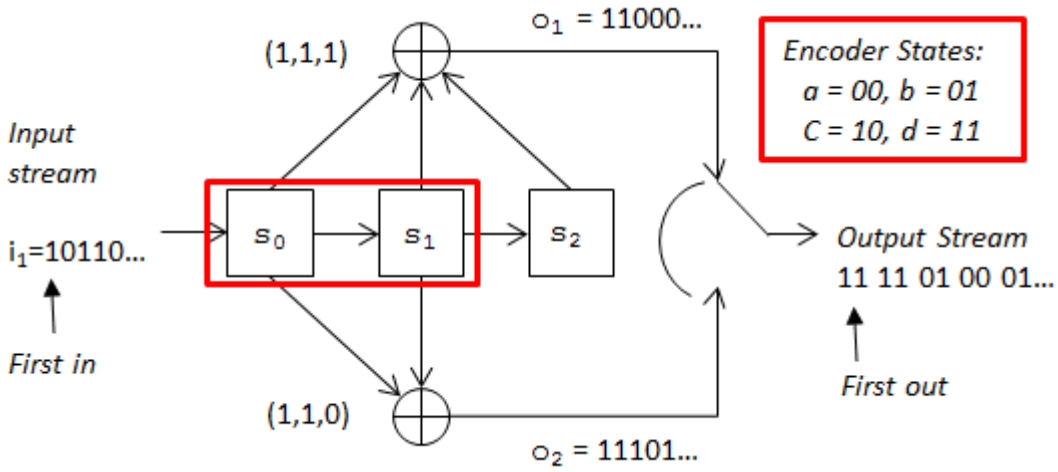

Рисунок 1.5 – Базова реалізація згорткового кодера

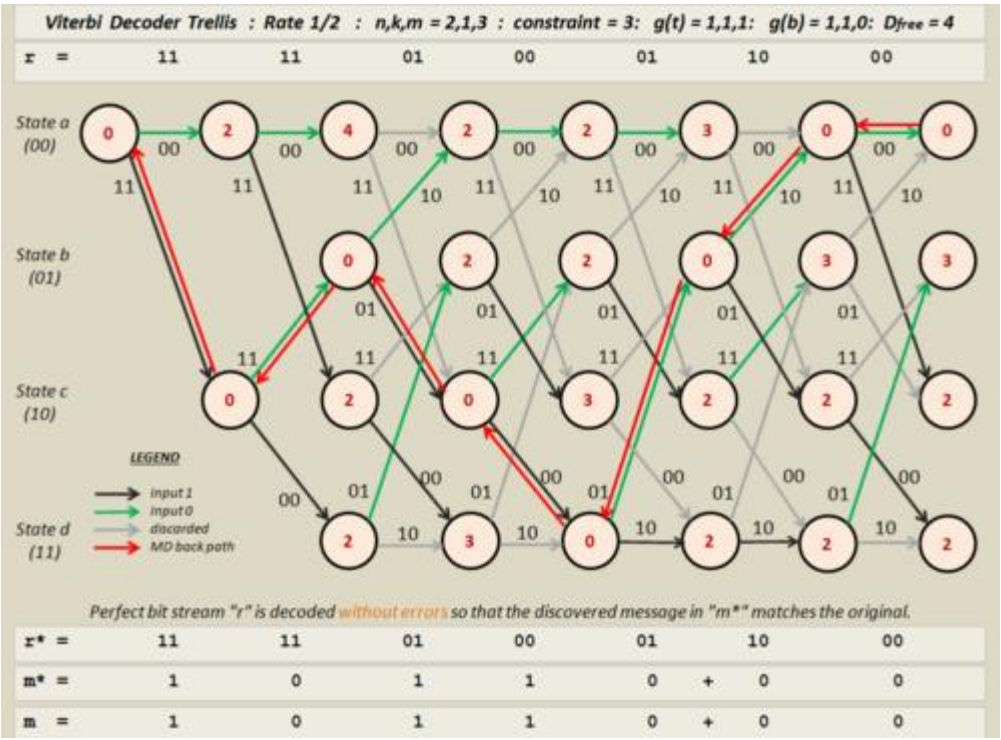

Рисунок 1.6 – Вітербі декодер до кодера з рисунку 1.5

Робота декодера та його виправлення помилок проілюстровано тут за допомогою ґратчастої графіки (див. рис. 1.6) [6]. Показники чітко показані, а шлях мінімальної відстані Хеммінга або зворотний шлях виділено червоним. У цьому випадку вхід до декодера не містить помилок каналу та повертає правильні дані.

Мета реалізації полягає в тому, щоб знайти шлях мінімальної різниці. Це називається зворотним шляхом і позначено на схемі червоним кольором. Він об’єднує вузли в кожному стовпці, які самі представляють найкращі оцінки на даний момент. Ці найкращі оцінки для кожного вузла називаються їхніми показниками. Це накопичені значення відстані Хеммінга.

Половину всіх розгалужень слід відкинути як маршрути зворотного шляху. На діаграмах їх можна побачити сірим кольором. Зворотний шлях малюється від найнижчої метрики в останньому стовпці вздовж дозволених гілок, шляхів вижилих, до нульової точки в решітці. Оскільки найнижча точка в інших стовпцях може бути неоднозначною, можливо, все одно, зворотний шлях не може залежати лише від цих значень. Саме правильне відкидання гілок зменшує дозволені зворотні маршрути лише до одного. Саме це розуміння дозволило Ендрю Вітербі сформулювати свій метод [6].

Мінімальна вільна відстань (d_f) конфігурації згорткового кодування є мірою її здатності виправляти помилки [9]. Вищі значення дають кращі результати, ніж нижчі, як у виправленні загальних помилок, так і в обробці кластерів помилок. Це стосується ваги шляхів. Вага шляху – це лише кількість бітів логічної одиниці, розташованих уздовж його країв. Однак нас цікавить шлях мінімальної ваги між двома точками.

Здатність виправляти помилки C_e конфігурації була кількісно визначена для цілей порівняння [6] як:

$$C_e = \frac{(d_f - 1)}{2}$$

1.3 Каскадні коди

Каскадні коди — це коди з виправленням помилок, які складаються з двох або більше простіших кодів для досягнення високої продуктивності з прийнятною складністю. Спочатку представлені Форні в 1965 році для вирішення теоретичної проблеми, вони стали широко використовуватися в космічному зв'язку в 1970-х роках [10].

У своїй докторській дисертації Форні показав, що каскадні коди можуть бути використані для досягнення експоненціального зменшення ймовірностей помилок на всіх швидкостях передачі даних, менших за пропускну здатність, зі складністю декодування, яка зростає лише поліноміально з довжиною кодового блоку N.

Базова схема каскадного кодування, розглянута Форні [10], показана на рис. 1.7:

Рисунок 1.7 – Базова схема каскадного кодування

Внутрішній код є коротким блоковим кодом, подібним до того, який передбачив Шеннон, зі швидкістю r, близькою до C, довжиною блоку n і, отже, 2^{nr} кодові слова. Внутрішній декодер декодує оптимально, тому його складність експоненціально зростає з n; для досить великого n досягається помірно низька ймовірність помилки декодування.

Зовнішній код — це алгебраїчний код Ріда-Соломона (RS) довжиною 2^{nr} над кінцевим полем із 2^{nr} елементів, кожен елемент відповідає внутрішньому кодовому слову. Тому загальна довжина блоку каскадного коду дорівнює $N = n2^{nr}$, що є експоненціальним по n, тому складність внутрішнього декодера є лише лінійною по N. Зовнішній декодер використовує алгебраїчний алгоритм виправлення помилок, складність якого становить єдиний поліном у коді RS довжиною 2^{nr}; це може знизити остаточну ймовірність помилки декодування до бажаного рівня.

Каскадні коди є кодами, що наближаються до ємності. Усі коди, що наближаються до ємності, тепер розглядаються як «коди на графах» [11], у яких (можливо, велика) кількість простих кодів пов’язані між собою відповідно до деякої топології графа. Будь-який такий код можна розглядати як каскадний код.

Хоча проста схема каскадування була реалізована вже в 1971 році для орбітальної місії Mariner Mars, каскадні коди почали регулярно використовувати для далекого космічного зв’язку з програмою «Вояджер», яка запустила два космічні зонди в 1977 році. З того часу каскадні коди стали робочою конячкою для ефективного кодування з корекцією помилок і залишалося таким принаймні до винаходу турбо-кодів і кодів LDPC [12].

Як правило, внутрішній код є не блоковим кодом, а згортковим декодованим кодом Вітербі з м’яким рішенням і короткою довжиною обмежень [13]. Для зовнішнього коду використовується довший блоковий код із жорстким рішенням, часто код Ріда-Соломона з восьмибітовими символами. Більший розмір символу робить зовнішній код стійкішим до спалахів помилок, які можуть виникати через порушення каналу, а також через те, що помилковий вихід самого згорткового коду є пакетним. Між двома кодами зазвичай додається шар перемежування, щоб розподілити пакети помилок у більш широкому діапазоні.

Поєднання внутрішнього згорткового коду Вітербі із зовнішнім кодом Ріда–Соломона (відомим як код RSV) досі широко використовується для супутникового зв’язку, наприклад, стандарт цифрового телевізійного мовлення DVB-S [11].

Проста схема каскадування також використовується на компакт-диску (CD), де шар перемежування між двома кодами Ріда–Соломона різного розміру розподіляє помилки між різними блоками. Ітераційне декодування тепер також застосовується до послідовних каскадних з’єднань, щоб досягти вищих переваг кодування.

1.4 Турбо коди

Турбо-коди — це клас високопродуктивних кодів прямого виправлення помилок (FEC), розроблених приблизно в 1990–1991 роках (але вперше опублікованих у 1993 році), які були першими практичними кодами, які близько наблизилися до пропускної здатності каналу, теоретичного максимуму для кодової швидкості на який надійний зв’язок все ще можливий за певного рівня шуму. Турбо-коди використовуються в мобільному зв’язку 3G/4G (наприклад, в UMTS і LTE) і в супутниковому (далекому космосі) комунікації, а також інші програми, де розробники прагнуть досягти надійної передачі інформації через канали зв’язку з обмеженою пропускною здатністю або затримкою за наявності шуму, що пошкоджує дані. Турбо-коди в даний час конкурують з кодами LDPC, які забезпечують аналогічну продуктивність.

Схема турбокодера [14] зображена на рис. 1.8.

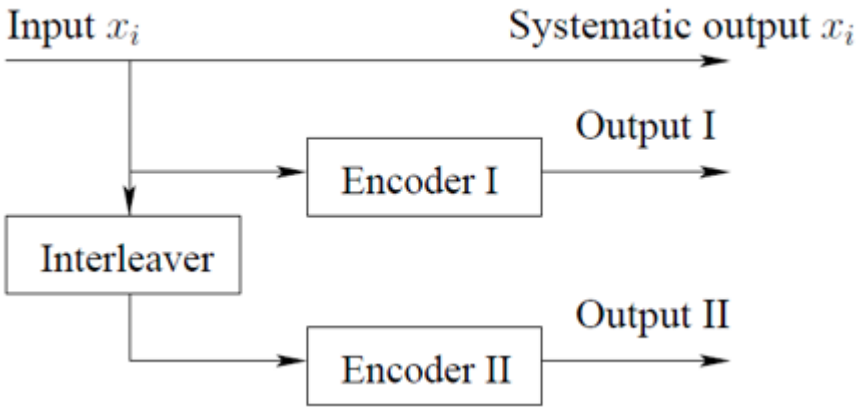

Рисунок 1.8 – Турбо кодер

На рис. 1.8 обидва кодери ідентичні. З діаграми вище ми можемо зробити висновок, що наш вхід розділений на два шляхи. На одному шляху вхід надходить на вихід систематичним шляхом. На іншому шляху вхідні дані проходять через перемежувач. Перемежувач відповідає за скремблювання вхідних даних певним способом, який називається псевдовипадковим способом. Потім вихідні дані перемежувача проходять через два кодери. Коли дані проходять через кодери, вводиться надлишковість; навіть якщо вихід з одного декодера має низьку вагу, існує висока ймовірність того, що вихід з іншого декодера [15] матиме вищу вагу (див. рис. 1.9). Отже, на стороні декодера для декодування вибирається кодована послідовність даних з більшою вагою.

Ще одна перевага паралельних декодерів полягає в тому, що ми можемо перевірити узгодженість між двома закодованими послідовностями даних. В результаті ми підвищуємо ефективність і зменшуємо помилки.

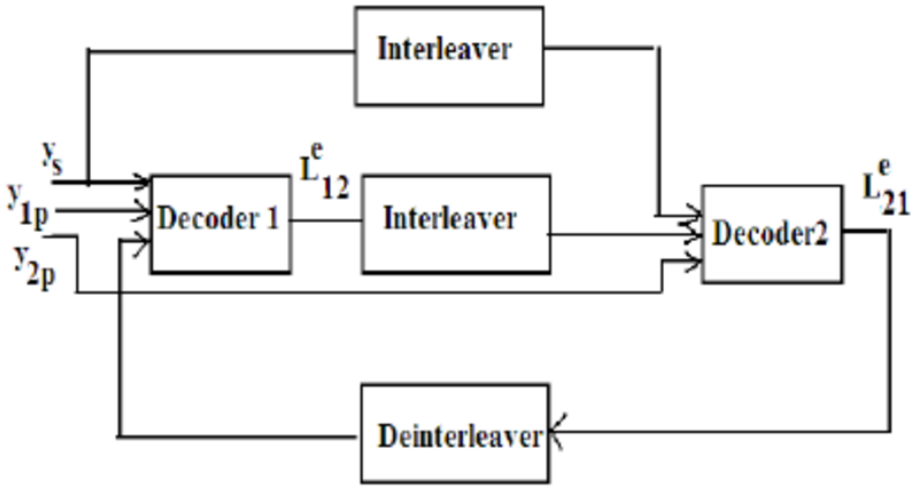

Рисунок 1.9 – Турбо декодер

Декодери засновані на техніці soft-in-soft-out (SISO). На стороні декодера систематичний вхід і дві закодовані послідовності даних з двох кодерів подаються як вхідні дані. Спочатку декодер намагається декодувати різні вхідні дані в порядку. Потім дані повертаються через канал зворотного зв’язку. Декодер ітеративно декодує надані йому вхідні дані; після кількох ітерацій ми можемо зробити досить хорошу оцінку біта даних, який було передано, і, як результат цього механізму зворотного зв’язку, турбо-коди ефективно досягають пропускної здатності Шеннона.

Використання зворотного зв'язку вимагає існування алгоритмів декодування SISO для кодів обох компонентів. Оскільки алгоритм м’якого виведення Вітербі (SOVA) вже був доступний на момент винаходу, застосування згорткових кодів

виглядало природним для обох кодів. З міркувань ефективності використання пропускної здатності послідовне об’єднання замінено на паралельне об’єднання [16].

Насправді, паралельне об’єднання двох кодів зі швидкістю R_1 і R_2 дає глобальну швидкість R_p дорівнює:

$$R_p = \frac{R_1 \cdot R_2}{1 - (1 - R_1)(1 - R_2)}$$

Ця швидкість вища, ніж у послідовно з’єднаного коду, де:

$$R_s = R_1 \cdot R_2$$

для однакових значень R_1 і R_2, і чим нижчі ці показники, тим більша різниця.

1.5 Коди перевірки парності з низькою щільністю

Код перевірки парності з низькою щільністю (LDPC) — це лінійний код з виправленням помилок, метод передачі повідомлення по каналу передачі з перешкодами. Вони також відомі як коди Галлагера і були винайдені ним у його докторській дисертації на початку 1960-х років.

Двійковий код перевірки парності — це блоковий код фіксованої довжини n. Символи в коді задовольняють r рівнянь перевірки парності виду: xa ⊕ xb ⊕xc ⊕…⊕ xz = 0, де ⊕ означає додавання за модулем 2, а xa, xb, xc, …, xz є кодовими символами в рівнянні. Кожне кодове слово довжини n може містити n – r = k інформаційних цифр і r контрольних цифр. Матриця перевірки парності — це двійкова матриця з r рядків на n стовпців. Рядки представляють рівняння, а стовпці представляють цифри в кодовому слові. Є 1 в і-му рядку та j-му стовпці тоді і тільки тоді, коли і-та цифра коду міститься в j- му рівнянні [18].

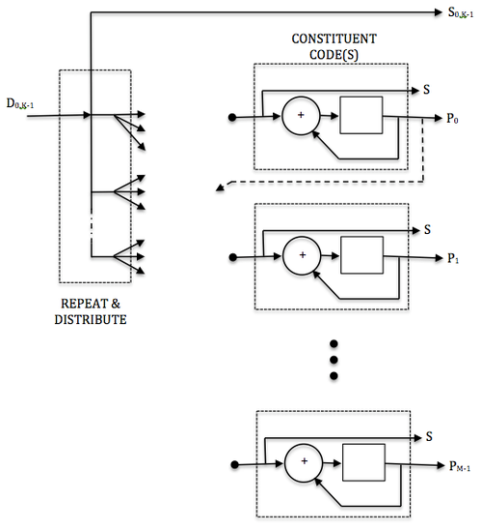

Рисунок 1.10 Схема кодера LDPC

Для коду LDPC відсоток одиниць у матриці перевірки парності низький. Звичайний код LDPC має властивість, що кожна цифра коду міститься в однаковій кількості рівнянь і кожне рівняння містить однакову кількість кодових символів. (Хоча нерегулярний код LDPC послаблює ці умови).

Під час кодування кадру (див. рис. 1.10) біти вхідних даних (D) повторюються та розподіляються на набір складових кодерів. Складові кодери зазвичай є накопичувачами, і кожен накопичувач використовується для генерації символу парності. Одна копія вихідних даних ($S_{0,K-1}$) передається з бітами парності (P), щоб скласти кодові символи. S бітів від кожного складового кодера відкидаються.

Для порівняння, класичні турбо-коди зазвичай використовують два складові коди, налаштовані паралельно, кожен з яких кодує весь вхідний блок (K) бітів даних. Ці складові кодери є рекурсивними згортковими кодами (RSC) середньої глибини (8 або 16 станів), які розділені кодовим перемежувачем, який чергує одну копію кадру.

Код LDPC, навпаки, паралельно використовує багато складових кодів малої глибини (накопичувачів), кожен з яких кодує лише невелику частину вхідного кадру. Багато складових кодів можна розглядати як багато «згорткових кодів» низької глибини (2 стани), які з’єднані за допомогою операцій повторення та розподілу. Операції повторення та розподілення виконують функцію перемежувача в турбокоді [19].

Можливість більш точно керувати з’єднаннями різних складових кодів і рівнем надлишковості для кожного вхідного біта дає більшу гнучкість у проектуванні кодів LDPC, що в деяких випадках може привести до кращої

продуктивності, ніж турбо-коди. Здається, що турбо-коди все ще працюють краще, ніж LDPC, на низьких швидкостях коду, або, принаймні, для турбо-кодів легше проектувати добре продуктивні коди з низькою швидкістю.

З практичної точки зору апаратне забезпечення, яке формує акумулятори, повторно використовується під час процесу кодування. Тобто, як тільки сформовано перший набір бітів парності та збережено біти парності, для генерації наступного набору бітів парності використовується те ж саме обладнання акумулятора.

Декодування максимальної правдоподібності коду LDPC на двійковому симетричному каналі не є практичним.

Однак субоптимальні методи, засновані на ітеративному декодуванні розповсюдження переконань, дають чудові результати та можуть бути реалізовані на практиці. Неоптимальні методи декодування розглядають кожну перевірку парності, яка становить LDPC, як незалежний код єдиної перевірки парності (SPC). Кожен код SPC декодується окремо за допомогою методів soft-in-soft-out (SISO), таких як SOVA та інші похідні від них. Інформація про м’яке рішення з кожного декодування SISO перевіряється та оновлюється за допомогою інших надлишкових декодувань SPC того самого біта інформації. Потім кожен код SPC знову декодується з використанням оновленої інформації про м’яке рішення. Цей процес повторюється, поки не буде досягнуто дійсне кодове слово або декодування не буде вичерпано.

Декодування кодів SPC часто називають обробкою «контрольного вузла», а перехресну перевірку змінних часто називають обробкою «змінного вузла» [19].

У практичній реалізації декодера LDPC набори кодів SPC декодуються паралельно для збільшення пропускної здатності.

1.6 Висновки

Дві основні категорії кодів ECC - це блокові коди та згорткові коди. Блокові коди працюють з блоками (пакетами) фіксованого розміру бітів або символів попередньо визначеного розміру. Згорткові коди працюють із потоками бітів або символів довільної довжини. Найчастіше вони м'яко декодуються за допомогою алгоритму Вітербі.

Існує багато типів блокових кодів, але серед класичних найбільш помітним є кодування Ріда-Соломона через його широке поширення.

Класичні блокові коди зазвичай декодуються за допомогою алгоритмів жорсткого прийняття рішень, що означає, що для кожного вхідного та вихідного сигналу приймається жорстке рішення, чи відповідає він одиниці чи нулю. Навпаки, згорткові коди зазвичай декодуються за допомогою алгоритмів м’якого прийняття рішень, таких як алгоритм Вітербі, які обробляють дискретні сигнали та забезпечують набагато вищу ефективність виправлення помилок, ніж декодування з жорстким рішенням.

Майже всі класичні блокові коди застосовують алгебраїчні властивості скінченних полів (тобто поля Галуа). Тому класичні блокові коди часто називають алгебраїчними кодами.

На відміну від класичних блокових кодів, які часто визначають здатність виявляти або виправляти помилки, багато сучасних блокових кодів, таких як коди LDPC, не мають таких гарантій. Натомість сучасні коди оцінюються з точки зору частоти бітових помилок.

2 ТЕХНОЛОГІЯ АДАПТИВНОГО КОДУВАННЯ ТА МОДУЛЯЦІЇ

Адаптація каналу зв’язку або адаптивне кодування та модуляція (ACM) — це термін, який використовується в бездротовому зв’язку для позначення узгодження модуляції, кодування та інших параметрів сигналу та протоколу з умовами радіозв’язку (наприклад, втрати на шляху, завади через сигнали, що надходять від інших передавачів, чутливість приймача, доступний запас потужності передавача тощо).

Адаптивне кодування та модуляція (ACM) — це техніка, яка тісно пов’язана зі стандартом DVB-S2 (EN 302 307 [21]). Отже, давайте спочатку розглянемо Рекомендації щодо цього стандарту.

2.1 DVB-S2

Цифрове відеомовлення – супутникове – друге покоління (DVB-S2) – це стандарт цифрового телевізійного мовлення, розроблений як наступник популярної системи DVB-S. Він був розроблений у 2003 році та ратифікований Європейським інститутом телекомунікаційних стандартів (EN 302 307) у березні 2005 року. DVB-S2 передбачається (передбачається) для послуг трансляції, включаючи стандартне та HDTV, інтерактивних послуг, включаючи доступ до Інтернету, і розповсюдження професійного вмісту даних [28].

У порівнянні зі стандартом DVB-S було додано дві нові ключові функції:

- Потужна схема кодування на основі сучасного коду LDPC. Для низької складності кодування вибрані коди LDPC мають спеціальну структуру, також відому як коди нерегулярного повторення з накопиченням.
- Режими VCM (змінне кодування та модуляція) та ACM (адаптивне кодування та модуляція), які дозволяють оптимізувати використання смуги пропускання шляхом динамічної зміни параметрів передачі до умов прийому терміналів, наприклад, перемикання на нижчу швидкість кодування під час завмирання. ACM забезпечує додаткове і різке збільшення ефективності пропускної здатності та забезпечує набагато більшу гнучкість для розгортання мережі.

Інші функції включають:

- Чотири режими модуляції :

- QPSK і 8PSK пропонуються для широкомовних додатків і можуть використовуватися в нелінійних транспондерах, що працюють поблизу насичення.
- 16APSK і 32APSK використовуються в основному для професійних, напівлінійних додатків, але також можуть використовуватися для мовлення, хоча вони вимагають більш високого рівня доступного C/N і впровадження вдосконалених методів попереднього спотворення на станції висхідної лінії зв'язку, щоб мінімізувати ефект нелінійності транспондера.
- Покращений коефіцієнт спадання: $\alpha = 0{,}20$ і $\alpha = 0{,}25$ на додаток до спаду DVB-S $\alpha = 0{,}35$.
- Покращене кодування: сучасний великий код LDPC об'єднується із зовнішнім кодом BCH для досягнення умов квазібезпомилкового (QEF) прийому на каналі AWGN. Зовнішній код вводиться, щоб уникнути мінімальних помилок при низьких частотах бітових помилок. Один кадр прямої корекції помилок або FEC може мати 64800 біт (звичайний) або 16200 біт (короткий). Якщо використовується VCM або ACM, трансляція може бути комбінацією звичайних і коротких кадрів.
- Кілька кодових швидкостей для гнучкого налаштування параметрів передачі: 1/4, 1/3, 2/5, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9, і 9/10. Кодові швидкості 1/4, 1/3 і 2/5 були введені для винятково поганих умов прийому в поєднанні з модуляцією QPSK. Значення кодування 8/9 і 9/10 поводяться погано в умовах маргінального зв'язку (де рівень сигналу нижчий за рівень шуму).
- Додаткова синхронізація вхідного потоку для забезпечення постійної наскрізної затримки [29].

DVB-S2 досягає значно кращої продуктивності, ніж його попередники, головним чином дозволяючи збільшити доступний бітрейт у тій же смузі супутникового транспондера. Виміряний приріст продуктивності DVB-S2 порівняно з DVB-S становить близько 30% за тієї самої смуги пропускання супутникового транспондера та потужності випромінюваного сигналу [28].

З наявністю DVB-S2/ACM мережеві оператори все ще повинні шукати ефективні способи максимізації розподілу всієї своєї пропускної здатності. Це досягається за рахунок покращення якості обслуговування (QoS), дозволяючи логічно розподіляти спільну пропускну здатність між різними клієнтами, групами

віддалених пристроїв і додатками відповідно до динамічних планів обслуговування, які поширюються на рівень додатків [26].

Співвідношенні несучої до шуму від -2,4 дБ (QPSK, 1/4) до 16 дБ (32APSK, 9/10) з квазібезпомилковою метою 10^{-7} Частота помилок пакетів TS. Відстань до межі Шеннона коливається від 0,7 дБ до 1,2 дБ.

Таблиця 2.1 Режими та особливості DVB-S2 у порівнянні з DVB-S

Параметр	DVB-S	DVB-S2
Введення інтерфейс	неодружений транспорт потік (TS)	Кілька транспортних потоків і загальна інкапсуляція потоків (GSE)
Режими	Постійний кодування & модуляція	Змінне кодування та модуляція та адаптивне кодування та модуляція
FEC	Рід – Соломон (RS) 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8	LDPC + МПБ 1/4, 1/3, 2/5, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9, 9/10
Модуляція	Одноносний QPSK	QPSK з однією несучою та кількома потоками
Модуляція схеми	BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM	BPSK, QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK
Перемежування	Бітове чергування	Бітове чергування

DVB-S2 зазвичай використовується у випадках, які позначені стандартним документом. Відповідно до останнього, передбачені сценарії для DVB-S2 такі:

- Трансляція телевізійних послуг у SDTV або HDTV. За бажанням ця передача може бути зворотно сумісною з DVB-S, але не отримує переваги від 30% додаткової пропускної здатності.
- Інтерактивні послуги, включаючи доступ до Інтернету. Дані, створені користувачем, можуть надсилатися за допомогою кабелю (мідний/ оптоволоконний), мобільного бездротового зв’язку або супутникового зв’язку (DVB-RCS).
- Професійні програми, де дані повинні бути мультиплексовані в реальному часі, а потім транслюватися в діапазоні VHF/UHF (наприклад, цифрове телебачення, збір новин із супутника). Ці передачі не розраховані на пересічного глядача.
- Масштабне поширення вмісту даних. До них належать послуги «точка-точка» та багатоадресна передача, а також передача на головні вузли для (повторного) розповсюдження через інші носії.

В Україні перехід від DVB до DVB-S2 здійснив Viasat – мовник супутникового телебачення прямого мовлення та оператор платного телебачення, що належить шведському медіаконгломерату Modern Times Group (MTG).

2.1.1 Процес передачі інформації в DVB-S2

Концепція кадру DVB-S2 може бути застосована до каналів з одним каналом на несучу (SCPC) разом із усіма іншими концепціями DVB-S2, включаючи, але не обмежуючись цим, адаптацію режиму, адаптацію потоку, кадри основної смуги частот, чергування бітів тощо. У застосуванні до традиційних послуг SCPC ці концепції DVB-S2 виконують подібні функції та надають переваги, аналогічні тим, що задокументовано для DVB-S2.

У найпростішому вигляді дані користувача (пакетовані чи безперервні) поміщаються в кадри базової смуги, додається інформація FEC, а потім до заголовка фізичного рівня (PL) додається префікс перед передачею, щоб створити супутниковий кадр для передачі.

Розмір кадрів основної смуги залежить від конкретної схеми FEC, що використовується. Для блочних FEC, таких як LDPC, розмір кадру основної смуги пов’язаний із розміром блоку FEC.

Як і у випадку з DVB-S2, певна інформація може бути передана в заголовку базової смуги, щоб допомогти з декодуванням на приймачі, включаючи:

- Формат даних (пакетований/безперервний)
- Індикатор одного або кількох потоків
- Індикатор CCM (постійне кодування та модуляція)/VCM/ACM
- Інформація про синхронізацію потоку
- Коефіцієнт спаду [22].

Крім того, як і у випадку з DVB-S2, певна інформація може бути передана в заголовку PL, щоб допомогти з синхронізацією приймача та демодуляцією кадру, включаючи:

- Інформація про ідентифікацію кадру
- Деталі типу FEC, модуляції та швидкості FEC, які використовуються для кодування решти кадру
- Індикація довжини кадру FEC [22].

Усі поля базової смуги частот і поля заголовка PL можна легко розширити для розміщення відповідних даних, не пов’язаних із DVB-S2, які необхідні для використання цих методів із традиційними послугами SCPC.

Ключовим моментом є те, що заголовок PL завжди передається з використанням особливої надійної модуляції (BPSK використовується в стандарті DVB-S2) і високої швидкості FEC. Це допомагає приймачу зафіксувати сигнал і надає інформацію, необхідну для демодуляції решти кадру.

ACM можна використовувати для розширення традиційних послуг SCPC подібно до того, як це використовується в DVB-S2. Переваги включають більшу пропускну здатність супутника, меншу маржу зв'язку та більшу доступність послуг.

SCPC ACM застосовний як для систем «точка-точка», так і для систем «точка-багато точок». Що стосується зворотного каналу, можна використовувати як прямий зворотний канал через супутник, так і непрямий зворотний канал через наземну мережу. Концепцію команди DVB-S2 ACM можна однаково застосувати до традиційних систем SCPC і з тією ж метою.

Сигналізація якості прийому через зворотний канал може підтримуватися в системах SCPC, зокрема безперервний зворотний зв'язок між несучою та шумом плюс коефіцієнт перешкод на приймачі разом з іншими потенційними параметрами якості прийому (наприклад, Eb /No, частота помилок модуляції (MER), Величина вектора помилки (EVM) тощо).

SCPC ACM особливо добре підходить для використання в IP-мережах, оскільки існують механізми з точки зору протоколів IP, таких як забезпечення якості обслуговування, формування трафіку та TCP, для зворотного зв'язку зі змінами швидкості передачі даних у наземній мережі, що дозволяє динамічно змінювати пропускну здатність супутника через змінні умови прийому, які швидко відображаються в потоці даних для оптимізації використання каналу [23].

Таким чином, гнучкість, надійність і ефективність функцій DVB-S2 VCM і ACM тепер можуть бути використані для розширення традиційних послуг SCPC, приносячи однакові переваги для всіх додатків, включаючи стільниковий транспортний зв'язок, транкінг і магістралі ISP, трансляцію, військовий, супутниковий збір даних.

2.2 Інші технології

ACM також застосовується в ряді інших технологій, таких як DVB-RCS, HSPA і Wi-Max.

2.2.1 DVB-RCS

Цифрове відеомовлення – Зворотний канал через супутник або Зворотний канал через систему є специфікацією інтерактивної мультимедійної системи супутникового зв’язку на вимогу [30].

DVB-RCS — це зрілий стандарт супутникового зв’язку з відкритим вихідним кодом із високоефективним керуванням смугою пропускання. Це робить його економічно ефективним альтернативним рішенням для багатьох користувачів. Це також забезпечує надійну основу для подальших досліджень супутникового зв'язку.

Для реалізації такого типу зв’язку користувачеві потрібен пристрій під назвою «SIT» («Інтерактивний супутниковий термінал» або супутниковий модем) і відповідна супутникова антена. Користувач отримує мультимедійні потокові передачі через сигнали низхідної лінії зв'язку від супутника, потім надсилає запити на службові сигнали через "SIT" і канал висхідної лінії зв'язку на супутник. Отримавши команду від користувача, супутник надсилає дані запиту користувача постачальнику послуг. Це займає приблизно 0,5 секунди, щоб підключитися до супутника в один бік (загалом 1 секунда для вихідного та низхідного зв’язку супутника, ще одна секунда до постачальника послуг і назад, загалом 2 секунди затримки в обидві сторони). Цю технологію також можна використовувати для доступу до Інтернету через супутник [30].

Протокол, який використовується для частини подорожі супутник-SIT, – багаточастотний множинний доступ з розділенням часу (MF-TDMA). Використовуючи цей протокол, користувач отримує дані в пакетах (пакетах), які можуть не бути безперервним потоком, але при збереженні та перегрупуванні створять віртуальний двовимірний масив даних. Планувальник використовується для підтримки цих пакетів і усунення дублікатів [31]. Цей протокол реалізовано таким чином, що різні користувачі отримують різну кількість пакетів, що допомагає регулювати потік даних із супутникового зв’язку відповідно до вимог користувача.

2.2.2 Високошвидкісний пакетний доступ (HSPA)

HSPA — це об’єднання двох мобільних протоколів, високошвидкісного пакетного доступу низхідної лінії зв’язку (HSDPA) і високошвидкісного пакетного доступу висхідної лінії зв’язку (HSUPA) [32], які розширюють і покращують продуктивність існуючих мобільних телекомунікаційних мереж 3G

за допомогою широкосмугового множинного доступу з кодовим розділенням (WCDMA).

WCDMA — це стандарт повітряного інтерфейсу, що застосовується в мережах мобільного зв'язку 3G. Він підтримує звичайні стільникові голосові, текстові та MMS-послуги, але також може передавати дані на високій швидкості, дозволяючи мобільним операторам надавати додатки з більшою пропускною здатністю, включаючи потокове передавання та широкосмуговий доступ до Інтернету.

2.2.2.1 Високошвидкісний пакетний доступ низхідної лінії (HSDPA)

HSDPA — це розширений протокол мобільного зв’язку 3G, який також називають 3.5G, 3G+ або Turbo 3G, який дозволяє мережам на основі універсальної мобільної телекомунікаційної системи (UMTS) мати вищу швидкість передачі даних і ємність. HSDPA було представлено з 3GPP (3rd Generation Partnership Project) Release 5, який також супроводжує вдосконалення висхідної лінії зв’язку, забезпечуючи нову несучу 384 кбіт /с. Крім підвищення швидкості передачі даних, HSDPA також зменшує затримку, а отже, і час зворотного зв’язку для програм. В даний час збільшена швидкість передачі даних до 337,5 Мбіт/с можлива завдяки випуску 11 стандартів 3GPP [33]. Покращення швидкості та затримки знижує вартість за біт і покращує підтримку високопродуктивних програм пакетної передачі даних.

HSDPA базується на передачі спільного каналу, а його ключовими особливостями є спільний канал і багатокодова передача, модуляція вищого порядку, короткий часовий інтервал передачі (TTI), швидка адаптація зв’язку та планування разом із швидким гібридним автоматичним повторним запитом (HARQ). Іншими новими функціями є високошвидкісні спільні канали низхідної лінії зв’язку (HS-DSCH), адаптивна модуляція QPSK і 16QAM, а також протокол високошвидкісного доступу до середовища (MAC- HS) на базовій станції.

2.2.2.2 Високошвидкісний пакетний доступ висхідної лінії зв’язку (HSUPA)

HSUPA — це протокол мобільної телефонії 3G, який став другим важливим кроком у процесі еволюції UMTS. Це було визначено та стандартизовано в 3GPP Release 6 для підвищення швидкості передачі даних до 5,76 Мбіт/с, розширення пропускної здатності та зменшення затримки. Разом із додатковими

вдосконаленнями це створило можливості для ряду нових програм, включаючи VoIP, завантаження зображень і надсилання великих повідомлень електронної пошти.

Тим часом HSUPA була замінена новішими технологіями, які ще більше підвищують швидкість передачі. Long Term Evolution (LTE) Advanced підтримує максимальну швидкість низхідного каналу понад 1 Гбіт /с [25].

Незважаючи на те, що HSUPA забезпечує значне збільшення швидкості завантаження, він не забезпечує такої ж пропускної здатності, як низхідна лінія зв’язку, тому що загалом більшість даних передається в напрямку низхідної лінії зв’язку, тобто до UE. На додаток до цього існують додаткові труднощі із забезпеченням такої самої продуктивності Обладнання користувача з огляду на деякі обмеження, накладені тим фактом, що велика кількість Обладнання користувача спілкується з NodeB.

В основі HSUPA лежить ряд нових технологій, дуже схожих на ті, що використовуються з HSDPA. Проте кілька фундаментальних відмінностей виникають внаслідок різних умов на обох кінцях зв’язку. У низхідній лінії зв'язку спільним ресурсом є потужність передачі. У висхідній лінії зв’язку ресурс обмежений рівнем перешкод, який можна прийняти, і це залежить від потужності передачі кількох пристроїв користувача [25]. Методи модуляції високого порядку здатні забезпечити більш високі швидкості передачі даних для каналів високого рівня сигналу в низхідній лінії зв'язку.

2.2.3 WiMAX

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) — це сімейство стандартів бездротового зв’язку, які забезпечують кілька параметрів фізичного рівня (PHY) і керування доступом до середовища (MAC).

Пропускна здатність і діапазон WiMAX роблять його придатним для таких потенційних застосувань:

- Надання портативного мобільного широкосмугового підключення в містах і країнах за допомогою різних пристроїв;
- Надання бездротової альтернативи кабельним і цифровим абонентським лініям (DSL) для широкосмугового доступу «останньої милі»;
- Надання послуг передачі даних, телекомунікацій (VoIP) та IPTV (triple play);

- Забезпечення підключення до Інтернету як частини плану безперервності бізнесу
- Розумні мережі та вимірювання [34].

WiMAX базується на IEEE Std 802.16e-2005 [35], який покращує IEEE 802.16-2004 на:

- Додавання підтримки мобільності (м'який і жорсткий хендовер між базовими станціями). Це вважається одним із найважливіших аспектів 802.16e-2005 і є основою Mobile WiMAX;
- Масштабування швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) до смуги пропускання каналу, щоб підтримувати постійний рознос несучої в різних смугах пропускання каналу (зазвичай 1,25 МГц, 5 МГц, 10 МГц або 20 МГц). Постійний рознос несучих призводить до вищої ефективності спектру в широких каналах і зниження вартості у вузьких каналах. Також відомий як масштабований OFDMA (SOFDMA – масштабований множинний доступ з ортогональним частотним поділом). Інші діапазони, не кратні 1,25 МГц, визначені в стандарті, але оскільки дозволені номери піднесучих ШПФ становлять лише 128, 512, 1024 і 2048, інші частотні діапазони не матимуть точно такого ж інтервалу між несучими, що може бути неоптимальним для реалізації. Рознос несучої 10,94 кГц;
- Розширені схеми рознесення антен і гібридний автоматичний повторний запит (HARQ);
- Адаптивні антенні системи (AAS) і технологія MIMO (Multiple Input Multiple Output);
- Щільніше підканалювання, тим самим покращуючи проникнення в приміщення;
- Введення перевірки парності низької щільності (LDPC);
- Запровадження субканалів низхідної лінії зв'язку, що дозволяє адміністраторам міняти покриття на пропускну здатність або навпаки [35];
- Додавання додаткового класу якості обслуговування (QoS) для програм VoIP.

Як стандарт, призначений для задоволення потреб мереж передачі даних наступного покоління (4G), WiMAX відрізняється своїм динамічним пакетним алгоритмом модуляції, адаптованим до фізичного середовища, через яке проходить радіочастотний сигнал. Модуляція вибирається так, щоб вона була

більш спектрально ефективною. Тобто, коли пакети мають високу силу сигналу та високе відношення несучої до шуму плюс перешкоди (CINR), їх можна легше декодувати за допомогою цифрової обробки сигналу [36]. На противагу цьому, працюючи в менш сприятливих середовищах для радіозв'язку, система автоматично переходить у більш надійний режим; з перевагою в тому, що потужність на біт вища, і тому може бути виконана більш проста точна обробка сигналу.

Пакетні профілі використовуються зворотні (алгоритмічно динамічні) до низького ослаблення сигналу; тобто пропускна здатність між клієнтами та базовою станцією в основному визначається відстанню. Максимальна відстань досягається завдяки використанню найнадійнішого налаштування пакету; тобто профіль із найбільшим компромісом розподілу кадрів MAC (Medium Access Control), який потребує виділення більшої кількості символів (більшої частини кадру MAC) для передачі заданого обсягу даних, ніж якби клієнт був ближче до бази станція.

Систему складно розгорнути, оскільки необхідно відстежувати не лише потужність сигналу та CINR (як у таких системах, як GSM – Глобальна система мобільного зв'язку) [36], але й те, як динамічно призначатимуться доступні частоти (що призводить до динамічних змін). до доступної пропускної здатності). Це може призвести до захаращення частот із повільним часом відповіді або втратою кадрів.

Як наслідок, система спочатку повинна бути розроблена за згодою з командою розробки базової станції, щоб точно спрогнозувати використання частоти, перешкоди та загальну функціональність продукту.

2.3 Адаптивне кодування та модуляція (ACM)

Адаптивне кодування та модуляція (ACM) — це технологія, яка може автоматично змінювати пряме виправлення помилок і модуляцію з'єднання, щоб компенсувати зміни умов з'єднання. Зазвичай ці зміни пов'язані з погодою, наприклад, згасання дощу, але також можуть відбуватися з інших джерел, таких як зміни рівня радіочастот або перешкоди [27].

На наступних діаграмах (рис. 2.1) [21] показано вплив технології ACM за різних атмосферних умов.

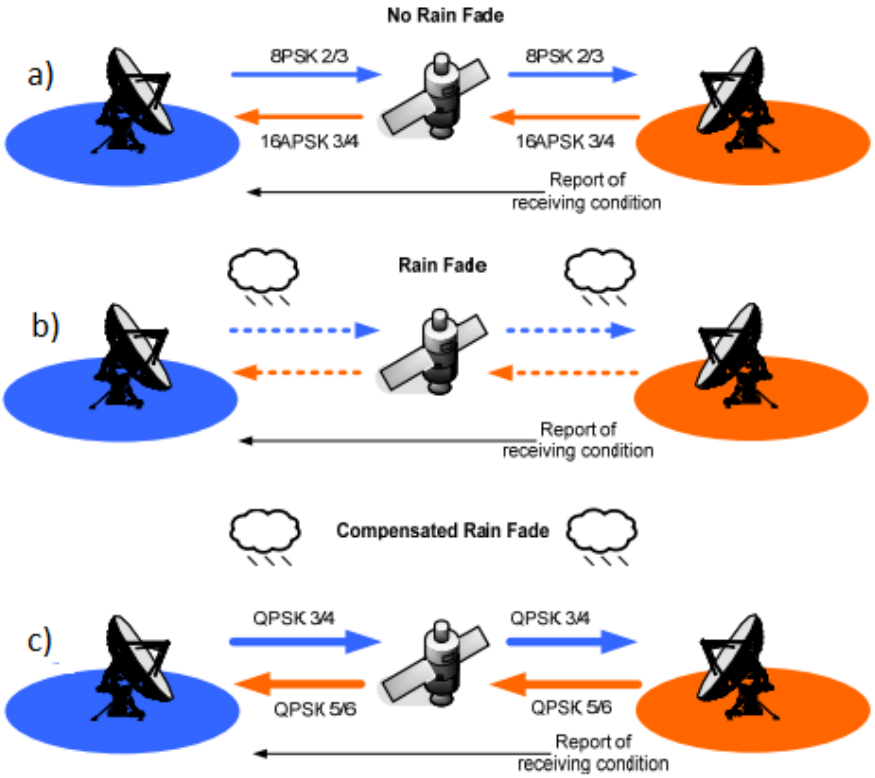

Рисунок 2.1 – Система ACM за різних погодних умов: а) без дощу; б) дощ згасає; в) компенсоване згасання дощу

Змінне кодування та модуляція (VCM) можна використовувати для забезпечення різних рівнів захисту від помилок для різних компонентів у межах служби. Він досягає цього, дозволяючи застосовувати різні комбінації модуляції та швидкості FEC до різних частин потоку даних. ACM розширює VCM, забезпечуючи шлях зворотного зв'язку від приймача до передавача, щоб дозволити динамічно змінювати рівень захисту від помилок відповідно до змінних умов розповсюдження. Заявки про підвищення продуктивності понад 100% були зроблені для ACM з точки зору приросту ємності супутника [21]. Концепції ACM також можна застосовувати до традиційних типів послуг з одним каналом на несучу (SCPC) і можуть запропонувати аналогічні переваги.

ACM деякий час використовувався в бездротовому зв'язку, включаючи наземні мікрохвильові програми. Лише нещодавно його почали використовувати через супутникові зв'язки. ACM оптимізує пропускну здатність бездротового каналу передачі даних шляхом адаптації порядку модуляції та швидкості коду прямої корекції помилок відповідно до шумових умов на каналі. Наприклад, WiMAX використовує алгоритм адаптації швидкості, який адаптує схему модуляції та кодування (MCS) відповідно до якості радіоканалу, а отже, бітової

швидкості та надійності передачі даних. ACM має потенціал для підвищення доступності супутникових каналів, а також забезпечить значну економію пропускної здатності [22].

У каналі ACM швидкість символів (та потужність) системи бездротового зв'язку залишається постійною. Це гарантує, що пропускна здатність, виділена для певного каналу, ніколи не буде перевищена. Припускаючи, що швидкість передачі символів не змінюється, якщо змінюються модуляція та кодування, то швидкість передачі даних зміниться. Наприклад, у HSDPA адаптація каналу виконується за допомогою вибору кодової швидкості FEC – код FEC, що використовується, має швидкість 1/3, але її можна ефективно змінювати за допомогою виколювання бітів і гібридного автоматичного повторного запиту (HARQ) із поступовою надлишковістю. Коли умови радіозв'язку хороші, більше бітів проколюється, а швидкість передачі інформації збільшується. За поганих умов зв'язку всі зайві біти передаються, а швидкість передачі даних падає. За дуже поганих умов зв'язку відбувається повторна передача через HARQ, який забезпечує правильний прийом надісланої інформації, але додатково знижує швидкість передачі даних.

Зазвичай символьна швидкість каналу має бути постійною, щоб гарантувати, що виділена смуга пропускання на супутнику залишається незмінною. Відповідно швидкість передачі даних змінюється, щоб компенсувати будь-які зміни ACM у модуляції та FEC.

$$R_s = \frac{R_b}{\log_2 M \cdot R_{cod}} \tag{2.1}$$

де R_s – символьна швидкість, R_b – бітрейт, $R_{код}$ – кодова швидкість, $\log_2 M$– порядок модуляції.

Наприклад, для швидкості 3/4 QPSK (де порядок модуляції = 2):

$$R_s = R_b \cdot 0.666$$

Переставивши (2.1), отримаємо:

$$\boldsymbol{R_b = R_s \cdot R_{cod} \cdot \log_2 M}$$

Таким чином, при зміні на більш високий порядок модуляції або кодову швидкість, бітова швидкість збільшується, а при зміні на нижчий порядок модуляції або кодову швидкість, бітова швидкість зменшується.

Для спільної платформи з широко розповсюдженими пультами керування переваги ACM можуть бути дуже значними. Спільні платформи з ACM мають можливість змінювати модуляцію/кодування для трафіку, призначеного певному віддаленому пульту, на кадровій основі. Система з підтримкою ACM не обмежена використанням модуляції/кодування, що підходить для найгіршого випадку в умовах завмирання [21]. У результаті можна досягти вищої пропускної здатності порівняно з системами з фіксованою кодовою точкою як за ясного неба, так і за умов дощу. Крім того, системи ACM дозволяють сайтам, на які не впливають умови завмирання, працювати з найвищою можливою модуляцією/кодуванням, у той час як сайти, які постраждали від завмирання, мають знижену модуляцію/кодування, налаштовану для підтримки підключення за посиланням.

2.3.1 Проект ACM Link

При проектуванні каналу ACM слід враховувати наступне [21]:

- Швидкість зміни умов завмирання в залежності від затримки та часу обробки механізму « зворотного зв’язку » обраної системи ACM для коригування модуляції/кодування.

Стандартні дуплексні послуги призначають фіксовану модуляцію та FEC для кожної частини каналу. Технологія ACM здатна змінювати модуляцію та FEC, реалізуючи схему «зворотного зв’язку», що містить інформацію про ефективність зв’язку. Цю схему можна поєднати з послугою або надати на окремій лінії (наприклад, PSTN).

Системи адаптивної модуляції незмінно вимагають певної інформації про стан каналу на передавач. Це можна отримати в дуплексних системах з розділенням часу, припустивши, що канал від передавача до приймача приблизно такий самий, як канал від приймача до передавача. Крім того, відомості про канал також можуть бути виміряні безпосередньо на приймачі та передані назад до передавача [37]. Процес адаптації каналу є динамічним, і параметри сигналу та протоколу змінюються, коли змінюються умови радіозв’язку – наприклад, у високошвидкісному пакетному доступі вниз (HSDPA) в універсальній мобільній телекомунікаційній системі (UMTS) це може відбуватися кожні 2 мс. Адаптивні системи модуляції покращують швидкість передачі та/або частоту бітових помилок, використовуючи інформацію про стан каналу, яка присутня в передавачі. Особливо в каналах із завмиранням, які моделюють середовище бездротового розповсюдження, системи адаптивної модуляції демонструють

значне підвищення продуктивності порівняно з системами, які не використовують знання каналів у передавача.

- Необхідно ретельно розробити та розподілити мінімальну та максимальну модуляцію/кодування, а також межі перемикання модуляції/кодування, щоб гарантувати, що послуга працює в межах необхідної доступності послуги;
- Використання режиму «довгого блоку» DVB-S2 проти «короткого блоку» може вплинути на продуктивність системи. Це особливо вірно, якщо посилання є послугою з низькою швидкістю передачі даних;
- Усі системи ACM є власністю – система одного виробника не працюватиме з системою іншого. Однією з причин цього є те, що вони мають різні методи передачі зворотного каналу, необхідного для роботи ACM;
- ACM зазвичай є додатковим варіантом із стандартних продуктів CCM виробника [21].

Аналіз бюджету зв’язку може бути розрахований для найкращого та найгіршого випадку модуляції та кодування, щоб порівняти пропускну здатність і доступність, що призводить до принаймні подвоєння кількості необхідних бюджетів зв’язку.

2.3.2 Переваги адаптивного кодування та модуляції

Одним із способів описати переваги адаптивного кодування та модуляції є те, що ця техніка дозволяє усунути запаси дощу для більшості користувачів у більшості випадків. Цей виграш можна використати кількома різними способами, вибраними відповідно до обмежень і цілей.

У поточних системах двома основними факторами загальної вартості надання послуг є смуга пропускання прямої лінії зв’язку та підсилювач радіочастотної потужності в терміналі користувача. У той же час більшість поточних систем є незбалансованими в тому сенсі, що в прямому каналі набагато більше трафіку, ніж у зворотному. Тому вартість пропускної здатності зворотного зв’язку [24] викликає менше занепокоєння (це починає змінюватися в результаті розвитку типів використовуваних програм, але це дійсне припущення для більшості сучасних систем).

Очікується, що «підвищення адаптивності» в прямому каналі зв’язку буде використано, головним чином, для підвищення спектральної ефективності, а в

зворотному каналі — значною мірою для зменшення необхідного розміру (і, отже, вартості) підсилювача радіочастотної потужності. У зв’язку зі змінами моделі використання, згаданими вище, ймовірно, що деякий приріст адаптивності зворотного зв’язку в майбутньому також буде спрямований на покращення спектральної ефективності.

2.4 Висновок

АСМ є одним із різноманітних методів, які супутникова індустрія використовує, щоб допомогти зменшити витрати на смугу пропускання для клієнтів і покращити продуктивність мережі. Це може бути рішення, яке може надати переваги для реалізації вашої мережі, або воно може мати обмеження з огляду на вартість обладнання на кожному сайті та інші фактори.

Використання АСМ позбавляє операторів послуг і розробників систем компромісу між доступністю та пропускною здатністю зв’язку. У порівнянні з лініями зв’язку, розробленими з використанням фіксованого кодування, АСМ може збільшити пропускну здатність надійної лінії зв’язку, дозволяючи їй динамічно налаштовуватися на менш надійну модуляцію/кодування, що призводить до вищої пропускної здатності в умовах ясного неба. І навпаки, у порівнянні зі скромно надійним кодованим каналом зв’язку з фіксованою швидкістю, АСМ може забезпечити підвищену доступність каналу шляхом динамічного налаштування модуляції/кодування нижчого порядку в умовах загасання дощу [38].

Підсумовуючи, використання АСМ може значно збільшити пропускну здатність каналу та/або доступність каналу порівняно з фіксованою модуляцією/кодуванням.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ

3.1 Моделювання №1. Код RS + турбо код

У нашому першому експерименті ми наближаємося до реального прикладу HSDPA, який адаптується для досягнення дуже високих бітрейтів, на чистих каналах з використанням 16-QAM і блокового коду Ріда-Соломона, а на шумних каналах HSDPA адаптується для забезпечення надійного зв'язку за допомогою QPSK і турбокод зі швидкістю кодування 1/3.

Для більшої наочності та візуалізації ми вибрали блоковий код з параметрами довжини повідомлення k = 164 і довжини блоку n = 246. Цей код має велику надлишковість (r = n – k = 82 біти), тому він може виявляти та виправляти більшу кількість помилок, що робить його досить надійним з точки зору нашої проектованої системи. Проте, мабуть, це впливає на кодову швидкість, яка:

$$R_{\text{код}} = \frac{k}{n}$$

де k – кількість інформаційних бітів на вході кодера (в одному блоці); n – кількість бітів на виході кодера (довжина кодового слова).

У нашому прикладі швидкість коду:

$$R_{\text{код}} = \frac{164}{246} \approx 0{,}67$$

Імовірність помилки в системі без кодування розраховується за формулою:

$$p = \frac{k_1}{k_2} Q(k_3 \cdot h_b)$$

де h_b це таке значення, що:

$$h_b^2 = SNR = \frac{E_b}{N_0}$$

де E_b – енергія, необхідна для передачі одного біта інформації, а N_0 – спектральна щільність потужності шуму;

Q-функція:

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$$

але для розрахунків доцільно використовувати апроксимацію цієї функції:

$$Q(x) = 0{,}65 \cdot e^{-0{,}44 \cdot (x+0{,}75)^2}$$

Використовуючи попередньо розраховані коефіцієнти k_1, k_2 і k_3, для ймовірності помилки 16-QAM є:

$$p = Q(0{,}89 \cdot h_b)$$

і для QPSK це:

$$p = Q\left(\sqrt{2} \cdot h_b\right)$$

Підставляючи ці формули в подальші розрахунки, ми повинні враховувати незначні зміни, які вносить кодова швидкість, за такою залежністю:

$$p = \frac{k_1}{k_2} Q\left(k_3 \cdot \sqrt{R_{\text{код}}} \cdot h_b\right) \quad (3.1)$$

де $R_{\text{код}}$ – кодова швидкість.

Щоб обчислити ймовірність помилки на виході декодера в кодах RS, нам потрібно знати кількість виправлених помилок, яка становить:

$$q_{\text{вип } RS} = \left\lfloor \frac{n-k}{2} \right\rfloor$$

де $\lfloor x \rfloor$ означає округлення значення в дужках.

А мінімальна кодова відстань становить:

$$d_{\min\ RS} = 2 \cdot q_{\text{вип}} + 1$$

Імовірність помилки декодування кодів RS розраховується за формулою:

$$p_{\text{дек } RS}(h_b) = \frac{d_{min}}{n} \cdot \sum_{q=q_{\text{вип}}+1}^{n} C_n^q \cdot p^q \cdot (1-p)^{n-q}$$

де C_n^q – є комбінацією по q з n, а p обчислюється за формулою (3.1).

Імовірність помилки декодування турбо кодів розраховується за формулою:

$$p_{turbo}(h_b) = e^{R_{\text{код}} \cdot df \cdot h_b^2} \cdot \frac{k_1}{k_2} Q\left(k_3 \sqrt{d_f R_{\text{код}}} \cdot h_b\right) \cdot w_{df} \cdot \left(e^{-R_{\text{код}} \cdot h_b^2}\right)^{d_f+1}$$

де d_f – вільна відстань, а w_{df} – а з числа шляхів алгоритму декодування Вітербі з d_f помилками згорткового коду, що лежить в основі обраного турбокоду (тут ми отримали згортковий код (133, 171) зі швидкістю 1/2, для якого d_f =10 і w_{df} =36). $R_{\text{код}}$ для цього турбо коду дорівнює 1/3.

Тому ми будуємо два графіки (рис. 3.1) цих кодів з вибраними параметрами, а в MathCad реалізуємо спосіб знаходження точки їх перетину. У нашому експерименті це зроблено математично. У реальних умовах цю точку «перемикання» можна або попередньо визначити та встановити перед початком передачі, або надати передавачу від приймача через канал зворотного зв'язку, який також інформує передавач про поточні умови каналу (величину шум тощо).

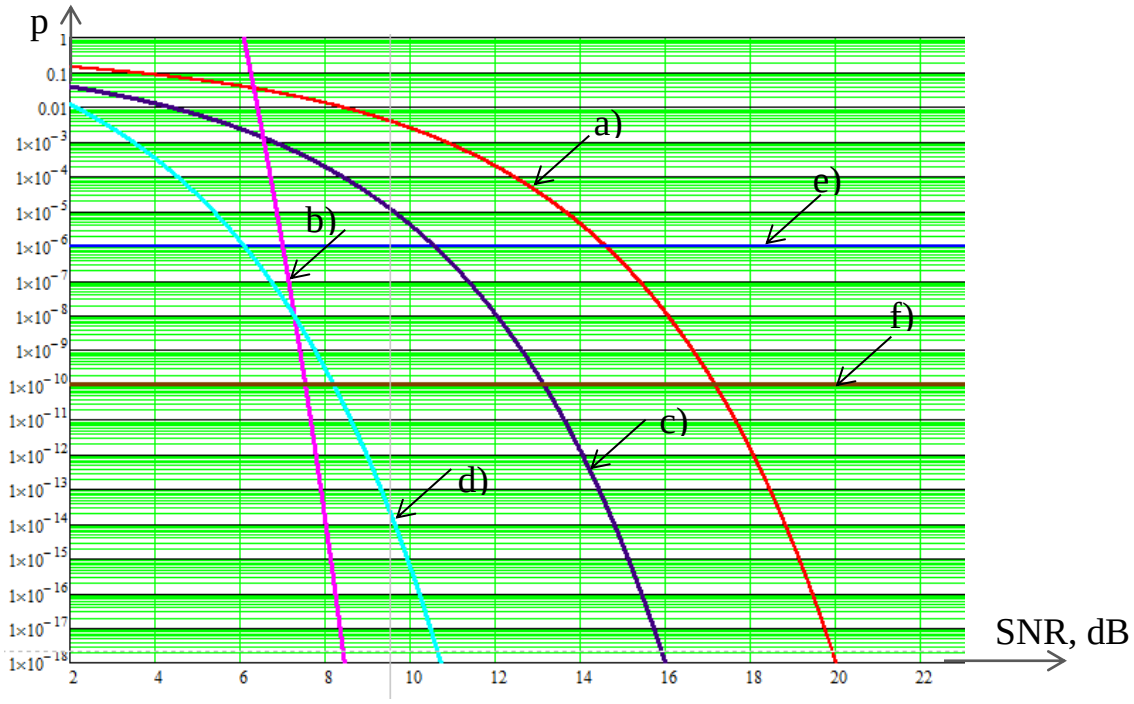

Рисунок 3.1 – Імовірності помилок у моделюванні № 1: a) 16-QAM; b) Блоковий код RS (246,164) з 16-QAM; в) QPSK; г) турбокод з QPSK; д) 10^{-6} допустима ймовірність помилки; f) допустима ймовірність помилки 10^{-10}

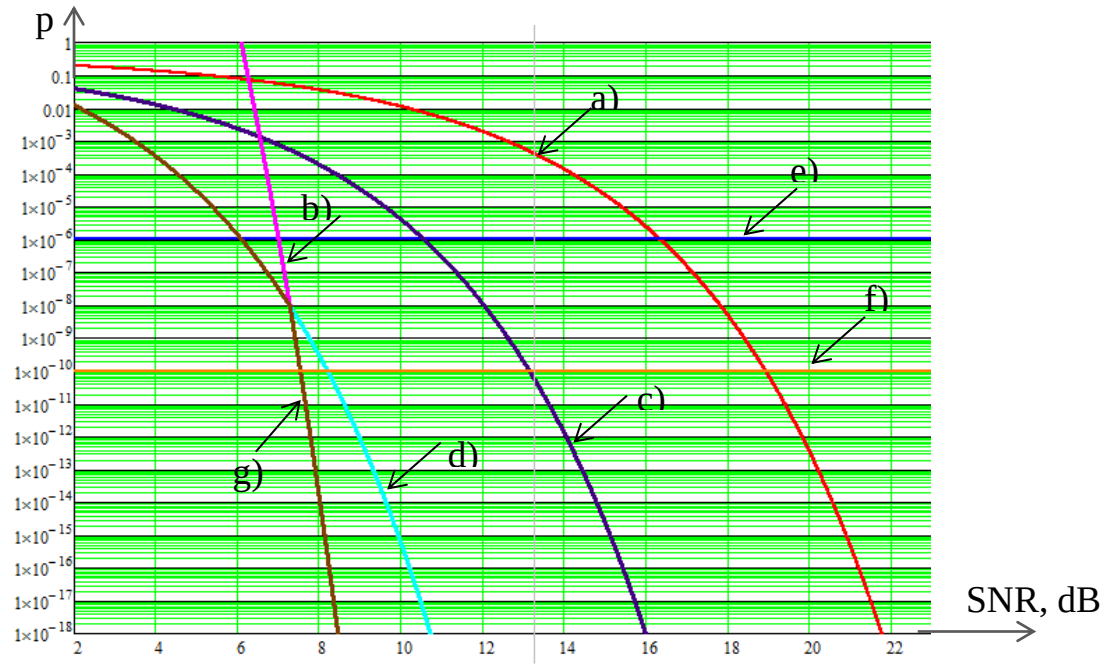

Рисунок 3.2 – Ймовірність помилки адаптивної системи в моделюванні № 1: a) 16-QAM; b) Блоковий код RS (246, 164) з 16-QAM; в) QPSK; г) турбокод з QPSK; д) 10^{-6} допустима ймовірність помилки; f) допустима ймовірність помилки 10^{-10}; є) адаптивна система

Тут також потрібно вказати, що точка перетину графів кодів повинна лежати між p=10 $^{-6}$ і p=10 $^{-10}$. Якщо він розташований вище за 10 $^{-6}$, це означає, що другий (слабший і простіший) код все ще достатньо надійний, щоб використовувати його також у шумному каналі, тому нам ніколи не потрібен перший (більш надійний і складний) код для роботи. Протилежна ситуація виникає, коли точка перетину знаходиться на $p < 10^{-10}$: це означатиме, що навіть при вищому SNR більш простий код не може конкурувати з надійним у плані виправлення помилок, тому повторне перемикання ніколи не відбудеться (ніколи не знадобиться).

Коли це буде зроблено, ми зможемо остаточно визначити концепцію нашої адаптивної системи (див. рис. 3.2). У цьому прикладі це означає, що при нижчому відношенні сигнал/шум, поки воно не перевищить значення 7274 дБ, система повинна використовувати більш надійний і складний турбокод, забезпечуючи більшу перешкодостійкість. А потім, при більш високих значеннях SNR, система може переключитися на більш простий код RS, забезпечуючи вищу пропускну здатність.

3.2 Моделювання № 2. Каскадний код + код LDPC

У нашому другому прикладі ми використали каскадний код, який об’єднує послідовно блоковий код RS (15, 11) і згортковий код (133, 171) зі швидкістю 1/2, коли канал чистий, і код LDPC (9,2), де 9 – кількість одиниць у стовпці, а 2 – кількість одиниць у рядку в розрідженій матриці LDPC, коли значення шуму в каналі зростає. Параметри для цих кодів були обрані з метою забезпечення кращої візуалізації отриманих результатів. Як для LDPC, так і для каскадного коду використовувалася стандартна широко використовувана модуляція 8PSK.

Отже ймовірність помилки в системі без кодування однакова в обох випадках:

$$p = \frac{2}{3} Q(0{,}94 \cdot h_b)$$

Імовірність помилки у випадку каскадного коду є комбінацією ймовірностей помилки блокового коду та згорткового коду, яка виглядає наступним чином:

$$p_{\text{дек } cas} = \frac{d}{n} \sum_{q=q_{\text{вип}}+1}^{n} C_n^q \cdot p_x^q \cdot (1 - p_x)^{n-q}$$

де p_x ймовірність помилки декодування для згорткового коду з урахуванням як швидкості згорткового, так і RS-кодів:

$$p_x = w_{df} \cdot \frac{k_1}{k_2} Q\left(k_3 \cdot \sqrt{d_f R_{\text{код}}} \cdot \sqrt{\frac{k}{n}} \cdot h_b \right)$$

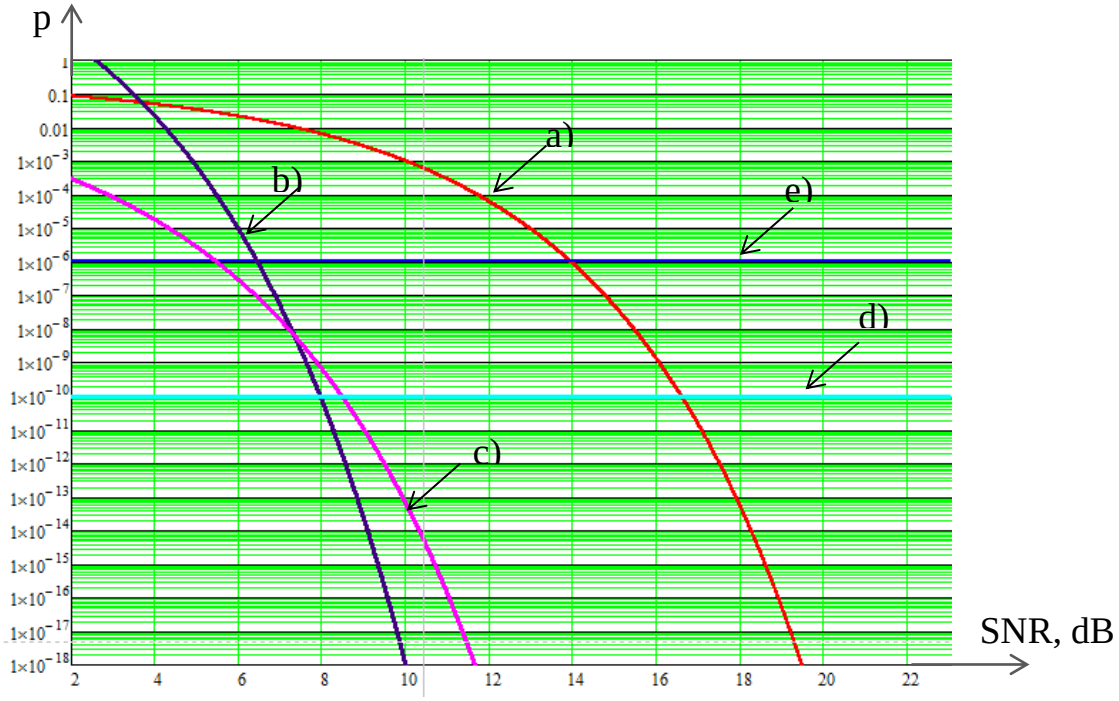

Рисунок 3.3 – Ймовірність помилки адаптивної системи в моделюванні № 2: а) 8PSK; b) Каскадний код із 8PSK; c) код LDPC з 8PSK; г) допустима ймовірність помилки 10^{-10}; д) 10^{-6} допустима ймовірність помилки

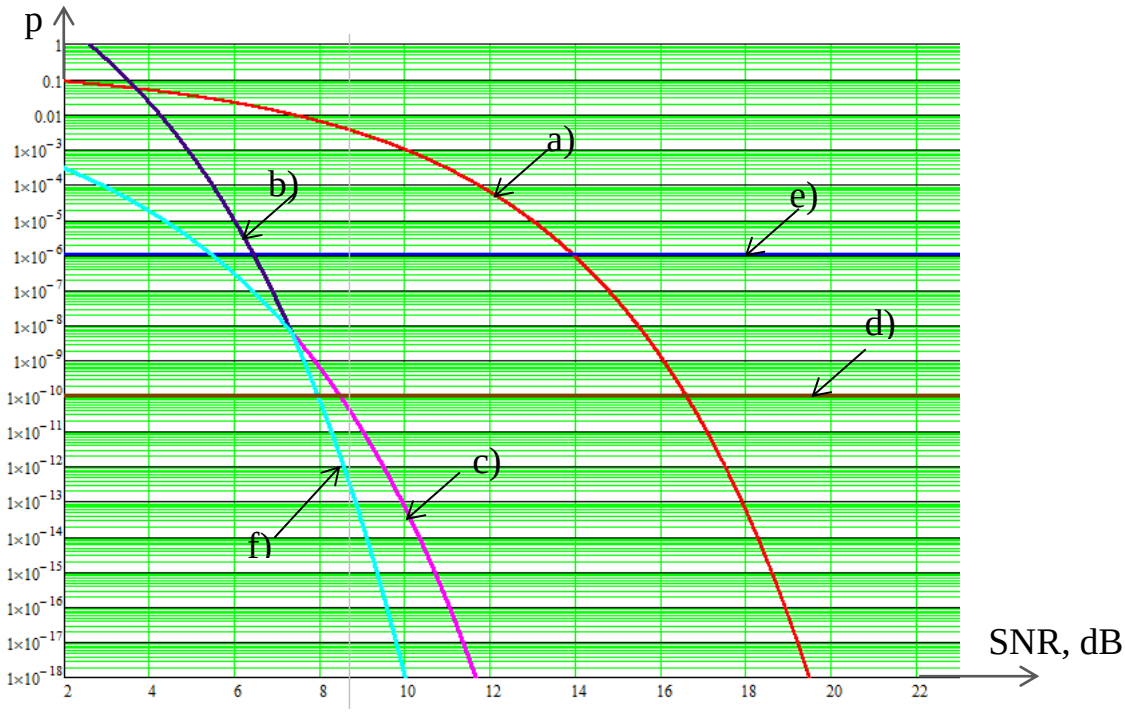

Рисунок 3.4 – Імовірності помилок у моделюванні № 2: a) 8PSK; b) Каскадний код із 8PSK; c) код LDPC з 8PSK; г) допустима ймовірність помилки 10^{-10}; д) 10^{-6} допустима ймовірність помилки; e) адаптивна система

Для LDPC ймовірність помилки обчислюється за системою:

$$p_{LDPC} = \begin{cases} p \cdot C_{j-1}^{\frac{j-1}{2}} \cdot (k-1)^{\frac{j-1}{2}} \cdot p^{\frac{j-1}{2}}, & \text{якщо } j \text{ непарна} \\ p \cdot C_{j-1}^{\frac{j}{2}} \cdot (k-1)^{\frac{j}{2}} \cdot p^{\frac{j}{2}}, & \text{якщо } j \text{ парна,} \end{cases}$$

де k і j відповідно кількість одиниць у рядку та стовпці розрідженої матриці перевірки парності LDPC.

У цей момент, як і в першому експерименті, ми будуємо графіки цих кодів (рис. 3.3) і визначаємо точку їх перетину, причому передавач і приймач знають про це. А потім визначте концепцію нашої системи передачі (рис. 3.4): поки SNR менше ніж 7328 дБ, канал зашумлений, тому використовується код LDPC, і коли SNR стає вищим за вказане значення, система перемикається на каскадний код.

3.3 Порівняння ефективності

Тепер, щоб порівняти отримані результати, розрахуємо параметри ефективності наших систем. Зокрема, їх три: коефіцієнти частоти, потужності та інформаційної ефективності.

Точки відповідної потужності та інформаційної ефективності повинні бути зображені на графіку межі Шеннона, який виводиться для ідеальної системи зв'язку, де пропускна здатність каналу та бітрейт сигналу в каналі збігаються:

$$\beta(\gamma) = \frac{\gamma}{2^{\gamma} - 1}$$

де β – коефіцієнт енергетичної ефективності, а γ – коефіцієнт частотної ефективності.

Ми порівнюємо надійні коди в момент, коли ймовірність помилки стає менше 10^{-6}, і прості коди – коли ймовірність помилки стає менше 10^{-10}. В якості відправної точки ми беремо ці коефіцієнти широко поширеної модуляції QPSK без будь-якого кодування. Коефіцієнт спаду $\alpha = 0{,}2$.

Спочатку ми визначаємо пропускну здатність за такою формулою:

$$F_{ch} = \frac{R \cdot (1+\alpha)}{R_{\text{код}} \cdot \log_2 M}, [Hz]$$

де M – кількість канальних символів.

Пропускна здатність каналу зв'язку розраховується наступним чином:

$$C = F_{ch} \cdot \log_2 \left(1 + \frac{E_b \cdot R}{N_0 \cdot F_{ch}}\right)$$

де $\frac{E_b}{N_0} = SNR = h_b^2$.

Коефіцієнт інформаційної ефективності (без одиниць або у відсотках):

$$\eta = \frac{R}{C}$$

Коефіцієнт частотної ефективності (у разах, слід перевести в дБ):

$$\gamma = \frac{R}{F_{ch}}$$

Коефіцієнт енергоефективності (у разах, слід перевести в дБ):

$$\beta = \frac{R_{ch}}{P_s/N_0} = \frac{1}{SNR}$$

Результати представлені на рис. 3.5 та в таблиці 3.1.

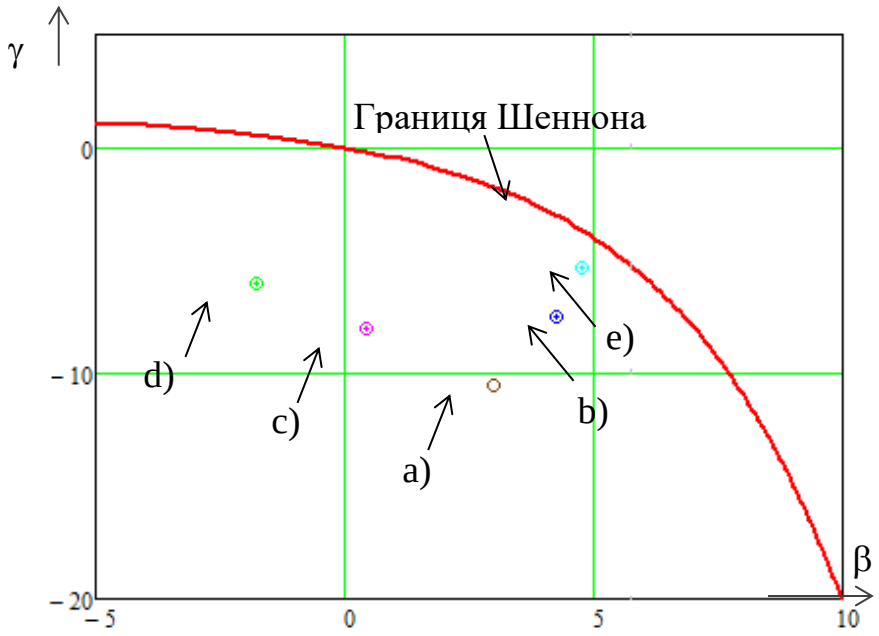

Рисунок 3.5 – Ефективність параметри порівняння : а) QPSK ; б) RS код ; в) каскадний код ; г) турбо код ; е) LDPC код

Таблиця 3.1 - Результати розрахунку параметрів ефективності при моделюванні №1 та №2

	F_{ch}, МГц	C, Мбіт/с	η, %	β, dB	γ, dB
код RS	26,25	105	66,7	-7,5	4,26
Каскадний код	63,64	190,2	36,8	-8	0,414
Турбо код	105	196,3	35,7	-6	-1761
LDPC	23,33	81,22	86,2	-5,3	4,771

3. 4 Висновок

На рис. 3.6 показано порівняння двох адаптивних систем, взятих як приклади в моделюванні №1 і моделюванні №2 за здатністю виправлення помилок.

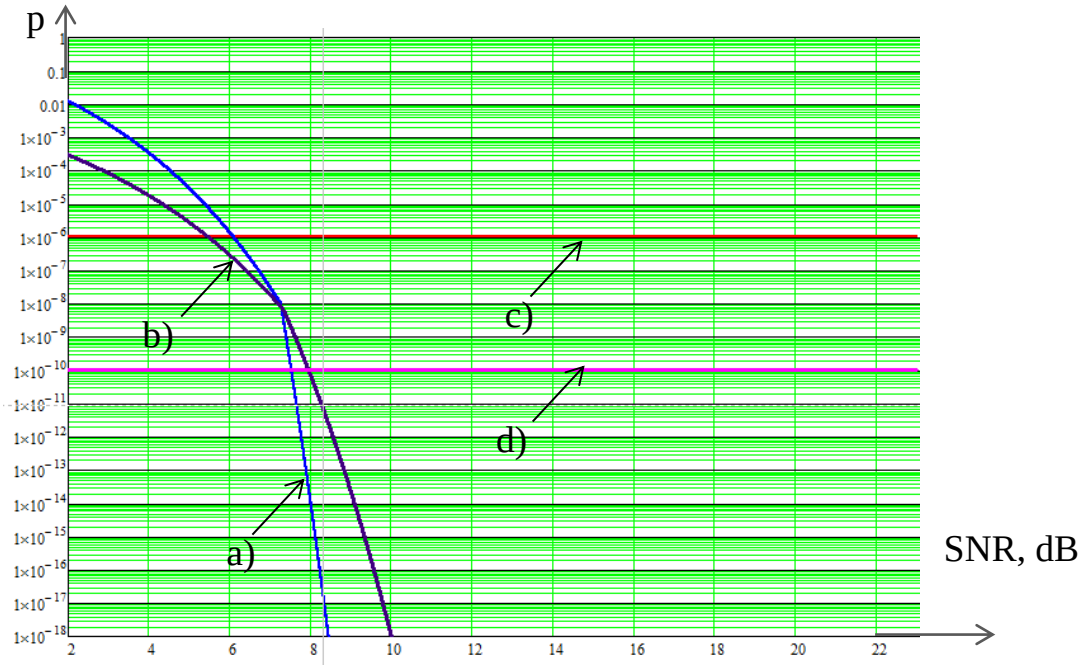

Рисунок 3.6 – Імовірності помилок адаптивних систем: а) моделювання №1; б) моделювання №2 ; с) 10^{-6} допустима ймовірність помилки d) 10^{-10} допустима ймовірність помилки

Як бачимо, порівнюючи дві розглянуті адаптивні конфігурації системи, як за параметрами ефективності, так і за здатністю виправляти помилки, в

зашумлених каналах краще буде вибрати код LDPC (9, 2), а в чистому каналі – код RS (246, 164). Також обидва ці коди забезпечують нижчий F_{ch}, що означає, що вони займають меншу частину смуги пропускання. Однак, як ми бачимо, ці два кодування дуже незначно збільшують пропускну здатність каналу на відміну від інших розглянутих варіантів.