

## ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ЗАВАДОСТІЙКОГО КОДУВАННЯ В СИСТЕМАХ ОПТИЧНОЇ ПЕРЕДАЧІ ТА ЗБЕРЕЖЕННЯ ДАНИХ

Єрмоменко М.І.

e-mail: [maksym.ieromenko@nure.ua](mailto:maksym.ieromenko@nure.ua)

Науковий керівник – к.ф.-м.н., доц. Коваленко О.М.

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. Фізики  
м. Харків, Україна

This paper explores the theoretical foundations of error-correction coding within optical data transmission and storage systems. As data rates in backbone networks reach terabit levels, signal reliability is increasingly compromised by physical impairments such as optical noise, chromatic dispersion, and non-linear effects in fibers. The study analyzes the Shannon-Hartley theorem as a fundamental limit for channel capacity and examines the role of Forward Error Correction (FEC) in mitigating Bit Error Rate (BER) without retransmission. Special attention is given to the algorithmic implementation of Reed-Solomon codes and modern Open Forward Error Correction (O-FEC) technologies. The research demonstrates how mathematical redundancy and iterative decoding processes allow optical systems to approach the Shannon limit, ensuring the stability of digital infrastructure under complex physical conditions.

Стрімкий розвиток магістральних мереж зв'язку та систем збереження інформації вимагає постійного підвищення швидкості передачі даних. Однак зі збільшенням швидкості модуляції та щільності запису зростає вразливість сигналу до фізичних завад. Пропускна здатність будь-якого оптичного каналу обмежена фундаментальною межею Шеннона-Хартлі

$$C = W \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right), \quad (1)$$

де  $C$  – пропускна здатність,  $W$  – ширина смуги частот, а  $S/N$  – відношення сигнал/шум.

Завадостійке кодування стає ключовим інструментом для наближення до цієї межі, забезпечуючи цілісність інформації при мінімальних енергетичних витратах [4].

Надійність оптичних систем передачі та збереження даних обмежена низкою фізичних явищ. Основними факторами виникнення помилок є [3]:

1. Оптичний шум. Зумовлений квантовою природою світла (дробовий шум) та роботою підсилювачів, що додають спонтанне випромінювання до корисного сигналу.

2. Дисперсія та нелінійні ефекти. Під час поширення у волокні світлові імпульси зазнають часового розширення, що призводить до міжсимвольної інтерференції (ISI). Це явище спричиняє «закриття» очної діаграми, ускладнюючи дискретизацію сигналу фотодетектором, рисунок 1.

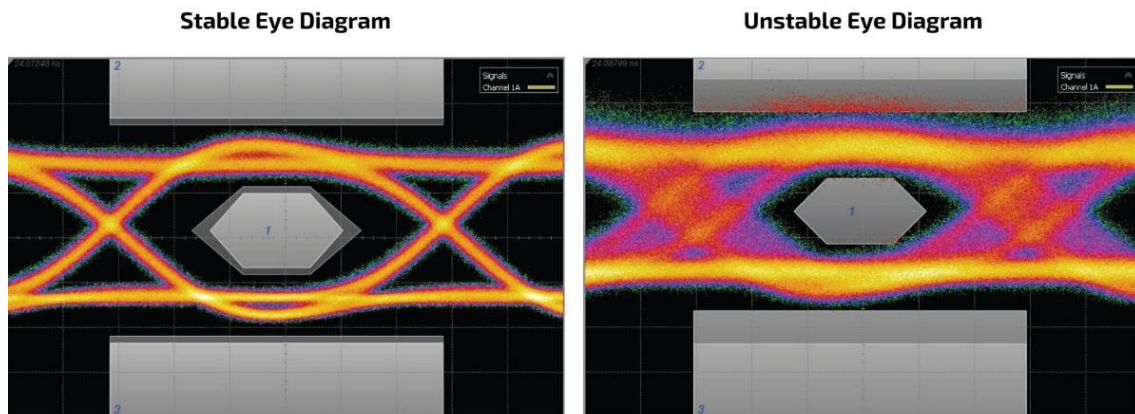


Рисунок 1 – Порівняння стабільної та нестабільної очних діаграм

3. Ймовірність бітової помилки (BER). Це інтегральний показник, що визначає відношення хибних бітів до загальної кількості переданої інформації. Коли BER перевищує критичне значення, система стає непрацездатною без застосування алгоритмів корекції [3].

Для подолання фізичних обмежень оптичного каналу використовується концепція контрольованої надлишковості. Основним методом є пряме виправлення помилок (Forward Error Correction – FEC). На відміну від систем із перепитуванням (ARQ), FEC дозволяє приймачу відновлювати дані в реальному часі без затримок на зворотний зв'язок.

Математично процес FEC базується на відображенні інформаційної послідовності у кодовий простір більшої розмірності. Це дозволяє створити «відстань» між дозволеними комбінаціями сигналів, що дає змогу ідентифікувати та виправити помилкові біти, які виникли внаслідок шумів або дисперсії [4].

Одним із найбільш ефективних методів для оптичних систем залишаються коди Ріда-Соломона, рисунок 2.

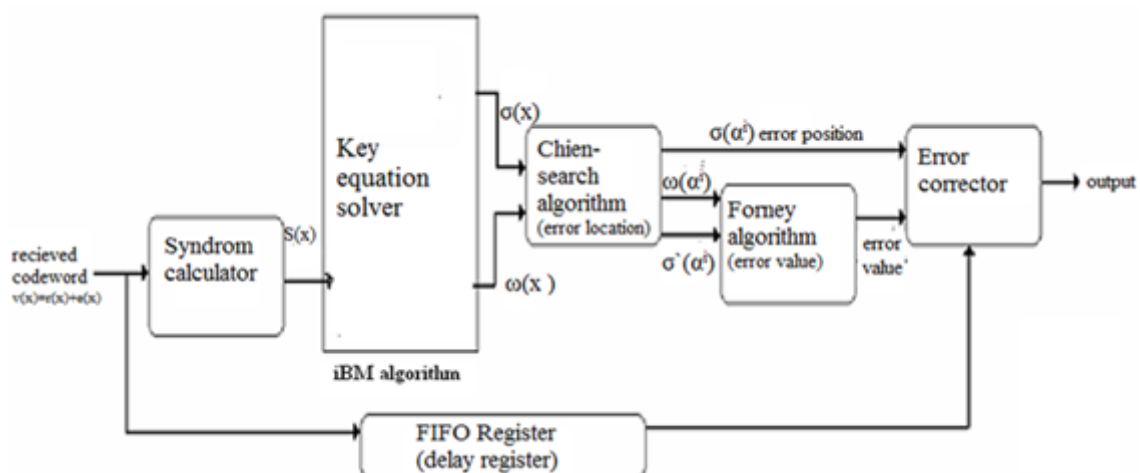


Рисунок 2 – Структура блоку коду Ріда-Соломона

Код  $RS(n, k)$  будується над скінченними полями Галуа. Кожен символ коду складається з  $m$  бітів.

Параметри коду визначаються як:

- $k$  – кількість інформаційних символів;
- $n$  – повна довжина кодового блоку;
- $2t = n - k$  – кількість перевірочних символів.

Така структура дозволяє виправити до  $t$  помилкових символів у довільних позиціях блоку. Це особливо ефективно при виникненні пакетних помилок, характерних для фізичних пошкоджень поверхні оптичних дисків або короткочасних сплесків шумів у волокні [1].

У сучасних магістральних мережах зі швидкостями 400 Гбіт/с і вище впроваджується технологія O-FEC (Open Forward Error Correction). Вона використовує ітеративне «м'яке» декодування (Soft-Decision Decoding), де алгоритм аналізує не просто бінарні значення, а ймовірнісні характеристики отриманого сигналу. Це забезпечує додатковий енергетичний виграш (Coding Gain) до 10–12 дБ. Такий підхід дозволяє застосовувати складні типи модуляції, такі як QAM-16 або QAM-64, наближаючи реальну пропускну здатність каналу до межі Шеннона [2].

Розвиток оптичних інформаційних систем на сучасному етапі значною мірою залежить від вдосконалення методів цифрової обробки сигналів. Теоретичний аналіз завадостійкого кодування доводить, що використання алгоритмів FEC та кодів Ріда-Соломона є критично важливим для нівелювання впливу дисперсії та шумів в оптичному середовищі. Впровадження ітеративних методів декодування дозволяє будувати надійну цифрову інфраструктуру, здатну працювати на межі фізичних можливостей каналу передачі.

#### Список використаних джерел:

1. Wicker S., Bhargava V. Reed-Solomon Codes and the Compact Disc, *Reed-Solomon Codes and Their Applications*, IEEE, 1994, pp.41-59, doi: 10.1109/9780470546345.ch4.
2. MapYourTech. O-FEC: open forward error correction. URL: <https://mapyourtech.com/o-fec-open-forward-error-correction/> (дата звернення: 20.02.2026).
3. Paschotta R. Optical data transmission. *RP Photonics Encyclopedia*. URL: [https://www.rp-photonics.com/optical\\_data\\_transmission.html#Bit-Error-Issues](https://www.rp-photonics.com/optical_data_transmission.html#Bit-Error-Issues) (дата звернення: 20.02.2026).
4. Sklar B. Digital communications: fundamentals and applications: second edition. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2001. 1104 p.
5. Kovalenko O., Yunakova O., Makovetskyi Y., Yunakov M. Effect of scattering on the transmission spectra of crystalline p-terphenil. *International Conferences on Natural Sciences and Technologies, ICONAT 2024*, 30.05-1.06.2024. Turkiye. P.30.