

## РОЗРОБКА АДАПТИВНИХ МЕТОДІВ КОДУВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ СПЕКТРАЛЬНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Мережі 5G характеризуються високими вимогами до пропускну здатності та ефективного використання спектру. Умови передачі даних у реальних каналах зв'язку постійно змінюються через такі фактори як багатоприменевість, шум, інтерференція та динаміка користувачького навантаження. Традиційні методи кодування, які використовують фіксовані параметри, мають обмежену адаптивність і не забезпечують оптимальної продуктивності у змінних умовах. Запропонований для задач попередніх досліджень метод базується на динамічному підборі параметрів кодування та модуляції відповідно до умов каналу, що визначаються в реальному часі. Основні компоненти:

1. Алгоритм оцінювання якості каналу (CQI - Channel Quality Indicator):

- вимірювання поточного рівня сигналу/шуму (SNR);
- оцінка затримок і ймовірності пакетних втрат.

2. Адаптація параметрів кодування

- довжина кодового слова ( $N$ ): збільшується для умов із низьким SNR і зменшується в умовах високої якості каналу;
- рівень надлишковості ( $R$ ): коригується відповідно до рівня перешкод (високий  $R$  для шумних умов, низький для чистих).

3. Динамічний вибір модуляції:

- перемикання між схемами модуляції (QPSK, 16-QAM, 64-QAM) на основі аналізу CQI.

Запропонована модель використовує модифіковану схему кодування LDPC (Low-Density Parity-Check):

$$R = k / n$$

де  $R$  – швидкість кодування,  $k$  – інформаційні біти,  $n$  – загальна довжина слова.

Використаємо симуляційну платформу MATLAB Simulink для моделювання каналу та розробки кодувальних схем.

Значимо умови симуляції:

- канал із змінними умовами (Rayleigh fading);
- випадкові завади (AWGN);
- сценарії для міських і сільських середовищ.

Для вибору схеми модуляції використовується правило:

$$\text{Модуляція} = \left\{ \begin{array}{l} QPSK, \quad \text{якщо } SNR < 10 \text{ дБ} \\ 16-QAM, \quad \text{якщо } 10 \leq SNR < 20 \text{ дБ} \\ 64-QAM, \quad \text{якщо } SNR \geq 20 \text{ дБ} \end{array} \right.$$

Показники продуктивності:

1. Спектральна ефективність (bps/Hz):

$$\eta = \frac{\text{Сума переданих інформаційних бітів}}{\text{Ширина спектра} \times \text{Час передачі}}$$

2. Відношення помилок на біт (BER): вимірювання для різних схем модуляції та кодування.

3. Затримки передачі (Latency). Результати симуляцій:

- адаптивний метод продемонстрував покращення спектральної ефективності до 15% порівняно зі стандартними методами;
- зниження BER на 20% у складних каналах зв'язку (SNR < 10 дБ);
- у високоякісних умовах (SNR > 20 дБ) забезпечено стабільну передачу з 64-QAM, зберігаючи низький рівень помилок.

Практична реалізація:

- інтеграція у фізичний рівень телекомунікаційних систем 5G через NR (New Radio).
- реалізація на FPGA чи SoC для верифікації ефективності в реальних умовах.

Висновки та перспективи. Адаптивні методи кодування забезпечують значний приріст продуктивності телекомунікаційних систем. Подальший розвиток включає інтеграцію з технологіями штучного інтелекту для прогнозування умов каналу та динамічної оптимізації в режимі реального часу

### Список використаних джерел

1. Кулик В.Л. Основи цифрового оброблення сигналів: навчальний посібник. – Київ: Видавництво Політехніка, 2019. – 312 с.
2. Мішин А. О. Методи підвищення спектральної ефективності телекомунікаційних систем // Наукові праці Одеської національної академії зв'язку. – 2022. – №1. – С. 45–52.
3. Li, J., Zhu, J., & Liu, L. Adaptive Coding and Modulation Techniques for 5G Wireless Networks // IEEE Communications Magazine. – 2019. – Vol. 57, №3. – P. 98–105.