

**АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ  
НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ**

---

УДК 004.89

**АНАЛІЗ БІТОВИХ ПОМИЛОК У КАНАЛАХ МЕРЕЖІ ШИРОКОСМУГОВОГО  
РАДІОДОСТУПУ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ LTE**

Канд. техн. наук В.П. Лисечко, слухачка ННІППК О.І. Вінник

**АНАЛИЗ БИТОВЫХ ОШИБОК В КАНАЛАХ СЕТИ ШИРОКОПОЛОСНОГО  
РАДИОДОСТУПА НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ LTE**

Канд. техн. наук В.П. Лисечко, слушательница УНИППК О.И. Винник

**ANALYSIS OF BIT ERRORS IN CHANNELS OF BROADBAND RADIO ACCESS NETWORK  
BASED ON LTE TECHNOLOGY**

Candidate of techn. sciences V.Lysecenko

Postgraduate student of Educational and Scientific Institute for Advanced and Retraining O.Vinnyk

*У статті досліджується залежність кількості бітових помилок у каналах з білим шумом і релієвськими завмираннями від виду модуляції, що використовується в мережі LTE. Показано, що завадостійкість системи підвищується зі зростанням кількості приймальних і передавальних антен при використанні систем MIMO.*

**Ключові слова:** коефіцієнт бітових помилок, завадостійкість, білий шум, релієвські завмирання, BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, MIMO.

*В статье исследуется зависимость количества битовых ошибок в каналах с белым шумом и релеевскими замираниями от вида модуляции, используемой в сети LTE. Показано, что помехоустойчивость системы повышается с ростом количества приемных и передающих антенн при использовании систем MIMO.*

**Ключевые слова:** коэффициент битовых ошибок, помехоустойчивость, белый шум, релеевские замирания, BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, MIMO.

*The main parameter of quality of digital transmission systems are errors. The most common index of errors - bit error ratio (BER). Mathematically, the bit error ratio is defined as the ratio of erroneous bits received to the total number of transmitted bits. Communication systems are started analyzing from the description of the main characteristics in the classical (ideal) channel with additive white Gaussian noise (AWGN). Apart from the noise, this article analyzes the channels with Rayleigh fading. Rayleigh fading occurs when the signal reaches the receiver through multiple paths from the base station. The resultant received signal is the sum of signals coming from the different amplitude and phase. Also, the amount of BER affected by the type of modulation. Various types of modulation have different noise immunity. The article shows that the system noise immunity increases with the number of receive and transmit antennas using MIMO systems.*

**Keywords:** bit error ratio, immunity, white noise, Rayleigh fading, BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, MIMO.

**Вступ.** Телекомунікації – галузь науки, яка розвивається надзвичайно динамічно. З моменту появи перших телеграфних і

телефонних апаратів людство зробило величезний стрибок до високошвидкісних широкосмугових систем зв'язку. LTE (Long

Term Evolution) є сучасною перспективною технологією побудови мереж бездротового зв'язку.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями.** Основною метою сучасних телекомунікаційних технологій є нарощування швидкості передачі даних. LTE передбачає можливість створення високошвидкісних систем стільникового зв'язку, оптимізованих для пакетної передачі даних зі швидкістю до 1 Гбіт/с в низхідному каналі (від базової станції до користувача) і до 500 Мбіт/с у висхідному каналі (відомості для системи LTE Advanced) [4]. Забезпечити заплановані швидкості і при цьому зменшити кількість помилок при радіообміні даними в умовах множинних перевідбиттів сигналів дозволяє використання багатоелементних антенних решіток технології MIMO (Multiple-Input Multiple-Output – множинний вхід, множинний вихід) [4]. Використання MIMO систем зв'язку з  $N_t$  передавальними та  $N_r$  приймальними антенами дозволяє одночасно підвищити швидкість передачі і надійність приймання даних без додаткового збільшення ширини каналу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналізу завадостійкості систем зв'язку з багатоелементними антенними решітками присвячена велика кількість наукових робіт. Проте у відомих роботах аналіз обмежувався дослідженням систем з низькими порядками модуляції. Так, у роботах [1, 2] розглядалися лише модуляція з невеликою кількістю  $M$  бітів на один символ (BPSK=1, QPSK=2). У цих етекту було показано, що різниця в характеристиках MIMO-систем, в яких етектуювання ь різні методи етектуювання сигналів, значна і складає порядку 6-10 дБ.

**Визначення мети і завдання дослідження.** Метою статті є аналіз ефективності систем MIMO у зменшенні кількості бітових помилок у каналі з адитивним білим гаусівим шумом і релеївськими замираннями сигналу при різних методах модуляції сигналу.

**Основна частина дослідження.** Завадостійкість систем зв'язку зручно

аналізувати залежністю коефіцієнта бітових помилок (bit error ratio, BER) від відношення сигнал/шум (signal-to-noise ratio, S/R, SNR).

Коефіцієнт бітових помилок BER для двійкової фазової маніпуляції (binary phase-shift keying, BPSK) і квадратурної фазової маніпуляції (quadrature phase-shift keying, QPSK) у каналі з білим шумом може бути обчислений за формулою [3]

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right), \quad (1)$$

де  $\frac{E_b}{N_0}$  – відношення сигнал/шум, відношення

енергії біта до спектральної щільності потужності шуму;

$Q(x)$  – гаусів інтеграл помилок, табульована величина, що розраховується за формулою

$$Q(x) = \int_x^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{u^2}{2}) du. \quad (2)$$

Імовірність появи бітової помилки для квадратурної (амплітудної) модуляції (quadrature amplitude modulation, QAM)  $M$ -QAM, де  $M = 2^k$  – розмір набору символів та  $k$ -парне число

$$P_b \approx \frac{2(1-L^{-1})}{\log_2 L} Q\left[\sqrt{\left(\frac{3 \log_2 L}{L^2 - 1}\right) \frac{2E_b}{N_0}}\right], \quad (3)$$

де  $Q$  – визначено за формулою (2);

$L = \sqrt{M}$  – кількість рівнів амплітуди в одному вимірі.

На рис. 1 подана залежність коефіцієнта бітових помилок BER для каналу з адитивним білим гаусівим шумом (АБГШ) для систем зв'язку, що використовують модуляцію BPSK/QPSK, 16-QAM і 64-QAM.

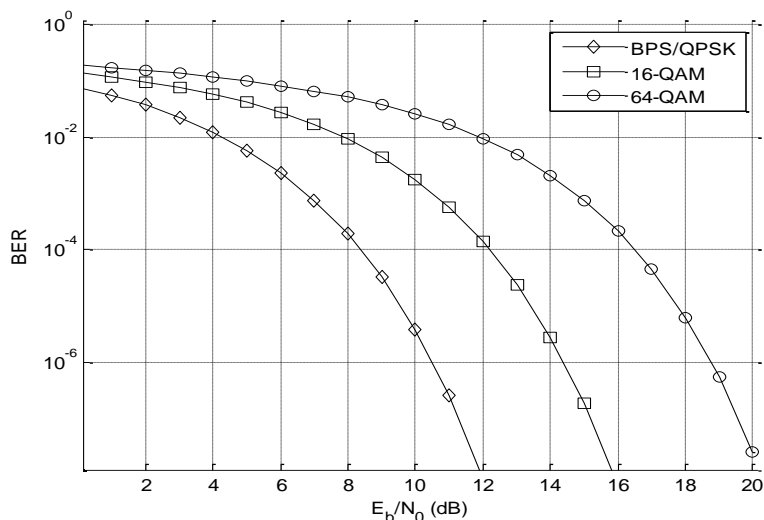


Рис. 1. Залежність BER для модуляції BPSK/QPSK, 16-QAM, 64-QAM в каналі з АБГШ

Модель релієвських завмирань використовується для каналів, які не мають сильного компонента сигналу прямої видимості

між передавачем і приймачем. Коефіцієнт завмирань може бути представлений як [3, 5]

$$\alpha(t)e^{-j2\pi f_c \tau(t)} = x_n(t) + jy_n(t), \quad (4)$$

де  $\alpha(t)$  – результуюча амплітуда;

$2\pi f_c \tau(t)$  – результуюча фаза;

$x_n(t)$  та  $y_n(t)$  – ортогональні компоненти.

де  $\sigma^2$  – середня потужність багатопроменевого сигналу.

Якщо кількість таких компонентів  $x_n(t)$  та  $y_n(t)$  велика і жоден з них не переважає, то у фіксований момент часу змінні  $x_r(t)$  та  $y_r(t)$ , що є результатами сумування всіх  $x_n(t)$  та  $y_n(t)$ , відповідно, будуть мати гаусіву функцію розподілу імовірності. Ці ортогональні компоненти дають завмирання  $r_0(t) = \sqrt{x_r^2(t) + y_r^2(t)}$  [3]. Середні значення величин  $x_n(t)$  та  $y_n(t)$  наближаються до нуля, оскільки відсутній сильний компонент сигналу основного променя. У цьому випадку маємо релієвський розподіл з функцією щільності ймовірності, що подається як [3, 5]

На рис. 2, 3 наведена залежність коефіцієнта бітових помилок BER для каналу з релієвськими завмираннями для систем зв'язку, що використовують модуляцію BPSK/QPSK, 16-QAM і 64-QAM відповідно, від кількості променів  $L$  сигналу.

Для боротьби із завмираннями використовують багатоантенні системи MIMO (Multiple Input Multiple Output – множинний вхід, множинний вихід). Передавач у такій системі посилає  $n$  незалежних сигналів, використовуючи  $m$  антен. На приймальній стороні кожна з  $m$  антен одержує сигнали, які є суперпозицією  $n$  сигналів від всіх передавальних антен. Таким чином, сигнал  $R_1$ , прийнятий першою антеною, можна подати у вигляді [7,8]

$$p(r_0) = \begin{cases} \frac{r_0}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{r_0^2}{2\sigma^2}\right], & r_0 \geq 0, \\ 0, & r_0 < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$R_1 = h_{11}T_1 + h_{21}T_2 + \dots + h_{n1}T_n. \quad (6)$$

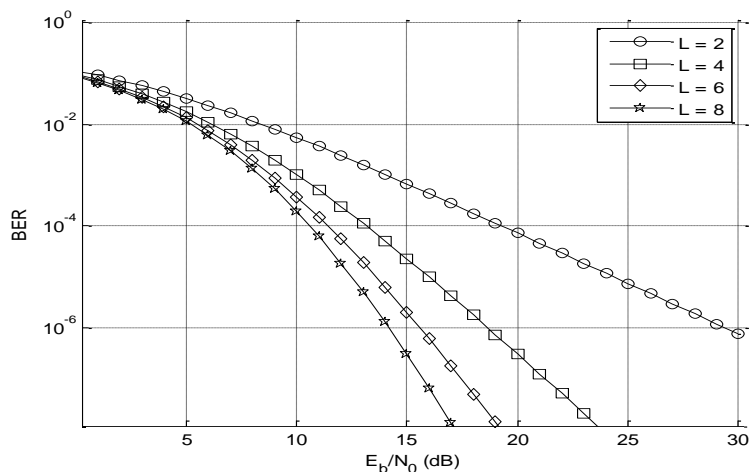


Рис. 2. Залежність BER для модуляції BPSK/QPSK в каналі з релєївськими завмираннями

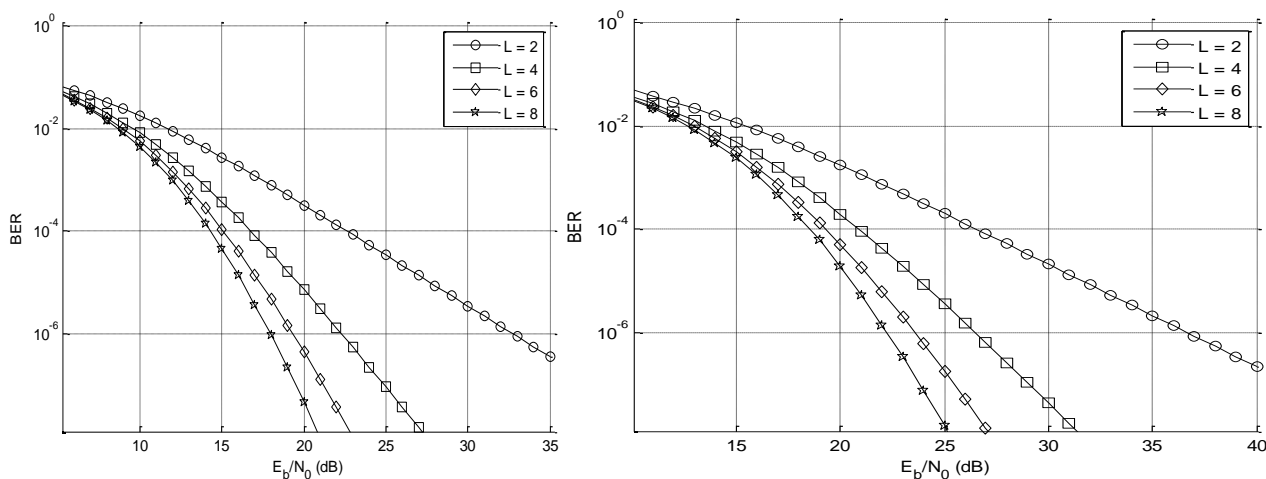


Рис. 3. Залежність BER для модуляції 16-QAM, 64-QAM в каналі з релєївськими завмираннями

Записуючи подібні рівняння для кожної приймальної антени, одержуємо таку систему [7, 8]:

$$\begin{cases} R_1 = h_{11}T_1 + h_{21}T_2 + \dots + h_{n1}T_n; \\ R_2 = h_{12}T_1 + h_{22}T_2 + \dots + h_{n2}T_n; \\ \dots \\ R_m = h_{1m}T_1 + h_{2m}T_2 + \dots + h_{nm}T_n. \end{cases} \quad (7)$$

Або, переписавши даний вираз в матричному вигляді,

$$[R] = [H] \cdot [T], \quad (8)$$

де  $[H]$  – матриця перенесення, що описує МІМО-канал зв'язку.

Для того щоб на приймальній стороні декодер міг правильно відновити всі сигнали, він повинен, насамперед, визначити коефіцієнти  $h_{ij}$ , що характеризують кожний з  $m \times n$  каналів передачі. Для визначення коефіцієнтів  $h_{ij}$  у технології МІМО використовується преамбула пакета.

Визначивши коефіцієнти матриці перенесення, можна легко відновити переданий сигнал:

$$[T] = [H]^{-1} \cdot [R], \quad (9)$$

де  $[H]^{-1}$  – матриця, зворотна матриці перенесення  $[H]$ .

На рис. 4 наведена залежність коефіцієнта бітової помилки BER від відношення сигнал/шум SNR для модуляцій BPSK, QPSK, 16-QAM і 64-QAM в каналі з релієвськими завмираннями у 2x1 та 2x2 системах MIMO.

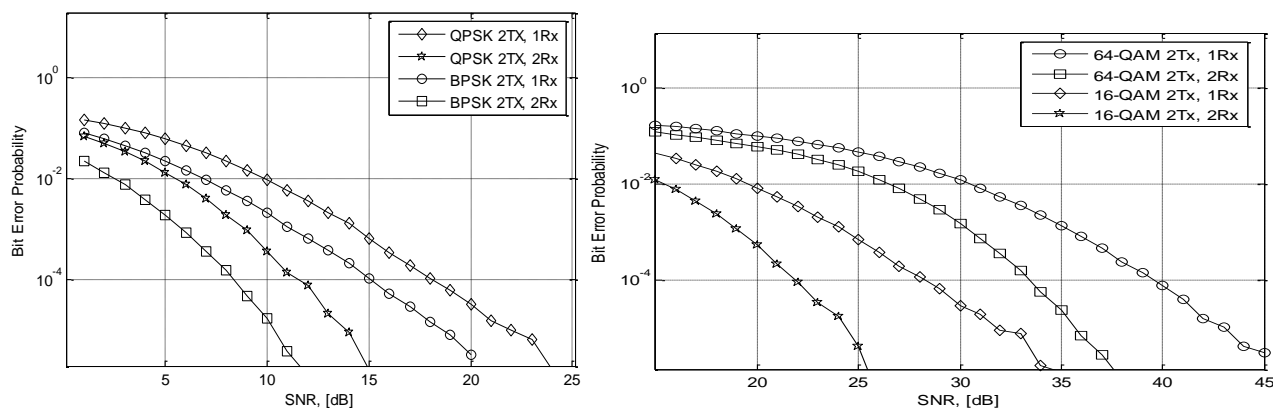


Рис. 4. Залежність BER у 2x1 та 2x2 MIMO-системах для модуляцій BPSK, QPSK, 16-QAM та 64-QAM

З наведених на рис. 4 результатів видно, що з використанням модуляцій 16-QAM та 64-QAM завадостійкість системи знижується. Це пояснюється тим, що зі зростанням порядку модуляції зростає щільність заповнення сигнальними точками сигнального простору.

**Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** У результаті аналізу можна зробити висновок про

те, що використання багатоеlementних антенних решіток підвищує завадостійкість пропорційно кількості використаних антенних систем. Вже при використанні найпростіших систем MIMO 2x1 та 2x2 відношення сигнал/шум збільшується приблизно у півтора рази, чим зменшується вплив шуму на характеристики системи і дозволяється застосування високих порядків модуляції.

*Список використаних джерел*

1. Van Zelst A., van Nee R., Awater G.A. [Текст] // Proc. of Vehicular Tech. Conf., 2000. VTC 2000-Spring Tokyo. 2000 IEEE 51st. May 2000.V. 2. D. 1070–1074.
2. Van Zelst A. [Текст] // Electrotechnical Conf., 2000. MELECON 2000, 10th Mediterranean. May 2000. V.3.
3. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение [Текст] / Б. Скляр; [пер. с англ. Е.Г. Грозы, В.В. Марченко, А.В. Назаренко, О.М. Ядренко]. – 2-е изд. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2003. – 1104 с.
4. Тхвинский, В.О. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура [Текст] / В.О. Тхвинский, С.В. Терентьев, А.Б. Юрчук. – М.: Эко-Трендз, 2010. – 284 с.
5. Столингс, В. Беспроводные линии связи и сети [Текст] / В. Столингс; [пер. с англ.] – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2003. – 640 с.
6. Тихвинский, В.О. Стандартизация, спецификации, эволюция технологии и архитектура базовой сети LTE [Текст] / В.О. Тихвинский, С.В. Терентьев, К.В. Минаев // Сети и средства связи, №2(10). Спец. выпуск «Сети доступа». – 2009. – № 3. – С. 124-132.

7. B. Sklar [Текст] / Rayleigh fading Channels in mobile digital communication systems. Part-I: characterization, IEEE Commun. Magazine, vol. 35, no. 9, pp. 136–146, Sept. 1997.

8. L. Zheng, D. Tse [Текст] / Diversity and multiplexing: A fundamental tradeoff in multiple antenna channels, vol. 49, pp. 1073–1096, May 2003.

9. Arunabha Ghosh, David R. Wolter, Jeffrey G. Andrews and Runhua Chen [Текст] /Broadband Wireless Access with WiMax/802.16: Current Performance Benchmarks and Future Potential," IEEE Commun. Magazine, vol. 43, no. 2, pp. 129–136, Feb. 2005.

10. Лазарев, Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB[Текст]: учеб. курс. – К.: Издательская группа BHV, 2005. – 512 с.

Рецензент д-р техн. наук, професор С.І. Приходько

---

Лисечко Володимир Петрович, канд. техн. наук, доцент кафедри транспортного зв'язку Української державної академії залізничного транспорту. Тел.: (093) 921-61-11, (095) 596-13-30. E-mail: lysechkov@ukr.net

Вінник Ольга Ігорівна, слухачка Навчально-наукового інституту перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів Української державної академії залізничного транспорту, електромеханік зв'язку Ясинуватської дистанції сигналізації та зв'язку Донецької залізниці. Тел.: (099) 008-00-48. E-mail: olya.mylis@rambler.ru

Lysechko Volodymyr Petrovych, candidate of techn. sciences, professor of department of Transport telecommunications at Ukraine State Academy of Railway Transport. Тел.: (093) 921-61-11, (095) 596-13-30. E-mail: lysechkov@ukr.net

Vinnyk Olga Igorivna a postgraduate student of Educational and Research Institute of Retraining and Advanced training at Ukraine State Academy of Railway Transport, communication electrician of Yasynuvata Signaling and Communication division at Donetsk railway. Tel.: (099)008-00-48. E-mail: olya.mylis@rambler.ru