

УДК 621.391

І.І Сопронюк<sup>1</sup>, В.П. Лисечко<sup>1</sup>, Фарид Абдель Самад<sup>2</sup><sup>1</sup>Українська державна академія залізничного транспорту, Харків<sup>2</sup>Національний технічний університет «ХПИ», Харків

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ СИСТЕМ БЕЗДРОТОВОГО ДОСТУПУ

У статті досліджується завадостійкість МІМО-систем зв'язку з високими порядками модуляції (16-QAM, 64-QAM) для каналу з білим шумом та Релеєвськими завмираннями. Методом моделювання показано, що завадостійкість систем зменшується із зростанням порядку модуляції і підвищується із зростанням кількості приймальних та передавальних антен.

**Ключові слова:** завадостійкість, білий шум, Релеєвські завмирання, BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, МІМО.

## Вступ

**Постановка проблеми.** Одним з найбільш перспективних способів збільшення максимальної швидкості передачі даних і підвищення завадостійкості існуючих стандартів бездротового доступу є використання багатоелементних антенних решіток. Використання МІМО (Multiple-Input Multiple-Output) систем зв'язку з  $N_t$  передавальними та  $N_r$  приймальними антенами дозволяє одночасно підвищити швидкість передачі і надійність прийому даних без додаткового збільшення ширини каналу.

**Аналіз літератури.** 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.

Наприклад, в роботах [1, 2] розглядалися лише модуляції з невеликим числом  $M$  біт на один символ (BPSK = 1, QPSK = 2). У цих роботах було показано, що різниця в характеристиках МІМО-систем, в яких використовують різні методи детектування сигналів, значна і складає порядку 6 – 10 дБ.

**Метою статті** є дослідження завадостійкості МІМО-систем зв'язку з багатопозиційними видами модуляції для каналу з білим Гаусовим шумом та Релеєвськими завмираннями на основі побудованих моделей.

## Основний матеріал

Завадостійкість систем зв'язку характеризується ймовірністю появи бітової помилки в залежності від відношення сигнал/шум.

Ймовірність помилки на біт або BER при BPSK/QPSK в каналі з білим шумом може бути обчислена за формулою [3]:

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

$$\text{де} \quad Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (2)$$

Ймовірність появи бітової помилки для модуляції M-QAM, де  $M = 2^k$  та  $k$  – парне, обчислюється як:

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

де  $Q$  визначено за формулою (2).

На рис. 1 представлена ймовірність появи бітової помилки BER для каналу з адитивним Гаусовим шумом для систем зв'язку, що використовують модуляцію BPSK/QPSK, 16-QAM і 64-QAM, без урахування будь-яких методів розділення і корекції помилок.

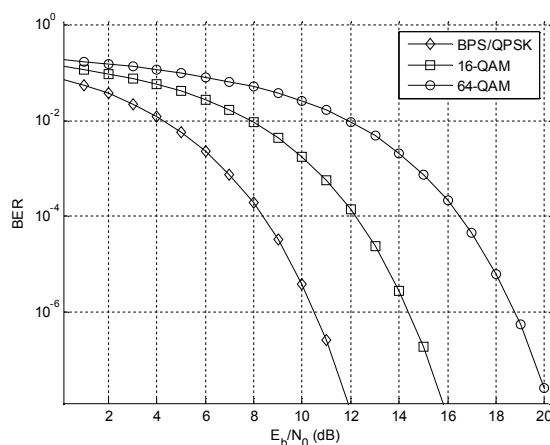


Рис. 1. Ймовірність BER для модуляції BPSK/QPSK, 16-QAM, 64-QAM в каналі з АБГШ

Модель Релеєвських завмирань використовується для каналів, які не мають сильного компоненту сигналу прямої видимості між передавачем і приймачем. Коефіцієнт завмирань може бути представлений як [3, 4]

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

де  $x(t)$  та  $y(t)$  є так званими незалежними реальними Гаусовими імовірнісними процесами. Середні значення величин  $x(t)$  та  $y(t)$  наближаються до нуля, оскільки відсутній сильний компонент сигналу основного променя. Математично, якщо є дві незалежних і тотожно розподілених Гаусових випадкових змінних  $X$  та  $Y$  з середнім значенням рівним 0 і змінну, тоді  $R = \sqrt{X^2 + Y^2}$  має Релеївський розподіл з функцією щільності ймовірності, що представляється як [5]:

$$\rho_R(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{r^2}{\sigma^2}\right] & \text{для } r \geq 0. \\ 0 & \text{для } r < 0 \end{cases}$$

На рис. 2 – 4 представлена ймовірність появи бітрової помилки BER для каналу з Релеївськими завмираннями для систем зв'язку, що використовують модуляцію BPSK/QPSK, 16-QAM і 64-QAM відповідно, в залежності від кількості променів  $L$  сигналу.

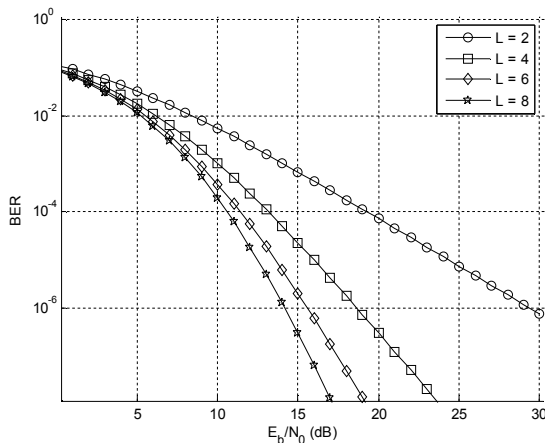


Рис. 2. Ймовірність BER для модуляції BPSK/QPSK в каналі з Релеївськими завмираннями

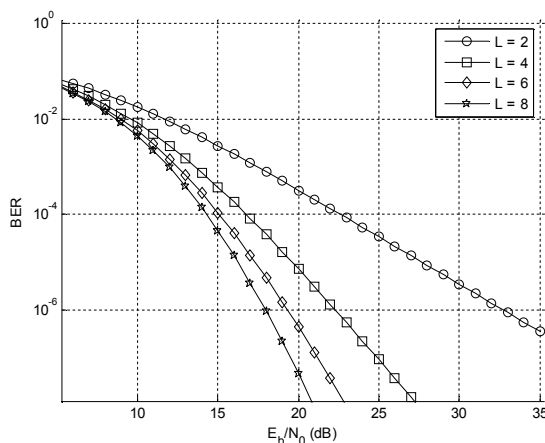


Рис. 3. Ймовірність BER для модуляції 16-QAM в каналі з Релеївськими завмираннями

Для боротьби із завмираннями використовують багатоантенні системи MIMO.

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 представити у вигляді [6, 7]:

$$R_1 = h_{11}T_1 + h_{21}T_2 + \dots + h_{n1}T_n \quad (5)$$

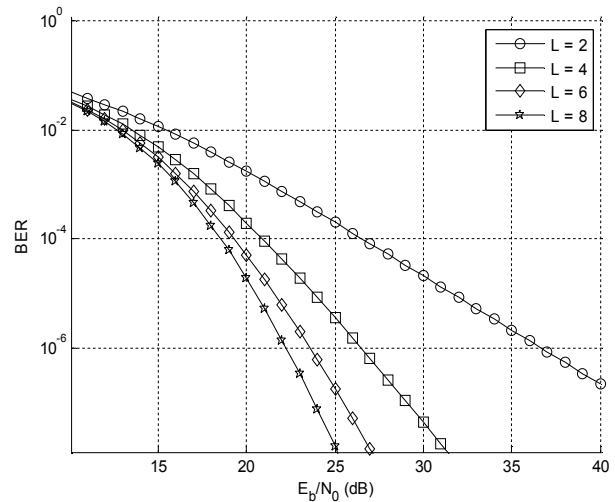


Рис. 4. Ймовірність BER для модуляції 64-QAM в каналі з Релеївськими завмираннями

Записуючи подібні рівняння для кожної приймальної антени, одержуємо наступну систему рівнянь [6, 7]:

$$\begin{cases} R_1 = h_{11}T_1 + h_{21}T_2 + \dots + h_{n1}T_n; \\ R_2 = h_{12}T_1 + h_{22}T_2 + \dots + h_{n2}T_n; \\ \dots \\ R_m = h_{1m}T_1 + h_{2m}T_2 + \dots + h_{nm}T_n. \end{cases} \quad (6)$$

Або, переписавши даний вираз в матричному вигляді:

$$[R] = [H] \cdot [T], \quad (7)$$

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

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

Визначивши коефіцієнти матриці перенесення, можна легко відновити переданий сигнал:

$$[T] = [H]^{-1} \cdot [R], \quad (8)$$

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

На рис. 5, 6 представлено залежність появи бітрової помилки BER від відношення сигнал/шум SNR для модуляцій BPSK, QPSK, 16-QAM і 64-QAM в

каналі з Релеєвськими завмираннями у 2x1 та 2x2 системах MIMO.

З наведених на рис. 5, 6 результатів видно, що з використанням модуляцій 16-QAM та 64-QAM завадостійкість системи знижується. Це пояснюється тим, що з ростом порядку модуляції зростає щільність заповнення сигнальними точками сигнального простору.

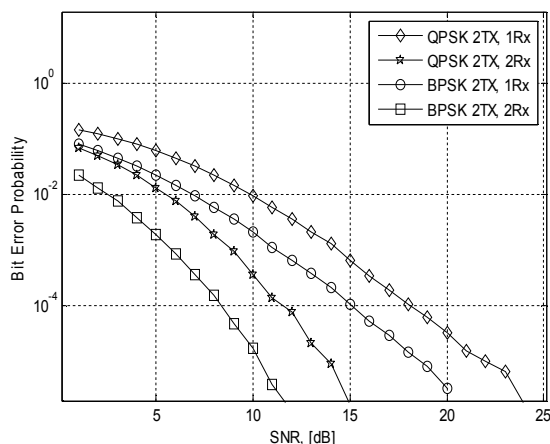


Рис. 5. Ймовірність BER у 2x1 та 2x2 MIMO-системах для модуляцій BPSK та QPSK

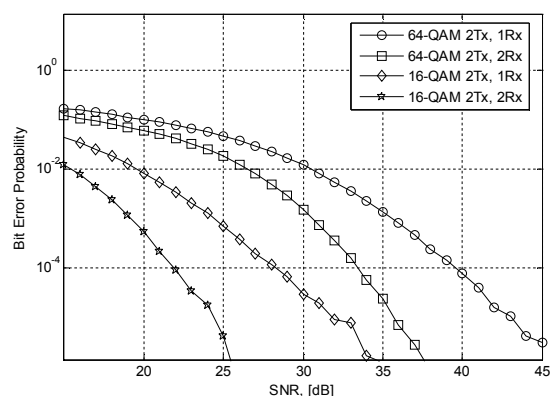


Рис. 6. Ймовірність BER у 2x1 та 2x2 MIMO-системах для модуляцій 16-QAM та 64-QAM

## Висновки

Таким чином, в результаті дослідження можна зробити висновок про те, що використання MIMO-систем підвищує завадостійкість пропорційно кількості використаних антенних систем. Однак, це призводить до ускладнення конструкцій антенно-фідерних трактів. Крім того, в системах бездротового доступу з високими порядками модуляції, що функціонують в складних завадових умовах, доцільним є використання багатоелементних антенних решіток, які забезпечують підвищення відношення рівня сигналу до рівня шуму, що є необхідною умовою застосування таких видів модуляції.

## Список літератури

1. Van Zelst A., van Nee R., Awater G.A. // *Proc. of Vehicular Tech. Conf., 2000. VTC 2000-Spring Tokyo. 2000 IEEE 51st.* – May 2000. – V. 2. – P. 1070-1074.
2. Van Zelst A. // *Electrotechnical Conf., 2000. MELECON 2000, 10th Mediterranean.* May 2000. – V.3.
3. Скляр Б. *Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: пер. с англ. / Б. Скляр.* – 2-е изд. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2003. – 1104 с.
4. Столинс В. *Беспроводные линии связи и сети: пер. с англ. / В. Столинс.* – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2003. – 640 с.
5. Sklar B. *Rayleigh fading Channels in mobile digital communication systems. Part-I: characterization / B. Sklar // IEEE Commun. Magazine.* – Sept. 1997. – Vol. 35, no. 9. – P. 136-146.
6. Zheng L. *Diversity and multiplexing: A fundamental tradeoff in multiple antenna channels / L. Zheng, D. Tse.* – May 2003. – Vol. 49. – P. 1073-1096.
7. *Broadband Wireless Access with WiMax/802.16: Current Performance Benchmarks and Future Potential / Arunabha Ghosh, David R. Wolter, Jeffrey G. Andrews, Runhua Chen // IEEE Commun. Magazine.* – Feb. 2005. – Vol. 43, no. 2. – P. 129-136.

Надійшла до редколегії 29.03.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.О. Кузнецов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ БЕСПРОВОДНОГО ДОСТУПА

І.І Сопронюк, В.П. Лысечко, Фарид Абдель Самад

В статье исследуется помехоустойчивость MIMO-систем связи с высокими порядками модуляции (16-QAM, 64-QAM) для канала с белым шумом и Релеевскими замираньями. Методом моделирования показано, что помехоустойчивость систем уменьшается с ростом порядка модуляции и повышается с ростом количества приемных и передающих антенн.

**Ключевые слова:** помехоустойчивость, белый шум, Релеевские замиранья, BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, MIMO.

## RESEARCH OF ANTIJAMMINGNESS OF THE SYSTEMS OF WIRELESS ACCESS

I.I Sopronyuk, V.P. Lysechko, Farid Abdel Samad

In the article the antijammingness of communication MIMO-systems is explored with the high orders of modulation (16-QAM, 64-QAM) for a channel with white noise and Rayleigh fading. It is shown a design method, that the antijammingness of the systems diminishes with growth of order of modulation and rises with growth of amount of receiving and passing aerials.

**Keywords:** antijammingness, white noise, Rayleigh fading, BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, MIMO.