

УДК 621.391

DOI: 10.31673/2786-8362.2026.018391

Уривський Л.О., д.т.н.; Косогор А.В.

ОПТИМІЗАЦІЯ ПОКАЗНИКІВ ДОСТОВІРНОСТІ В КАНАЛІ ЗВ'ЯЗКУ З БАГАТОПОЗИЦІЙНОЮ МАНІПУЛЯЦІЄЮ ПРИ ФІКСОВАНОМУ ЕНЕРГЕТИЧНОМУ РЕСУРСІ

Uryvskiy L.O., Kosohor A.V. Optimization of reliability indicators in a communication channel with multi-position manipulation at a fixed energy resource. This paper investigates the strategic selection of modulation types to enhance reliability performance under strict power constraints. The authors propose a methodology for optimizing communication reliability through what is termed an energy maneuver. The core idea is that under a fixed energy budget, transitioning to higher-order modulations allows for converting spectral efficiency into significant reliability gains without increasing transmitter power.

The study is based on the development of a graphical tool in the form of a nomogram, created within a software environment using established theoretical models. By analyzing the distance between signal constellation points, the research provides a precise estimation of bit error probability across various scenarios. The work demonstrates that adaptively choosing the signal positionality provides a logarithmic increase in the energy weight of each symbol. Specifically, it is proven that moving from basic binary modulation to schemes with more states can reduce the error probability by a factor of ten. The findings are practically significant for developing adaptive modulation algorithms in modern wireless networks, which is crucial for extending the battery life of autonomous devices and ensuring efficient frequency resource utilization.

Keywords: bit error rate, binary phase shift keying, quadrature phase shift keying, quadrature amplitude modulation, energy resource, nomogram, noise immunity, energy maneuver.

Уривський Л.О., Косогор А.В. Оптимізація показників достовірності в каналі зв'язку з багатопозиційною маніпуляцією при фіксованому енергетичному ресурсі. Стаття досліджує стратегічний вибір типів модуляції для підвищення завадостійкості за умов жорстких обмежень потужності. У роботі розглянуто проблему ефективного використання ресурсів у мережах 5G і 6G, де потрібно поєднати швидкість і надійність передавання даних. Автори пропонують методику підвищення достовірності зв'язку через енергетичний маневр: за фіксованого енергетичного бюджету складніші види маніпуляції дають змогу перетворювати спектральну ефективність на підвищення надійності без збільшення потужності передавача.

Дослідження базується на створенні номограми в середовищі програмного моделювання з використанням відомих теоретичних моделей. Розрахунки виконано за різними методиками для окремих типів модуляції, що дозволило врахувати відстані між точками сигнального сузір'я. Показано, що адаптивна зміна позиційності сигналу збільшує енергетичну вагу символу та може знизити ймовірність помилок на один порядок. Водночас ефект діє лише до певної межі, після якої результат залежить від параметрів системи. Отримані висновки корисні для алгоритмів адаптивного керування в бездротових мережах, автономних пристроїв і зменшення інтерференції.

Ключові слова: ймовірність бітової помилки, бінарна фазова маніпуляція, квадратурна фазова маніпуляція, багатопозиційна амплітудна модуляція, енергетичний ресурс, номограма, завадостійкість, енергетичний маневр.

Вступ

Стрімкий розвиток сучасних інфокомунікаційних систем, зокрема мобільних мереж п'ятого та наступних поколінь, супроводжується постійним зростанням вимог до якості обслуговування, швидкості передачі даних, затримок та енергоефективності. Розширення спектру сервісів, таких як Інтернет речей, автономні системи, безпілотний транспорт і кіберфізичні застосування, формує підвищені вимоги до надійності передачі інформації навіть у складних умовах функціонування. У цьому контексті забезпечення високої достовірності передачі даних стає однією з ключових задач при проектуванні та експлуатації сучасних систем зв'язку.

Особливої актуальності ця проблема набуває для бездротових каналів, де передача сигналу відбувається в умовах впливу шумів, завад та обмеженого енергетичного ресурсу. Для мобільних і автономних пристроїв підвищення потужності передавача є небажаним через

зростання енергоспоживання та скорочення часу автономної роботи. Крім того, збільшення потужності призводить до підвищення рівня інтерференції в ефірі, що негативно впливає на ефективність використання радіочастотного ресурсу. У зв'язку з цим особливого значення набувають підходи, що дозволяють підвищувати завадостійкість без додаткових енергетичних витрат.

Традиційно підвищення ефективності систем зв'язку досягається шляхом збільшення потужності сигналу, застосування складних методів канального кодування або використання комбінованих сигнально-кодових конструкцій. Однак такі підходи часто супроводжуються зростанням обчислювальної складності, апаратних витрат та затримок обробки сигналів. Альтернативним напрямом є оптимізація параметрів сигналу, зокрема вибір виду модуляції, що дозволяє змінювати співвідношення між енергетичними та інформаційними характеристиками передачі.

Зміна типу модуляції, зокрема перехід до багатопозиційних схем, традиційно розглядається як засіб підвищення спектральної ефективності. Водночас за умов фіксованого енергетичного ресурсу така зміна може бути використана і як інструмент керування достовірністю передачі. Це відкриває можливість реалізації підходу, за якого покращення показників ймовірності бітової помилки досягається не за рахунок збільшення потужності, а шляхом її більш ефективного використання.

Аналіз останніх досліджень. Питання ефективного використання ресурсів безпроводових каналів зв'язку розглянуто у роботі [1], де досліджено взаємозв'язок між енергетичними характеристиками та пропускну здатністю систем. У роботі [2] запропоновано узагальнений підхід до визначення ймовірності бітової помилки для різних типів сигнальних сузір'їв, що дозволяє підвищити точність оцінювання завадостійкості. Дослідження [3] присвячене аналізу процесів модуляції та детектування сигналів у цифрових системах зв'язку, що є основою для побудови сучасних методів передачі даних. Класичні залежності між ймовірністю бітової помилки та відношенням сигнал/шум, а також підходи до аналізу цифрових комунікаційних систем детально розглянуті у фундаментальній праці [4]. Водночас питання використання зміни позиційності модуляції як інструменту підвищення достовірності передачі при фіксованому енергетичному ресурсі досліджено недостатньо та потребує подальшого розвитку.

Постановка завдання. В умовах обмеженого енергетичного ресурсу необхідно забезпечити мінімально можливу ймовірність бітової помилки без збільшення потужності передавача. Це потребує розробки підходу до оптимального вибору типу модуляції залежно від енергетичних параметрів каналу. Особливу увагу слід приділити дослідженню впливу переходу між різними видами маніпуляції на показники завадостійкості та визначенню меж ефективності такого підходу.

Метою роботи є дослідження можливості підвищення достовірності передачі інформації в каналах зв'язку шляхом оптимального вибору виду модуляції при фіксованому енергетичному ресурсі. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: провести аналіз існуючих моделей оцінки ймовірності бітової помилки; дослідити вплив типу модуляції на показники завадостійкості; розробити методику порівняння різних схем модуляції за умов незмінної потужності; побудувати графічний інструмент для візуалізації залежностей BER від енергетичних параметрів каналу; визначити ефективність переходу між різними видами модуляції та області їх доцільного застосування.

Виклад основного матеріалу дослідження

В основу дослідження покладено аналіз ймовірності бітової помилки (P_b), яка є ключовим показником достовірності в цифрових каналах зв'язку. Для отримання результатів з високою прецизійністю у всьому діапазоні енергетики, розрахунки проводилися з використанням комбінованого підходу, що враховує специфіку кожного виду маніпуляції. Для бінарної фазової маніпуляції (BPSK), яка обрана як базова точка відліку, було використано математичну модель на основі інтеграла ймовірності (функції Крампа) [1-3]:

$$P_{b \text{ BPSK}}(h^2) = 0,5 \left(1 - \Phi(\sqrt{2h^2}) \right), \quad (1)$$

де $\Phi(x)$ – функція Крампа, а h^2 – відношення енергії біта до спектральної щільності потужності шуму. Ця модель забезпечує найвищу точність при низьких значеннях відношення сигнал/шум, що критично для систем, які працюють на межі чутливості.

При переході до багатопозиційних сигналів (QAM-M), де точки сигнального сузір'я розташовані у двовимірному просторі, розрахунок проводився за розширеною методикою Дж. Прокіса [4]. Дана модель враховує не лише загальну енергію, а й мінімальну евклідову відстань між сусідніми точками сузір'я, що дозволяє оцінити ймовірність "перескоку" сигналу під дією адитивного білого гауссового шуму (AWGN) [4]:

$$p_{b \text{ QAM}} = \frac{4 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right)}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{3}{M-1}h^2}^{\infty} \frac{\exp\left(\frac{-u^2}{2}\right) du}{\sqrt{\frac{3}{M-1}h^2}}, \quad (2)$$

де M – позиційність модуляції. Такий диференційований підхід до вибору формул дозволив побудувати адекватну модель поведінки системи при зміні її параметрів.

Для візуалізації та підтвердження гіпотези про можливість покращення достовірності без збільшення потужності, у середовищі MATLAB було розроблено програмний комплекс. Логіка програми базується на ітераційному обчисленні теоретичних меж завадостійкості для ряду модуляцій: BPSK, QPSK, QAM-16 та QAM-64.

Ключовою особливістю алгоритму є автоматичний перерахунок енергії символу при зміні позиційності модуляції. Оскільки потужність передавача залишається незмінною, при збільшенні кількості бітів у символі, енергія, що припадає на один символ, зростає згідно з логарифмічною залежністю $\Delta E = 10 \lg(\log_2 M)$.

Це фізично означає, що система "накопичує" енергію в одному тривалішому або складнішому символі, що дозволяє змішувати криві завадостійкості QPSK та QAM-16 вправо по осі абсцис на +3 дБ та +6 дБ відповідно відносно базової кривої BPSK. Програма ідентифікує вузлові точки на номограмі, які відображають реальний стан системи: при сталій потужності ми отримуємо різні значення BER залежно від обраного "маневру".

На рис. 1 представлена номограма, що демонструє стратегію покращення достовірності без залучення додаткових енергетичних витрат.

На розробленій номограмі (рис. 1) наочно продемонстровано механізм стратегічного покращення якості зв'язку. Розглянемо покроково траєкторію енергетичного маневру:

1. **Вихідний стан (Точка «0»):** встановлюється базовий рівень для модуляції BPSK ($M=1$). При значенні відношення сигнал/шум 7,9 дБ система забезпечує ймовірність помилки $P_b = 10^{-5}$.

2. **Перший етап маневру (Точка «1»):** при переході до QPSK ($M=2$) без збільшення потужності передавача, за рахунок збільшення кількості інформації в символі, ми отримуємо приріст енергії на 3 дБ. Робоча точка зміщується до позначки 10,9 дБ. Аналіз показує, що в цій точці P_b знижується до 10^{-6} . Таким чином, ми покращили надійність каналу в 10 разів, не витративши жодного додаткового Вата енергії.

3. **Другий етап маневру (Точка «2»):** Перехід до QAM-16 додає 6 дБ до базового рівня, досягаючи позначки 13,9 дБ. Це все ще дозволяє утримувати високу достовірність передачі (між 10^{-5} та 10^{-6}), одночасно збільшуючи швидкість передачі даних у 4 рази порівняно з BPSK.

4. **Межа ефективності (Точка «3»):** При подальшому переході до QAM-64 (зміщення на +7,8 дБ до 15,7 дБ) спостерігається деградація показників достовірності до рівня 10^{-3} – 10^{-4} . Це пояснюється тим, що при такій високій позиційності відстань між точками в сузір'ї стає критично малою, і навіть додаткова енергія символу не здатна компенсувати вплив шумів.

Дослідження доводить, що за рахунок інтелектуального вибору виду модуляції можна не лише нарощувати швидкість, а й суттєво «економити» потужність, досягаючи вищої якості зв'язку через той самий енергетичний ресурс. При цьому, якщо ми перейдемо до QAM-64 (15,7 дБ – точка «2»), то показник ймовірності бітової помилки коливатиметься між 10^{-3} та 10^{-4} , що означає, що закономірність виконується лише до певного моменту і важливо звертати увагу,

який показник співвідношення сигнал/шум береться, як вихідний. Чим більше значення співвідношення сигнал/шум береться на етапі використання модуляції BPSK, тим більше можливостей покращувати продуктивність, енергетику та завадостійкість за рахунок зміни модуляції.

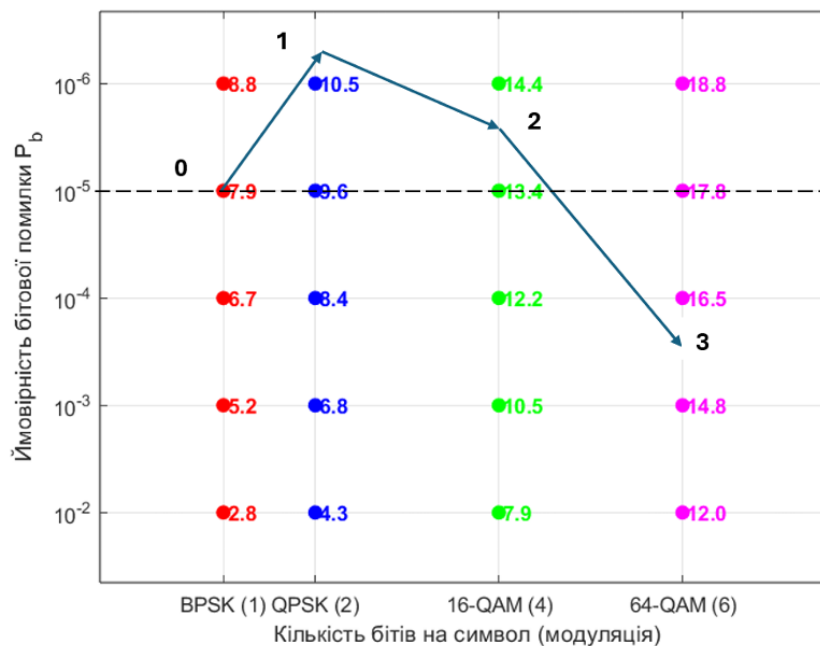


Рис. 1. Номограма залежності показнику сигнал/шум до значень ймовірності бітової помилки у каналі зв'язку зі змінною енергетикою

Таблиця 1

Зведені результати дослідження

| Точка на номограмі | Тип модуляції | SNR (дБ) | Енергія символу E_b/N_0 | Досягнута P_b (BER) |
|--------------------|---------------|----------|---------------------------|----------------------------|
| 0 | BPSK | 7,9 | h^2 | 10^{-5} |
| 1 | QPSK | 10,9 | $h^2 + 3$ дБ | 10^{-6} |
| 2 | QAM-16 | 13,9 | $h^2 + 6$ дБ | між 10^{-5} та 10^{-6} |
| 3 | QAM-64 | 15,7 | $h^2 + 7.8$ дБ | між 10^{-3} та 10^{-4} |

Висновки

1. В статті на основі поєднання відомих математичних моделей [1-3] та Дж. Прокіса [4] запропоновано прецизійний розрахунковий інструмент у вигляді номограми (рис.1). Вона дозволяє проводити миттєвий порівняльний аналіз енергетичної ефективності різних методів багатопозиційної маніпуляції в широкому діапазоні значень достовірності (від 10^{-2} до 10^{-6}).

2. Встановлено та експериментально підтверджено, що адаптивний вибір позиційності сигналу дозволяє реалізувати стратегію покращення завадостійкості без залучення додаткових енергетичних витрат. Фізичною основою цього явища є логарифмічне зростання енергетичної ваги символу при переході до вищих порядків модуляції.

3. Продемонстровано, що стратегічний «маневр» від BPSK до QPSK або QAM-16 при фіксованій потужності передавача забезпечує зниження ймовірності бітової помилки на один порядок (з 10^{-5} до 10^{-6}), що еквівалентно суттєвому підвищенню надійності каналу.

4. Отримані результати мають практичне значення для розробки алгоритмів адаптивної модуляції в сучасних бездротових мережах. Запропонований підхід дозволяє оптимізувати роботу систем зв'язку в умовах низької енергетики або жорстких обмежень на випромінювану потужність, що сприяє подовженню терміну експлуатації автономних пристроїв та зменшенню загального рівня інтерференції в ефірі.

Список використаної літератури:

1. Уривський Л.О., Шмігель Б.О. Оцінка ефективності використання ресурсів безпроводових каналів зв'язку. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Т. 33 (72), № 5. С. 27–32.
2. Cho K., Yoon D. On the general BER expression of one-dimensional constellations. *IEEE Trans. Comm.* 2022.
3. Nordholm S., Zepernick H.-J. *Modulation and Detection*. 2005.
4. Proakis J. G., Salehi M. *Digital Communications*. 5th ed. McGraw-Hill Education, 2008. 1150 p.

Автори статті

Уривський Леонід – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

ORCID: 0000-0003-3454-9543

Косогор Анастасія – студент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

ORCID: 0009-0002-9516-443X

Authors of the article

Uryvskiy Leonid – Doctor of Sciences (technical), Professor, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0003-3454-9543

Kosohor Anastasiia – student, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0009-0002-9516-443X

Надійшла до редакції: 25.04.2026

Прийнята до друку: 29.04.2026

Опубліковано: 25.05.2026

© 2026 Уривський Л.О., Косогор А.В.

Цей матеріал ліцензовано за умовами CC BY 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>