

УДК 621.391:004.056

**ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ КОДІВ BPSK31/63/125 ТА QPSK31/63/125 ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ БЕЗПЕКИ КАНАЛІВ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ У СКЛАДНИХ ЗАВАДОВИХ УМОВАХ**

Єфімов О. О., Древаль О. Д.

e-mail: [oleksii.yefimov@nure.ua](mailto:oleksii.yefimov@nure.ua), [oleksandr.dreval@nure.ua](mailto:oleksandr.dreval@nure.ua)

Науковий керівник – к.т.н., доц. Мартинчук О. О.

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

This paper evaluates BPSK and QPSK (31/63/125 baud) modes in RF channels under complex signal and interference conditions. The analysis covers spectral efficiency and interference immunity using forward error correction. QPSK convolutional coding is compared with BPSK performance under AWGN and multipath fading conditions. The results show that BPSK outperforms other codes in low signal-to-noise environments due to its narrow bandwidth, while QPSK offers bandwidth flexibility. Practical recommendations for parameter optimization ensure the integrity of the communication channel under signal degradation conditions.

У сучасних системах зв'язку особливої актуальності набувають низькошвидкісні цифрові режими передачі даних, які ефективно працюють в умовах обмеженого енергетичного бюджету та вузької смуги пропускання. Це характерно для каналів керування, збільшення дальності передачі каналів радіозв'язку, аварійних систем і аматорських цифрових режимів. Виникає інтерес щодо особливості використання кодів BPSK31/63/125 та QPSK31/63/125 та інших, більш складних, з більшою смугою СВЧ діапазону для покращення безпеки каналів телекомунікації у складних сигнальних та завадових умовах. Метою дослідження є порівняльний аналіз спектральних та енергетичних параметрів BPSK та QPSK для оптимізації їх вибору в умовах інтенсивних завад. Одним із найефективніших підходів у таких умовах є використання фазової маніпуляції з низькою швидкістю передачі символів, зокрема BPSK, що забезпечує надійний зв'язок навіть при низькому співвідношенні сигнал/шум [1].

Ширина займаної смуги сигналу безпосередньо залежить від швидкості передачі символів (Baud Rate) і для BPSK є приблизно пропорційною цій швидкості. Так, для BPSK31 смуга становить близько 31 Гц, для BPSK63 – близько 63 Гц, а для BPSK125 – близько 125 Гц. Зі збільшенням швидкості сигнал займає ширшу смугу частот, що може призводити до зростання міжканальних завад і зниження ефективності використання спектра у вузькосмугових системах. Саме тому BPSK є оптимальним для таких умов, оскільки дозволяє передавати інформацію в мінімальній смузі, зменшуючи вплив завад і покращуючи електромагнітну сумісність [1].

Важливу роль у підвищенні ефективності передачі відіграє кодування Varicode, яке використовує змінну довжину кодових комбінацій. Часто вживані символи кодуються коротшими послідовностями, а рідкісні – довгими. Це дозволяє зменшити середню швидкість передавання бітів і підвищити ефективність передачі тексту без збільшення смуги пропускання, що особливо важливо для низькошвидкісних режимів [2].

З енергетичної точки зору важливим параметром є щільність спектральної потужності (PSD – Power Spectral Density), яка визначає розподіл енергії сигналу в частотній області. При однаковій потужності передавача сигнал з меншою швидкістю передачі концентрує енергію у вузькій смузі частот. Це призводить до підвищення енергетичної щільності, покращення співвідношення сигнал/шум і, відповідно, більш надійного прийому. Саме тому BPSK31 здатен ефективніше працювати в умовах шумів порівняно з BPSK125, оскільки у випадку більшої швидкості енергія сигналу розподіляється на ширший частотний діапазон, що знижує її концентрацію і погіршує завадостійкість [1].

Ефективність функціонування цифрових видів зв'язку в СВЧ-діапазоні визначається не лише спектральними характеристиками сигналу, а й здатністю системи до відновлення цілісності даних у складних завадових умовах. Основними деструктивними факторами для протоколів PSK-сімейства є адитивний білий гауссів шум (AWGN), імпульсні завади (атмосферні розряди) та селективні фазові завмирання, викликані багатопроблемним поширенням сигналу.

Протоколи BPSK31/63/125 використовують двопозиційну фазову маніпуляцію. Завдяки максимальній Евклідовій відстані між символами у фазовому просторі (рознос у  $180^\circ$ ), BPSK демонструє високу стійкість до стаціонарного фоновому шуму [1]. Це дозволяє впевнено декодувати сигнал навіть тоді, коли його рівень лише незначно перевищує рівень шуму. Однак відсутність вбудованих механізмів виправлення помилок (FEC) робить цей протокол вразливим до імпульсних завад: будь-яке різке спотворення фази призводить до інверсії біта, що неможливо виправити на рівні протоколу.

У модах QPSK31/63/125 реалізовано стратегію алгоритмічного захисту даних. Використання чотирьох фазових станів дозволяє передавати два біти на символ, проте у радіоаматорських стандартах цей ресурс спрямовується на згорткове кодування [3]. Це створює конструкцію, де кожен інформаційний біт захищений додатковими перевірочними бітами. Процес декодування базується на алгоритмі Вітербі, який знаходить найбільш імовірну послідовність даних у решітці станів коду. Це забезпечує енергетичний виграш кодування, що дозволяє відновлювати текст навіть при короткочасних падіннях рівня сигналу нижче критичного порогу [3].

Попри переваги автоматичної корекції помилок, використання QPSK супроводжується певним "енергетичним штрафом". Оскільки кутова відстань між символами у QPSK вдвічі менша, ніж у BPSK, поріг стійкості до тремтіння фази суттєво знижується. Це висуває значно вищі вимоги до

стабільності частоти опорних генераторів трансивера та лінійності всього приймально-передавального тракту [1].

Використання 4QPSK на частоті 433 МГц забезпечує високу спектральну ефективність і хорошу завадостійкість [1] при обмеженій смузі пропускання, що дозволяє передавати більше даних, ніж BPSK при тій же ширині спектра. При спостереженні на «водопаді» (Waterfall) QPSK дає чіткі сліди сигналів, дозволяючи ефективно виділяти їх із шуму, хоча вимагає точної синхронізації фази порівняно з більш простими методами модуляції.

Основні переваги QPSK на 433 МГц: подвоєна швидкість передачі: Передає два біти на символ, подвоюючи швидкість порівняно з BPSK у тій самій смузі пропускання.

Перешкодостійкість: Має хорошу стійкість до завмирань і шумів, характерних для діапазону 433 МГц.

Ефективність спектра: Використовує смугу частот більш ефективно, ніж QAM-16 або QAM-64, що є важливим для вузькосмугових каналів зв'язку.

Візуалізація на водоспаді: при аналізі спектра (водоспад) сигнали QPSK виглядають як вузькі, чітко виражені смуги, що полегшує роботу в умовах сильних перешкод, якщо забезпечена коректна синхронізація.

Аналіз показує, що BPSK є оптимальним для спотворених каналів із критично низьким SNR за складних умов сигнальних та завадових обставин. Водночас у завадових умовах, характерних для низьких СВЧ діапазонів (інтенсивні QRN-завади), перевагу слід надавати QPSK. Алгоритмічна надлишковість останніх забезпечує вищу цілісність текстового потоку [3] ціною суворіших вимог до лінійності тракту та фазової стабільності системи, що зумовлено кутовим зближенням сигнальних точок та відповідним енергетичним штрафом при використанні чотирьохпозиційної маніпуляції.

#### Список використаних джерел:

1. Proakis J. G., Salehi M. Digital Communications. 5-те вид. McGraw-Hill, 2008. 1170 с.
2. Martinez P. PSK31: A new Radio-Teletype Mode. 1999. 7 с.
3. Sklar B., Ray P. K. Digital Communications: Fundamentals & Applications. 2-ге вид. Pearson Education India, 2009. 1164 с.