

ДУДАР ОЛЕКСАНДР

Хмельницький національний університет

МІШАН ВІКТОР

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-2771-7285>e-mail: [v\\_mishan@ukr.net](mailto:v_mishan@ukr.net)

ГОРЯЩЕНКО КОСТЯНТИН

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-7034-8702>e-mail: [kostyakst@ukr.net](mailto:kostyakst@ukr.net)

## МОДЕЛЮВАННЯ СИГНАЛІВ QPSK В СЕРЕДОВИЩІ SIMULINK

У цій статті представлено огляд методів маніпуляції сигналами, таких як ієрархічна квадратурна амплітудна модуляція, кругова квадратурна амплітудна модуляція та параметрична квадратурна амплітудна модуляція. Вищезазначені типи модуляції та квадратурна амплітудна модуляція моделюються за допомогою середовища математичного моделювання MATLAB.

Для порівняння типів модуляції використано два порядки модуляції - 16 і 64; для оцінки ефективності використаного того чи іншого типу модуляції змодельовано канал зв'язку.

Ключові слова: модуляція, квадратурна амплітудна модуляція, ієрархічна квадратурна амплітудна модуляція.

DUDAR OLEXANDER, MISHAN VICTOR, HORIASHCHENKO KOSTYANTYN

Khmelnitsky National University

## MODELING QPSK SIGNALS IN SIMULINK ENVIRONMENT

This article provides an overview of signal manipulation techniques such as hierarchical quadrature pulse width modulation, circular quadrature pulse width modulation, and parametric quadrature pulse width modulation. Communication systems can efficiently transmit information in analog and digital form and, depending on the requirements for signal characteristics, can perform the appropriate type of modulation or manipulation required in a particular case. The above-mentioned types of modulation and quadrature amplitude modulation are modeled using the MATLAB mathematical modeling environment.

Parametric quadrature amplitude modulation, as well as hierarchical modulation, is built on the basis of the QAM constellation. However, its feature is that the distance between any points is the same and is set equal to 1.15. This value is chosen so that the areas of the signal constellations of certain modulation levels are approximately equal. In the experiment, the location of the points on the signal constellation is not based on a square, as in QAM, but an equilateral triangle.

A model is presented for modulating and demodulating signals using various coding methods used in modern communication systems. Such types of signal modulation are binary phase-shift keying (BPSK), quadrature phase-shift keying (QPSK), and quadrature amplitude modulation (MQAM). Based on these modulation schemes, advanced signal transmission schemes have been developed, such as HQAM (hierarchical QAM), CQAM (circular QAM), and  $\theta$ QAM (parametric quadrature amplitude modulation).

To compare the modulation types, two modulation orders are used - 16 and 64; to evaluate the effectiveness of using a particular type of modulation, a communication channel is modeled, as well as to estimate the level of BER dependence on SNR for CQAM, PQAM, HQAM, and QAM.

Keywords: modulation, quadrature amplitude modulation, hierarchical quadrature amplitude modulation.

### Основна частина

Бездротова технологія широко використовується з кінця 19-го століття і продовжує використовуватися і сьогодні. Якщо провідні системи часто вимагають розгортання дорогих кабелів, планування приміщень щодо їх розташування в них, а також проектування передачі сигналу на великі відстані з використанням не лише кабелів, але й їхніх відгалужень, то безпроводні технології передають інформацію за допомогою радіохвиль, які використовують навколишній простір як канал зв'язку. Це значно полегшує вирішення проблеми проникнення в навколишній простір, що є її найбільшою перевагою.

Сучасне суспільство немислиме без систем зв'язку, а системи зв'язку стали невід'ємною частиною людської взаємодії. Системи зв'язку можуть ефективно передавати інформацію в аналоговій та цифровій формі і, в залежності від вимог до характеристик сигналу, можуть виконувати відповідний тип модуляції або маніпуляції, необхідний в конкретному випадку.

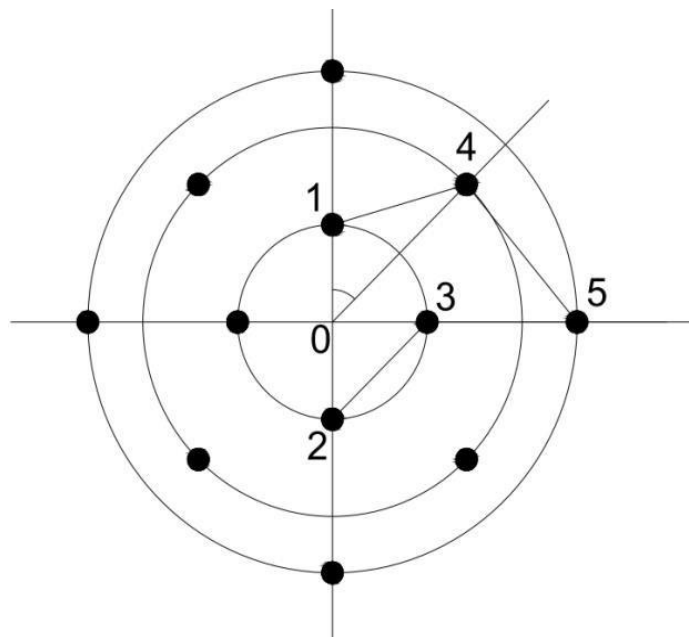
В останні роки сигнали в цифровій формі набувають все більшого поширення через їх необмежені можливості обробки сигналів, вищу завадостійкість, краще використання спектру, більші відстані передачі, енергоефективність при передачі, можливість кодування інформації, а також надійне і довготривале зберігання, порівняно з аналоговими сигналами. Це пов'язано з багатьма перевагами цифрового зв'язку. Оскільки цифрову інформацію можна розбити на кадри, пакети і сегменти, кожному пакету можна надати власну адресу, представлену у вигляді цифрового коду, і всі ці пакети можна маршрутизувати по-різному в залежності від поточного завантаження каналу (завдяки цьому, Інтернет, IP-телефонія, створення віртуального каналу між двома або більше користувачами).

Сучасні методи модуляції використовуються в різних системах стільникового зв'язку, супутникових

системах, бездротових локальних мережах і телевізійних стандартах. Крім цього, схеми високорівневої модуляції також широко використовуються при розробці стандартів Wi-Fi. Основними застосуваннями в сучасних системах зв'язку є модуляція сигналів, такі як бінарна фазова маніпуляція (BPSK), квадратурна фазова маніпуляція (QPSK) і квадратурна амплітудна модуляція (M-QAM). На основі цих схем модуляції були розроблені вдосконалені схеми передачі сигналів, такі як HQAM (ієрархічна QAM), CQAM (кругова QAM) і  $\theta$ -QAM (параметрична квадратурна амплітудна модуляція).

#### Кругова квадратурна амплітудна модуляція квадратури

Ієрархічна квадратурна амплітудна модуляція створюється на основі звичайної QAM. Особливість полягає в розташуванні точок на сузір'ї поруч з умовними осями фази і квадратури. Кругова квадратурна амплітудна модуляція має особливості під час побудови. Для початку будується базове сузір'я QPSK, яке розташовується на першому колі, радіус якого дорівнює 1. Воно має розташування на осях, а не між ними у квадрантах. Наступні чотири точки другого кола зсунуті щодо точок першого на 45 градусів. У першому колі мінімальна відстань між точками (між точками 2 і 3) дорівнює 1.41 (рис. 1). Ця ж величина задається як мінімальна відстань між точками першого і другого кола (відстань між точками 1 і 4). Для того, щоб знайти відстань між початком координат і точкою 4, необхідно скористатися теоремою косинусів.



Рисуюнок 1 – Визначення розташування точок на сигнальному сузір'ї для CQAM

Для знаходження точок третього кола необхідно скористатися двома допоміжними колами, центрами яких є будь-які дві точки першого кола. Точки третього кола розташовуються також на координатних осях фази і квадратури, що й точки першого кола. На перетині допоміжних кіл і осей координат розташовуватимуться точки третього кола. У підсумку виходить, що відстань між другим колом і третім менша, ніж між першим і другим, і мінімальна відстань між точками другого кола і третього дорівнює 1.72. Четверте коло віддалене від третього на таку саму відстань, що й друге від першого. Наступні кола за вищого рівня модуляції матимуть рівні відстані між собою: відстань між першою окружністю і другою дорівнює відстані між другою і третьою та дорівнює відстані між третьою і четвертою і т. д.

#### Параметрична квадратурна амплітудна модуляція з квадратурою

Параметрична квадратурна амплітудна модуляція так само, як і ієрархічна, будується на основі сузір'я QAM. Однак її особливість полягає в тому, що відстань між будь-якими точками однакова і задається рівною 1.15. Таке значення вибирають із тією метою, щоб площі сигнальних сузір'їв певних рівнів модуляції були приблизно рівними. В експерименті за основу розташування точок на сигнальному сузір'ї береться не квадрат, як у QAM, а рівносторонній трикутник.

#### Структура моделі та опрацювання результатів моделювання QPSK сигналів

За допомогою програмної мови MATLAB формується модель, структурну схему якої наведено на рис. 2.

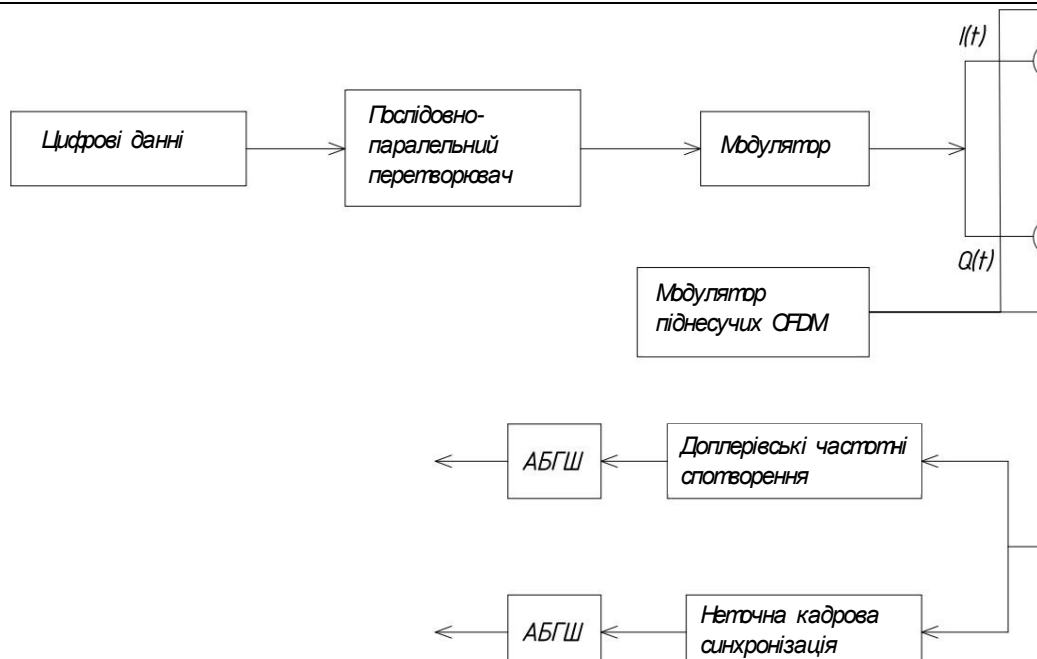


Рисунок 2 – Структура моделі для модуляції сигналу

Нижче подано опис схеми на рис. 2.

*Формування двійкової послідовності для передачі.*

На цьому етапі формується випадкова двійкова послідовність, причому довжина задається рівною 300 000 символів.

*Перетворення двійкової послідовності у вигляд, придатний для використання піднесучих OFDM.*

Вихідний сигнал необхідно розподілити між піднесучими OFDM за допомогою послідовно-паралельного перетворювача. Крім цього, двійковий сигнал перетворюється в десятковий для простоти роботи в MATLAB.

*Формування піднесучих OFDM.*

У межах моделювання перелічені вище види маніпуляції використовуватимуть для модуляції піднесучих OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) у кількості 800 штук із такими параметрами:

- центральна частота: 14 кГц;
- смуга частот для всіх піднесучих: 8 кГц;
- захисний частотний інтервал: 10 Гц, причому  $T_s = 0.1$  с;
- частота дискретизації сигналу: 192 кГц;
- спектр сигналу: 10-18 кГц.

*Квадратурна модуляція піднесучих.*

Кожна піднесуча модулюється за звичайною схемою модуляції (квадратурна амплітудна модуляція) на низькій символній швидкості, зберігаючи загальну швидкість передавання даних, як і в звичайних схем модуляції однієї несучої в тій самій смузі пропускання. На практиці сигнали OFDM отримують застосуванням зворотного БПФ (швидке перетворення Фур'є).

*Формування сигналу OFDM.*

OFDM-сигнал формується  $N$  гармонійними піднесучими, які рознесені за частотою на рівні інтервали  $\Delta f$  (еквідистантне розміщення піднесучих). За такого розміщення частот повна смуга частот  $\Delta F$ , яку займає OFDM-сигнал, ділиться на  $N$  підканалів, ширина яких  $\Delta f = 1/T_s$ , де  $T_s$  - тривалість сигнальної вибірки, над якою виконується операція БПФ (символьний інтервал).

а) Створення доплерівських частотних спотворень.

У реальному каналі можливий випадок, коли приймач і/або передавач перебуває в русі, тому необхідно розглянути вплив ефекту Доплера.

Код для додавання доплерівських частотних спотворень доступний за посиланням [11].

б) Моделювання неточної кадрової синхронізації.

Кадрова (групова) синхронізація необхідна в системах передавання інформації з частим ущільненням каналів, вона відповідає за коректне визначення початку прийнятого OFDM-символу. За її відсутності відбувається втрата частини інформації, що передається в кадрі, на початку або наприкінці сигналу. Код для додавання неточної кадрової синхронізації доступний за посиланням [12].

*Моделювання АБГШ.*

Останнім етапом формування підсумкового промодульованого сигналу є додавання до нього АБГШ, причому відбувається це окремо для сигналу, схильного до доплерівського спотворення, і для сигналу, схильного до неточної кадрової синхронізації.

*Квадратурна демодуляція.*

Цей етап передбачає проведення демодуляції промодульованого раніше сигналу.

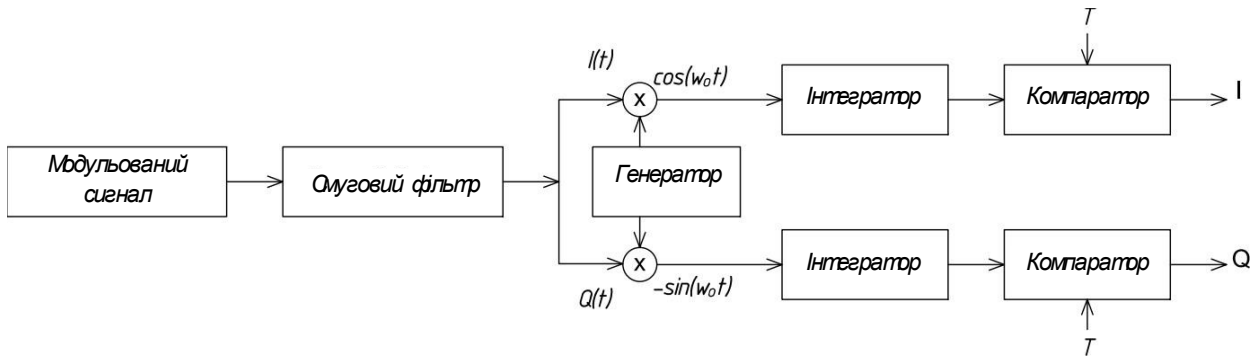


Рисунок 3 – Структура моделі для демодуляції сигналу

Моделювання та опрацювання результатів

Для трьох розглянутих видів маніпуляції будуються залежності BER від SNR (рис. 4), причому порівнюватимуться між собою маніпуляції одного рівня.

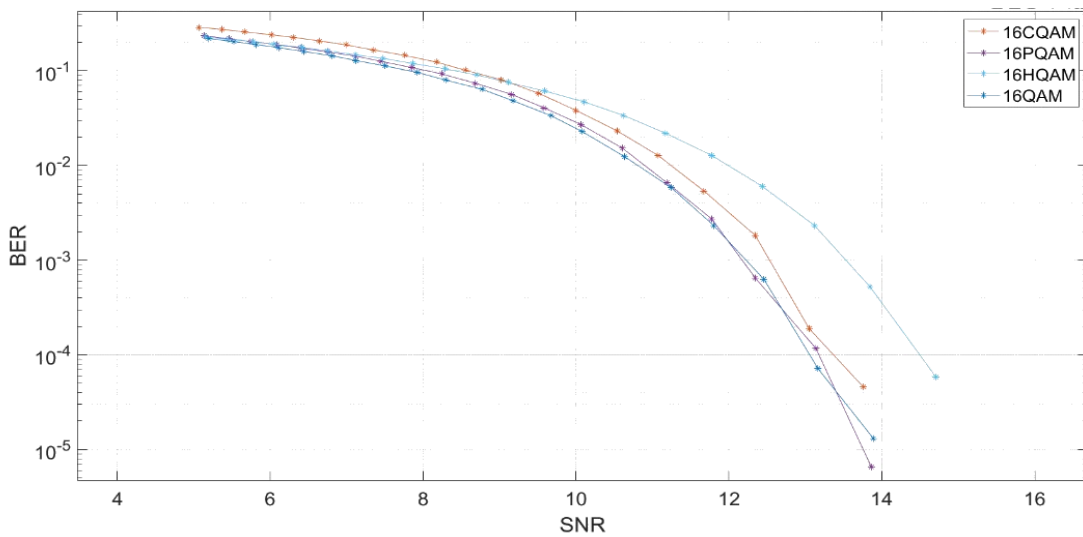


Рисунок 4 – Залежність BER від SNR для маніпуляцій 16 CQAM, 16 PQAM, 16 HQAM і 16 QAM

З рис. 9 видно, що за однакового значення SNR, наприклад, 12 дБ, ієрархічна модуляція показує найгірший показник BER ( $10^{-2}$ ), тоді як 16 CQAM має  $10^{-2.5}$ . Причому для 16 QAM і 16 PQAM показники практично однакові й дорівнюють майже  $10^{-3}$ .

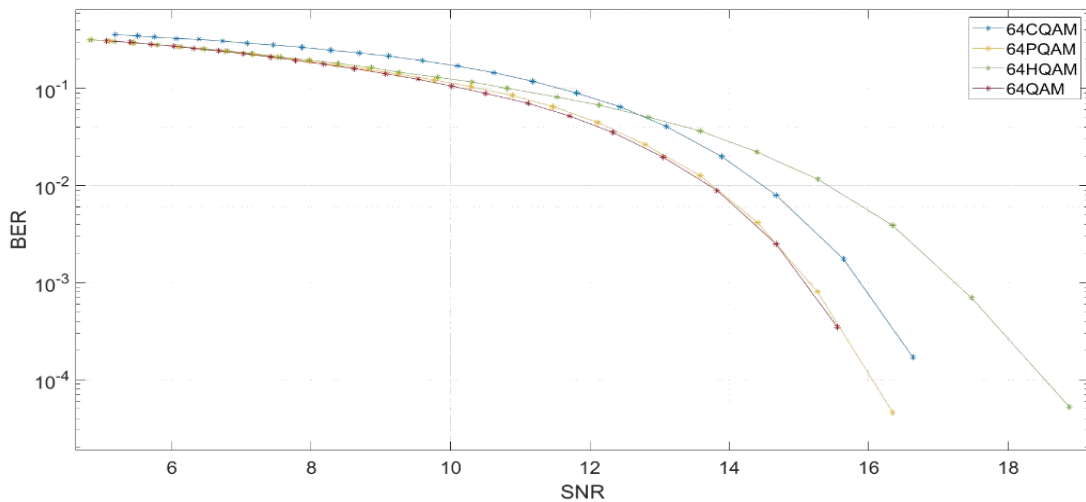


Рисунок 5 – Залежність BER від SNR для маніпуляцій 64 CQAM, 64 PQAM, 64 HQAM і 64 QAM

Аналізуючи рис. 10, можна сказати, що тенденція розташування кривих на графіку залежності BER від SNR зберігається. За SNR, що дорівнює 14 дБ, значення BER для 64 QAM і 64

PQAM схожі та рівні приблизно  $10^{-2}$ .

За SNR, що дорівнює 12.7 дБ, маніпуляція 64 CQAM починає давати кращий показник BER порівняно з 64 HQAM. Також після значення SNR, що дорівнює 12.7 дБ, ієрархічна модуляція дає найгірший з усіх показник BER.

Також будуються графіки залежності BER від SNR для CQAM, PQAM, HQAM і QAM за доплерівських спотворень, де розглядаються 16-рівневі та 64-рівневі маніпуляції (рис. 6, 7).

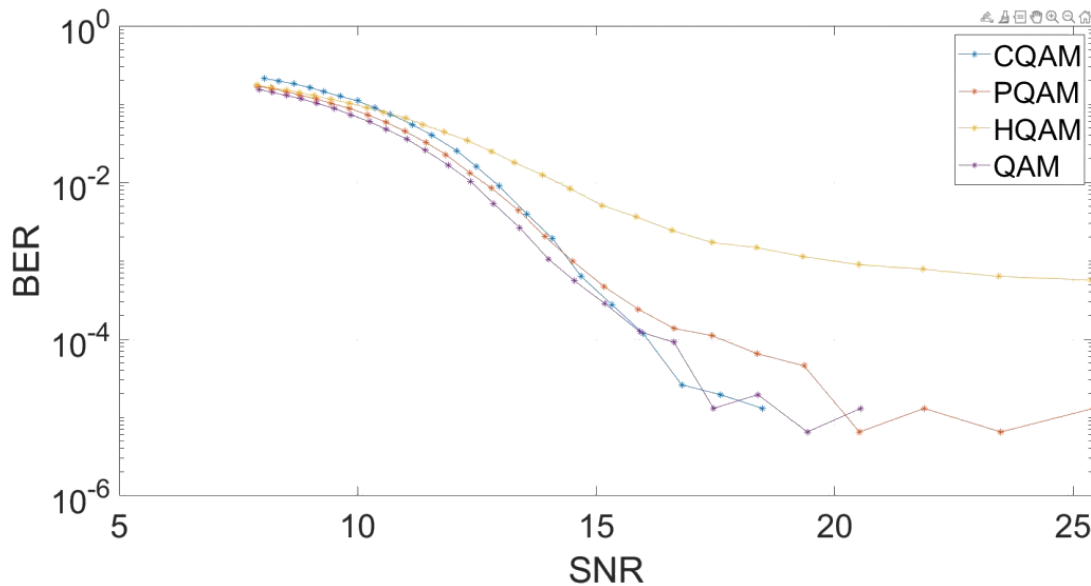


Рисунок 6 – Залежність BER від SNR для маніпуляцій 16 CQAM, 16 PQAM, 16 HQAM і 16 QAM за доплерівських спотворень

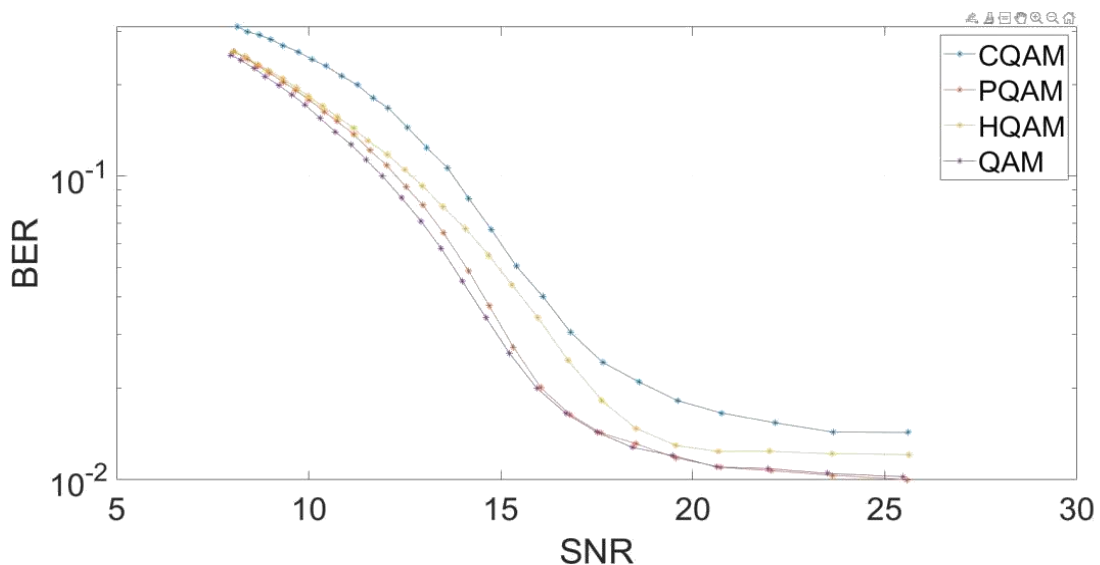


Рисунок 7 – Залежність BER від SNR для маніпуляцій 64 CQAM, 64 PQAM, 64 HQAM і 64 QAM за доплерівських спотворень

З рис. 7 видно, що при значенні SNR, що дорівнює 15 дБ, криві залежності для 16 CQAM, 16 PQAM і 16 QAM перестають носити лінійний характер і мають BER, що дорівнює приблизно  $10^{-3}$ . Крім цього, після значення SNR, що дорівнює 15 дБ, ці три види маніпуляції дають найкращі показники BER серед усіх результатів. Також за графіком видно, що 16 HQAM погано справляється з доплерівськими спотвореннями і для цього випадку знадобляться методи фазо-частинчастотної корекції.

Криві, представлені на рис. 12, показують, що 64-позиційні види маніпуляцій дають більші результати за значеннями BER ( $10^{-2}$ ) аж до SNR, що дорівнює 25 дБ, за наявності доплерівських спотворень. У цьому разі також знадобляться методи фазо-частотної корекції.

Наявність таких результатів говорить про вразливість промодульованого OFDM-сигналу до ефекту Доплера.

Крім цього, будуються графіки залежності BER від SNR для CQAM, PQAM, HQAM і QAM за неточної кадрової синхронізації, де розглядаються 16-рівневі і 64-рівневі маніпуляції (рис. 8,9).

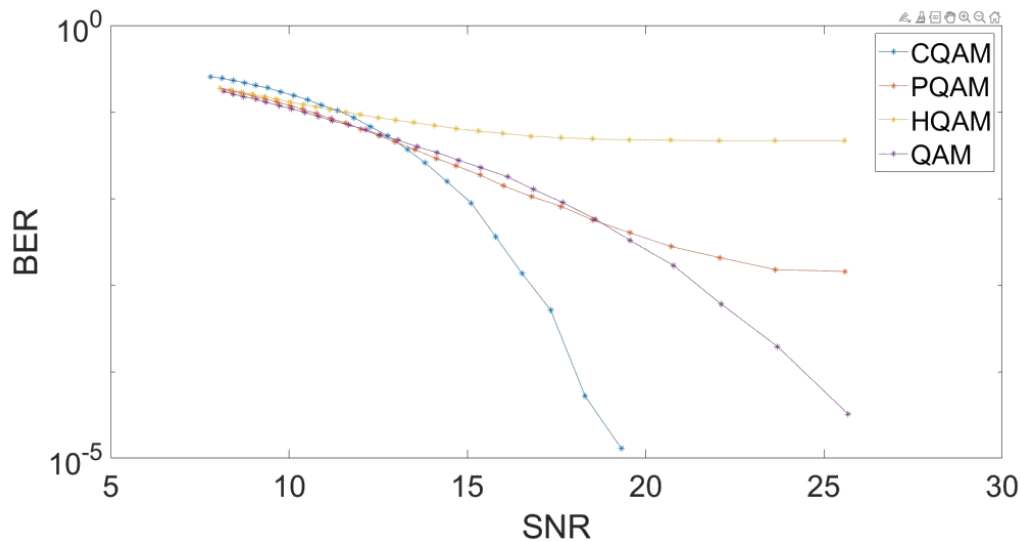


Рисунок 8 – Залежність BER від SNR для маніпуляцій 16 CQAM, 16 PQAM, 16 HQAM і 16 QAM за неточної кадрової синхронізації

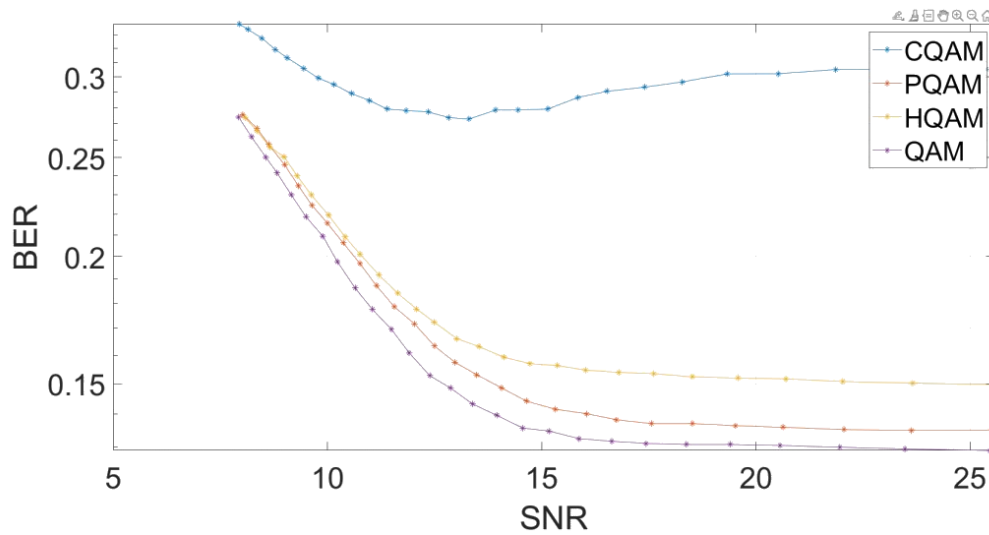


Рисунок 9 – Залежність BER від SNR для маніпуляцій 64 CQAM, 64 PQAM, 64 HQAM і 64 QAM за неточної кадрової синхронізації

### Література

1. Лузин В. И., Никитин Н. П., Гадзиковский В. И. Основы формирования, передачи и приема цифровой информации: учебное пособие. М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2014. 316 с.
2. Foschini G., Gitlin R., Weinstein S. Optimization of twodimensional signal constellations in the presence of gaussian noise. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1092061>.
3. Вонтергем Дж.В., Бутрос Дж.Дж., Моенеклей М. Построение круговых квадратурных амплитудных модуляций (CQAM). URL: <https://biblio.ugent.be/publication/8604053/file/8604054.pdf>

### References

1. Luzin, V.I., Nikitin N.P., Gadzikovsky V.I. Osnovy formirovaniya, peredachi i priyema tsifrovoy informatsii [Fundamentals of the formation, transmission, and reception of digital information]. Moscow: SOLON-PRESS, 2014. 316 p.
2. Foschini G., Gitlin R., Weinstein S. Optimization of twodimensional signal constellations in the presence of gaussian noise. IEEE Trans. Commun., vol. 22, Jan. 1974, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1092061>.
3. Wontergem J.V., Boutros J. J., Moeneclaey M. Construction of Circular Quadrature Amplitude Modulations (CQAM). IEEE International Conference on the Science of Electrical Engineering in Israel (ICSEE), 2018, available at: <https://biblio.ugent.be/publication/8604053/file/8604054.pdf>.