

ДОСЛІДЖЕННЯ СИГНАЛІВ З БАГАТОПОЗИЦІЙНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ

Стаття присвячена дослідженню спектральної і енергетичної ефективності багатопозиційних видів модуляції. Розглянута система зв'язку з модуляцією M-PSK, M-QAM. Наведені структурні схеми модулятора і демодулятора, досліджені залежності ймовірності помилки на біт від відношення E_b/N_0 для різної кількості точок в сигнальному сузір'ї. Показано, що зі збільшенням позиційності модуляції, ймовірність бітової помилки збільшується. При збільшенні спектральної ефективності енергетична ефективність зменшується. Модуляція M-QAM перевершує по ефективності M-PSK. Канальне кодування істотно знижує ймовірність помилки на біт в порівнянні з некодованою системою при однаковому відношенні E_b/N_0 . При використанні завадостійких кодів сигнал стає менше чутливим до шумів, завад, завмирань.

Ключові слова: цифрова модуляція, квадратурна амплітудна маніпуляція, фазова маніпуляція.

RESEARCH OF SIGNALS WITH M-ARRAY DIGITAL MODULATION

The article is devoted to the investigation of spectral and energy efficiency of M-array digital modulation. The connection system with modulation M-PSK, M-QAM is considered. Structural diagrams of the modulator and demodulator are presented, the dependence of the error probability on bit on the ratio E_b/N_0 for different number of points in the signal constellation is investigated. With the increase in the positioning of the modulation, the probability of a bit error increases. With increasing spectral efficiency, energy efficiency decreases. Increasing the modulation positions (levels) increases the spectral efficiency in times. Modulation M-QAM exceeds the efficiency of M-PSK. The energy gain of the M-QAM increases with increasing M. For example, for $M = 16$, the gain is about 4 dB, with $M = 64$ about 10 dB, and at $M = 256$, about 17 dB. This is due to the fact that the distance between the neighboring points in the signal constellation M-PSK is less than that of the M-QAM. The distance between the 16-QAM modulation signal consonant points is 1.62 times that of the 16-PSK modulation. The advantage of high QAM numbers is the increased data rate, since in this way more bits of information can be transmitted in one cycle. Another advantage is modulation with lattice encoding (TCM), optimization of the shape of signal constellations and the use of multidimensional signal constellations. Channel coding significantly reduces the probability of a bit error compared to a non-coding system with the same E_b / N_0 ratio. That is, coding provides energy gain. Channel encoding improves communication quality. When using noise immunity codes, the signal becomes less sensitive to noise, interference, fade. The introduction of convolutional coding gives an energy gain of 7 dB for $BER = 10^{-4}$.

Keywords: M-array digital modulation, M-QAM, M-PSK

Постановка задачі. Система зв'язку призначається для передачі повідомлень. Повідомленням називають електричний струм або напругу на виході будь-якого перетворювача (наприклад, напруга на виході мікрофона). Процес передачі повідомлень розбивається на три основних етапи (рис. 1): перетворення повідомлення в сигнал; передача сигналу по лінії зв'язку; перетворення отриманого сигналу в повідомлення.



Рис. 1. Структурна схема системи передачі сигналів електрозв'язку

Повідомлення $s(t)$ перетворюється передавачем в сигнал $u_s(t)$, найбільш зручний для даної лінії передачі. Цей процес називають модуляцією. Модулюючий сигнал (повідомлення) змінює один з параметрів (амплітуду, частоту, фазу) високочастотного коливання. Високочастотний сигнал підсилюється, фільтрується в передавачі і надходить у лінію зв'язку [1-3].

Лінією зв'язку називається середовище поширення сигналу від передавача до приймача. При проходженні сигналу лінією зв'язку, він піддається дії завад і шумів, що призводить до спотворення сигналу. Спотворення сигналу на вході приймача обумовлені в основному наступними чинниками:

- різними випадковими змінами параметрів каналу передачі;
- дією зовнішніх завад – атмосферних, індустриальних, космічних, завад від інших радіостанцій;

- наявністю власного шуму приймального пристрою.

У приймачі повідомлення відновлюється за прийнятим сигналом $u_s^*(t)$ і передається одержувачу.

Цифрові методи передачі більш ефективні в умовах сильних завад і забезпечують більш раціональне використання радіочастотного ресурсу. Переваги цифрової реалізації обумовлені також тим, що цифрова техніка переживає швидкі темпи поліпшення характеристик, істотне зниження вартості і споживаної потужності. Основними критеріями ефективності різних видів модуляції є критерії спектральної і енергетичної ефективності. Енергетична ефективність характеризує енергію, яку необхідно затратити для передачі інформації із заданою вірогідністю (ймовірністю помилки). Спектральна ефективність характеризує смугу частот, необхідну для того, щоб передавати інформацію з певною швидкістю. Крім цих критеріїв, види модуляції порівнюються за стійкістю до різних типів завад і спотворень і складності апаратної реалізації.

Практично у всіх системах зв'язку використовуються фільтри, що обмежують спектр сигналу. Для фазових та амплітудно-фазових видів модуляції найчастіше використовується фільтр з характеристикою піднесеного косинуса, для частотних – гаусовий фільтр. Таким чином, спектральна ефективність для фазових та амплітудно-фазових видів модуляції однакова і визначається смугою фільтра. Збільшення позицій (рівнів) модуляції (модуляції M-PSK, M-QAM) збільшує спектральну ефективність у $k = \log_2 M$ разів. Найбільшою спектральною ефективністю серед частотних видів модуляції має модуляція MSK. Під енергетичним вирашем розуміють різницю в значенні E_b/N_0 при однаковому значенні ймовірності помилки на біт.

Аналіз досліджень та публікацій. У цифровому зв'язку методи модуляції відіграють дуже значну роль. Крім своєї основної функції – перетворення повідомлення у радіосигнал – процес модуляції є складовою частиною загального процесу узгодження сигналу з характеристиками каналу. Сучасні методи багатопозиційної модуляції у відповідності з теоремою Шеннона можуть розглядатися як спосіб кодування даних повідомлень в символи каналу.

Сучасні модулятори для цифрових систем передачі будуються за квадратурною схемою. В такому модуляторі вихідний сигнал утворюється підсумовуванням двох різних модульованих сигналів, несучі частоти яких мають між собою фазовий зсув 90° .

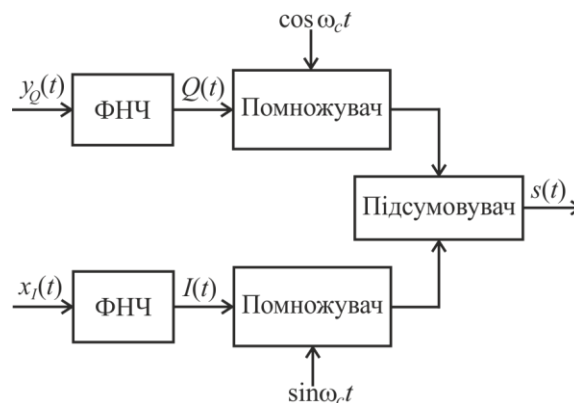


Рис. 2. Квадратурний модулятор

Квадратурний модулятор є універсальним пристроєм, який може бути використаний для отримання сигналу з лінійно-модульованою несучою і двома бічними смугами. Структурна схема квадратурного модулятора показана на рис. 2.

Основу модулятора складають два балансних модулятора і суматор ВЧ сигналів, на виході якого утворюється квадратурного-модульований сигнал $s(t)$. Несучі, що надходять на опорні входи балансних модуляторів, мають взаємний фазовий зсув 90° , тобто знаходяться в квадратурі.

Вхідні модулюючі сигнали $x_I(t)$ і $x_Q(t)$ (синфазної і квадратурної складових) є квантованими за рівнем і дискретними в часі. Отримання різних видів модуляції за допомогою квадратурного модулятора забезпечується подачею на його входи біполярних АІМ сигналів $x_I(t)$ і $x_Q(t)$ (синфазної і квадратурної складових), квантованих на різне число рівнів і симетричних відносно нуля.

Завдання узгодження модульованого сигналу з радіоканалом вирішується шляхом оптимізації форми і числа точок двовимірного сигнального сузір'я. Сигнал QAM, що переносить n біт/символ, тобто має $2n$ точок сигнального сузір'я, має наступну властивість. Якщо n ціле парне число, то сигнальне сузір'я має квадратну форму, а точки сузір'я мають координати у вигляді непарних чисел. Якщо число n непарне, то сузір'я має хрестоподібну форму при розташуванні точок у вузлах тієї ж прямокутної координатної сітки, що і для парного n . Мінімальна відносна відстань між будь-якими двома точками сузір'я дорівнює 2. При

збільшенні порядку сузір'я (числа біт на символ) на одиницю необхідно збільшувати потужність передавача на 3 dB.

Мета статті полягає у дослідженні ефективності багатопозиційних видів модуляції. **Квадратурна амплітудна модуляція.** Вимоги до точності характеристик формуючих смугових фільтрів тим вище, чим більше число позицій в модульованому сигналі. Сигнали квадратурної амплітудної модуляції M-QAM широко використовуються для передачі сигналів кольору в телебаченні, в стереофонічному радіомовленні, в системах програмно-керованого радіо. Структурна схема модулятора 16-QAM показана на рис. 3.

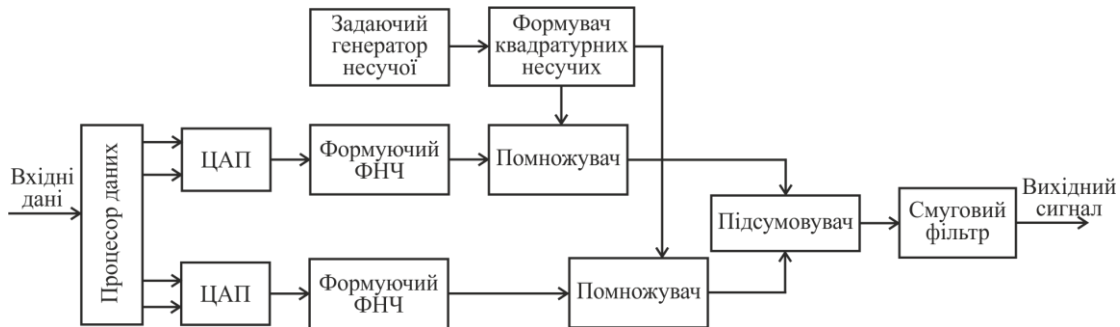


Рис. 3. Структурна схема модулятора 16-QAM

Вхідний потік даних спочатку піддається необхідній цифровій обробці в процесорі даних: виділення тактової частоти, диференційному кодуванню, послідовно-паралельному перетворенню. Оскільки модуляція 16-QAM забезпечує швидкість передачі 4 біт/(с·Гц), то для подальшої модуляції потік даних в ході його цифрової обробки розділяється на 4 підпотіки з відповідно зниженими швидкостями. Далі відбувається цифро-аналогове перетворення двох двійкових підпотіків в один чотирирівневий з одночасним формуванням їх спектру. Чотирирівневі сигнали в каналах I і Q керують роботою балансних модуляторів, вихідні сигнали яких складаються, утворюючи сигнал 16-QAM з двома смугами і пригніченою несучою. На балансні модулятори несуча надходить з зсувом $\pi/2$, тобто в квадратурі. Вихідний сигнал модулятора на проміжній частоті несучої проходить через смуговий фільтр, що обмежує позасмугові випромінювання, і може бути конвертований в смугу будь-якого мовного каналу. Часова діаграма і спектр сигналу 16-QAM наведена на рис. 4 і рис. 5.



Рис. 4. Часова діаграма сигналу 16-QAM

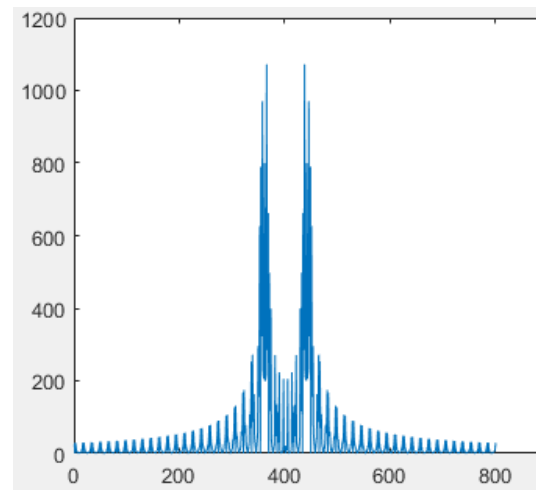


Рис. 5. Спектр сигналу 16-QAM

Часові діаграми синфазної і квадратурної складових сигналу 16-QAM наведені на рис. 6 і рис. 7.

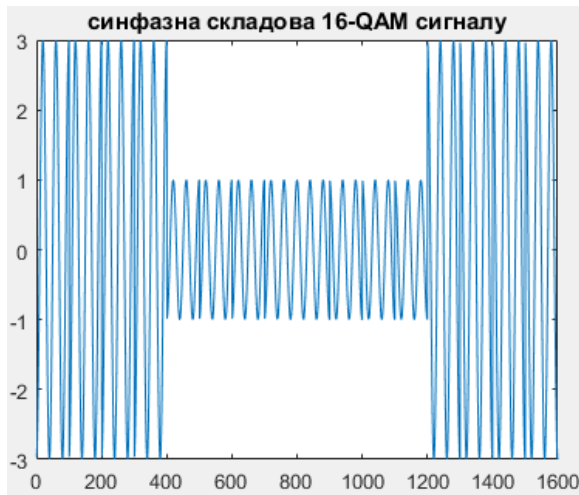


Рис. 6. Часові діаграми синфазної складової сигналу 16-QAM



Рис. 7. Часові діаграми квадратурної складової сигналу 16-QAM

Структурна схема демодулятора 16-QAM показана на рис. 8.

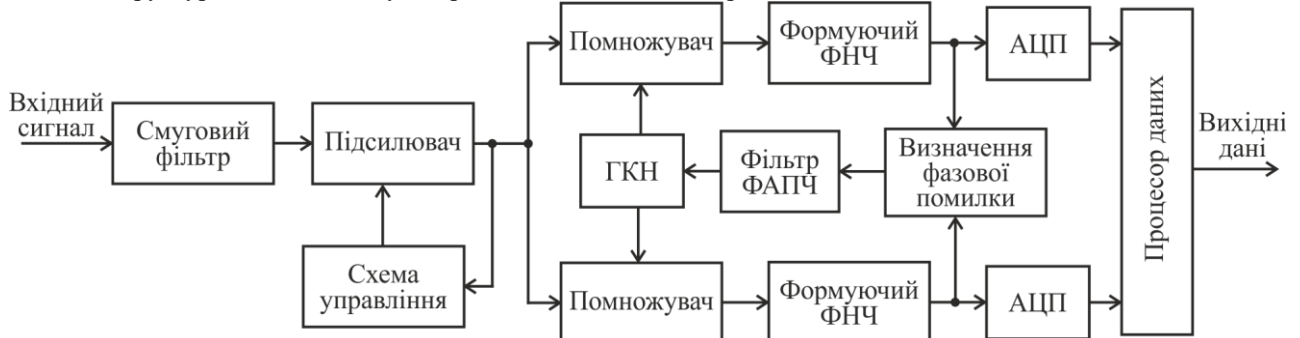


Рис. 8. Структурна схема демодулятора 16-QAM

У демодуляторі є аналогічна пара балансних модуляторів і блоки зворотного перетворення з чотирирівневих у двійкові сигнали з наступною обробкою даних. Принципово складними вузлами є схеми відновлення несучої частоти і тактової синхронізації. Обидві ці операції виконуються на основі аналізу структури сигналу у синфазному і квадратурному каналах. Формуючі ФНЧ на виходах балансних модуляторів доводять спектр сигналу до необхідного за Найквистом і ослаблюють шуми і завади.

Сигнальне сузір'я модуляції 16-QAM складається з квадратної решітки сигнальних точок. Загальний вираз M-арного сигналу може бути представлений у вигляді:

$$S_i(t) = \sqrt{\frac{2E_{min}}{T_s}} a_i \cos(2\pi f_0 t) + \sqrt{\frac{2E_{min}}{T_s}} b_i \sin(2\pi f_0 t), \quad 0 \leq t \leq T_s, \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad (1)$$

де E_{min} – енергія сигналу з найменшою амплітудою; a_i і b_i – пара незалежних цілих чисел, що обираються у відповідності з розташуванням конкретної точки сигналу на діаграмі; T_s – період символу.

Якщо сигнал має форму прямокутних імпульсів, то $S(t)$ можна представити за допомогою базисних функцій у відповідності з виразами:

$$\varphi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos(2\pi f_0 t), \quad 0 \leq t \leq T_s \quad (2)$$

$$\varphi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \sin(2\pi f_0 t), \quad 0 \leq t \leq T_s \quad (3)$$

Координати i -х точок повідомлення $a_i \sqrt{E_{min}}$ і $b_i \sqrt{E_{min}}$ з координатами (a_i, b_i) – елементами матриці

$$[(a_i, b_i)] = \begin{bmatrix} (-L+1, L-1) & (-L+3, L-1) & \dots & (-L-1, L-1) \\ (-L+1, L-3) & (-L+3, L-3) & \dots & (-L-1, L-3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (-L+1, -L+1) & (-L+3, -L+1) & \dots & (-L-1, -L+1) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Середня ймовірність помилки в каналі з адитивним білим гаусовим шумом (AWGN) для M-арної QAM, з використанням когерентного виявлення визначається виразом:

$$P_e = 4 \left(1 - \frac{1}{M}\right) Q \left(\sqrt{\frac{2E_b}{(M-1)N_0}} \right) \quad (5)$$

де E_b / N_0 – відношення енергії біта до спектральної густини потужності шуму.

Сигнальні сузір'я модуляції 16-QAM і 16-PSK приведені на рис. 9 і рис. 10

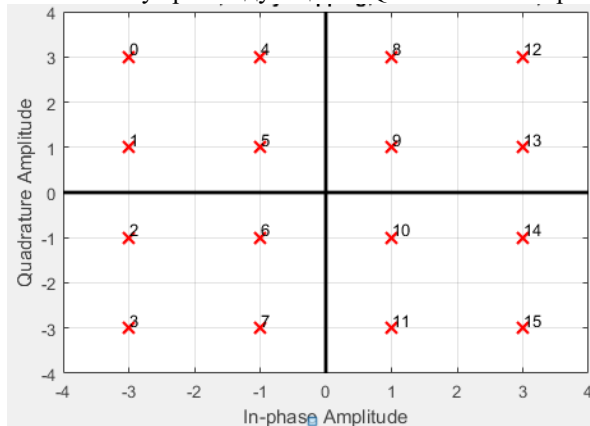


Рис. 9. Сигнальне сузір'я модуляції 16-QAM

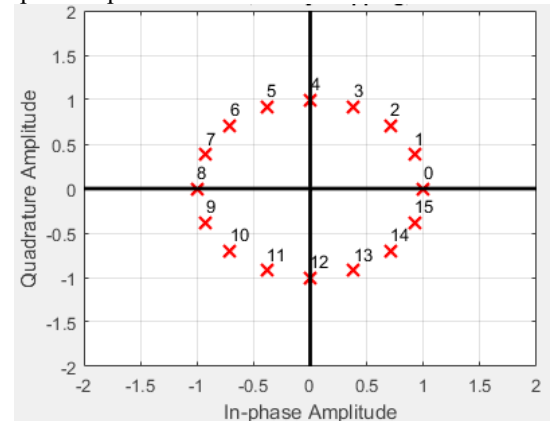


Рис. 10. Сигнальне сузір'я модуляції 16-PSK

Згідно з виразом (4), діаграма сузір'я модуляції 16-QAM задається виразом $[-3 + 3 * i - 1 + 3 * i + 3 * i + 3 * i - 3 + 1 * i - 1 + 1 * i + 1 * i + 1 * i + 3 + 1 * i - 3 - 1 * i - 1 - 1 * i - 1 * i + 3 - 1 * i - 3 - 3 * i - 1 - 3 * i + 1 - 3 * i + 3 * i]$.

Енергетична ефективність різних видів модуляції визначається за допомогою графіків залежностей:

$$P_e = \text{BER} = f(E_b/N_0),$$

де E_b – середня енергія біту; N_0 – спектральна густина потужності шуму (потужність шуму, нормована до смуги 1 Гц) на вході демодулятора.

Чим вища ймовірність помилки, тим нижча енергетична ефективність. Ефективність модуляції QAM і PSK можна дослідити за допомогою Simulink-моделі, що наведена на рис. 11 для модуляції 16-QAM

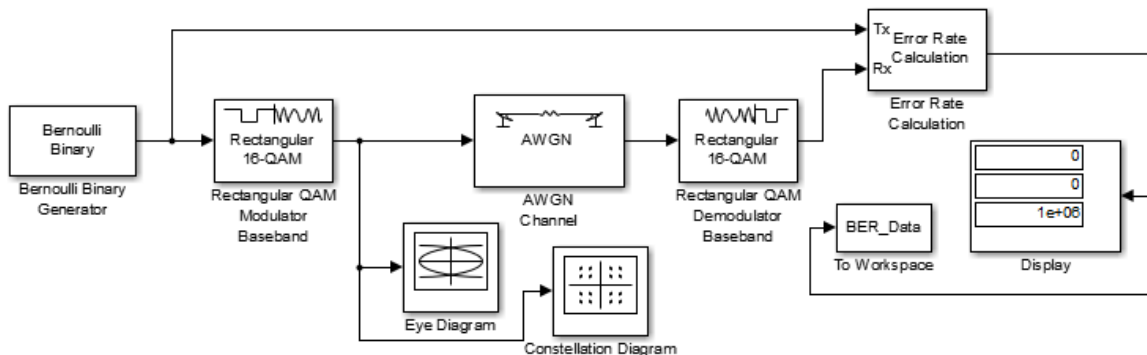


Рис. 11. Simulink-модель дослідження ефективності модуляції 16-QAM

Достовірність передачі інформації в цифрових системах характеризується статистичною величиною – ймовірністю помилки на біт (BER – Bit Error Rate). BER є ймовірністю помилкового прийому при передачі одного біта інформації, усередненої для статистично великого обсягу переданої інформації.

Результати дослідження залежності BER від відношення E_b/N_0 для різної кількості точок в сигнальному сузір'ї при модуляції QAM і PSK наведені на рис. 12 і рис. 13.

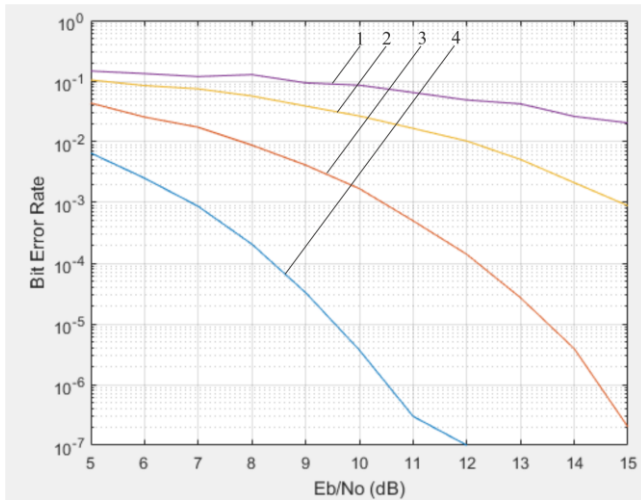


Рис. 12. Залежність BER від відношення E_b/N_0 для різної кількості точок в сигнальному сузір'ї модуляції QAM: 1) $M=256$; 2) $M=64$; 3) $M=16$; 4) $M=4$

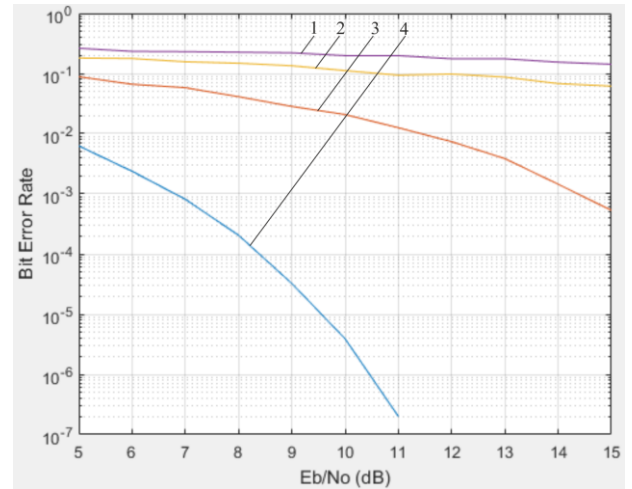


Рис. 13. Залежність BER від відношення E_b/N_0 для різної кількості точок в сигнальному сузір'ї модуляції PSK: 1) $M=256$; 2) $M=64$; 3) $M=16$; 4) $M=4$

Процес модуляції полягає у відображенні інформації у вигляді бітового потоку на символному (амплітудно-фазовому) просторі. У загальному випадку кожен модуляційний символ характеризується значенням амплітуди і фази і результат модуляції може бути представлений на амплітудно-фазовому просторі у вигляді так званого констеляційного сузір'я, яке складається з точок з координатами амплітуди і фази. Відстань між констеляційними точками визначає завадостійкість каналу зв'язку: чим більша відстань, тим вище завадостійкість. Завади, а також нерівномірність передавальної характеристики тракту (відхилення амплітудно-частотної характеристики (АЧХ), групового часу проходження (ГЧП) від ідеальних) призводять до розширення області, в якій може бути виявлений сигнал і визначений як відповідний символ. Таке розширення меж символу призводить до зниження завадостійкості каналу зв'язку. В загальному випадку, евклідова відстань d між сусідніми точками у багатовимірному просторі визначається виразом:

$$d(s_i, s_j) = \left\{ \int_0^T [s_i(t) - s_j(t)]^2 dt \right\}^{1/2}, \quad i=1, \dots, m, \quad j=1, \dots, m$$

Залежність ймовірності помилки на біт від відношення E_b/N_0 для PSK модуляції.

$$P_e = \frac{2}{k} Q \left(\sqrt{\frac{2E_b k}{N_0}} \sin^2 \left(\frac{\pi}{M} \right) \right),$$

де $k = \log_2 M$, $Q(x) = \frac{1}{2\pi} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$ – інтеграл помилок, M – число позицій модуляції M-PSK.

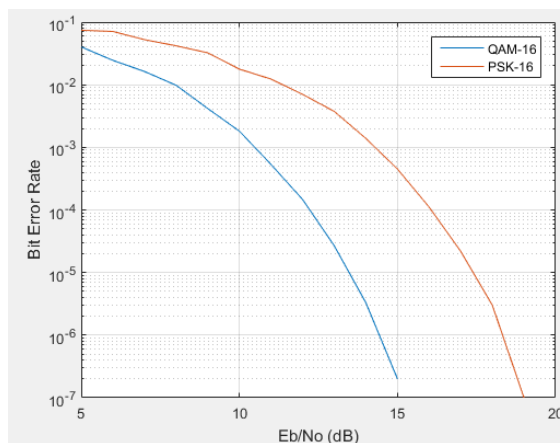


Рис. 14. Залежність BER від відношення E_b/N_0 для 16-QAM і 16-PSK

Порівняємо види модуляції за критерієм енергетичної ефективності. Для цього оцінимо для кожного виду модуляції необхідну енергію для передачі інформації з однаковою ймовірністю помилки на біт. Зі збільшенням позиційності модуляції, ймовірність бігової помилки збільшується. При збільшенні

спектральної ефективності енергетична ефективність зменшується. Під енергетичним вигрешем розуміють різницю значень E_b/N_0 при однаковому значенні ймовірності помилки на біт.

На рис. 14 представлено порівняння систем 16-QAM та 16-PSK, що працюють на однаковій піковій потужності, по відстані між точками.

Модуляція 16-QAM ефективніше модуляції 16-PSK на 4 дБ. Відстань між точками сигнального сузір'я модуляції 16-QAM у 1,62 рази більше ніж 16-PSK модуляції. Залежність BER від відношення E_b/N_0 для 64-QAM і 64-PSK наведено на рис. 15. Залежність BER від відношення E_b/N_0 для 256-QAM і 256-PSK наведено на рис. 16.

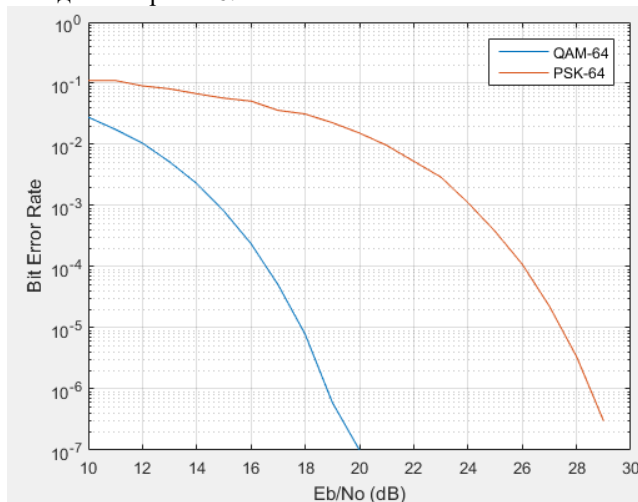


Рис. 15. Залежність BER від відношення E_b/N_0 для 64-QAM і 64-PSK

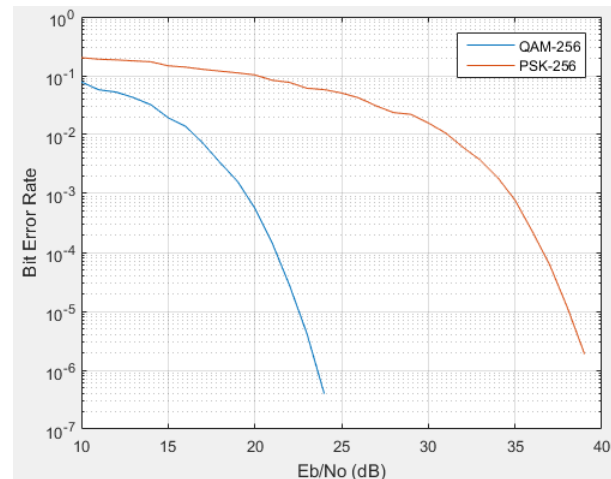


Рис. 16. Залежність BER від відношення E_b/N_0 для 256-QAM і 256-PSK

Модуляція M-QAM перевершує по ефективності M-PSK. Енергетичний вигреш M-QAM збільшується з ростом M. Наприклад, для $M = 16$ вигреш становить близько 4 дБ, при $M = 64$ близько 10 дБ, а при $M = 256$ близько 17 дБ. Фізично це пояснюється тим, що відстань між сусідніми точками в сигнальному сузір'ї M-PSK менша, ніж M-QAM. Сигнальне сузір'я M-PSK є колом з рівномірно розподіленими на ній точками (рис. 10), а сузір'я M-QAM – квадрат з рівномірно розподіленими по його площі точками (рис. 9).

Таким чином, при обмеженій смузі, при $M < 4$ найбільш ефективною є модуляція QPSK, а при $M > 4$ – QAM. QPSK є окремим випадком QAM при $M = 4$. Можна вважати QAM найбільш ефективним видом модуляції при будь-якому числі рівнів. Ще більший вигреш дає модуляція з ґратчастим кодуванням (TCM), оптимізація форми сигнальних сузір'їв і використання багатовимірних сигнальних сузір'їв.

Характеристики помилок систем QAM і PSK модуляції сильно відрізняються. При достатньо великій кількості сигнальних точок системи QAM мають, як правило, кращі характеристики, ніж системи з PSK. Основна причина полягає в тому, що відстань між сигнальними точками на діаграмі для системи з QAM більше, ніж для відповідної системи з PSK. Відстань d між сусідніми точками в системі QAM з нормованою до одиниці піковою амплітудою і числом рівнів L може бути представлено у вигляді:

$$d = \frac{\sqrt{2}}{L-1}$$

QAM має перевагу над системою PSK при однаковій піковій потужності. Надійне функціонування високоплотних форматів модуляції, (наприклад, 256 QAM) потребує точної лінійності підсилювачів.

Перевага високих значень номера QAM – це підвищена швидкість передачі даних, оскільки таким чином може бути передана більша кількість бітів інформації протягом одного циклу. Однак, з іншого боку, в цьому випадку більше число рівнів амплітуди сигналу розташовуються близько один до одного, підвищуючи чутливість системи до шуму. Таким чином, високі значення номера QAM більш вимогливі до параметру SNR (Signal Noise Ratio – відношення сигнал / шум) [4].

Канальне кодування. Канальне кодування істотно знижує ймовірність помилки на біт в порівнянні з некодованою системою при однаковому відношенні E_b/N_0 . Тобто, кодування забезпечує енергетичний вигреш. Однак кодування додає надмірність, при цьому швидкість передачі інформації знижується відповідно до кодової швидкості. Для збереження швидкості передачі корисної інформації необхідно збільшити швидкість передачі закодованої інформації. При збільшенні швидкості передачі розширюється спектр, і це є протиріччям енергетичної та спектральної ефективності.

Для отримання енергетичного вигреша зі збереженням швидкості передачі інформації необхідно

використовувати багатопозиційну модуляцію. Нехай використовується код зі швидкістю $1/2$. Для збереження обсягу переданої інформації швидкість треба збільшити в 2 рази, відповідно в 2 рази розшириться спектр. Припустимо, інформація передавалася за допомогою модуляції 32-QAM. Будемо використовувати 64-QAM, що призведе до зменшення смуги в 2 рази. Збільшення числа позицій модуляції вимагає збільшення E_b/N_0 на декілька дБ для збереження тієї ж ймовірності помилки. Додаткові точки в сигнальному сузір'ї використовуються для передачі надмірності, введеної кодом. При цьому ширина спектра зберігається.

Канальне кодування підвищує якість зв'язку. При використанні завадостійких кодів сигнал стає менше чутливим до шумів, завад, замирань. Канальне кодування можна вважати способом приведення параметрів системи до бажаного компромісу (тобто співвідношенню між достовірністю передачі і шириною смуги пропускання або потужністю і шириною смуги пропускання). Simulink-модель дослідження ефективності поєднання модуляції і кодування у випадку використання згорткового кодування і модуляції

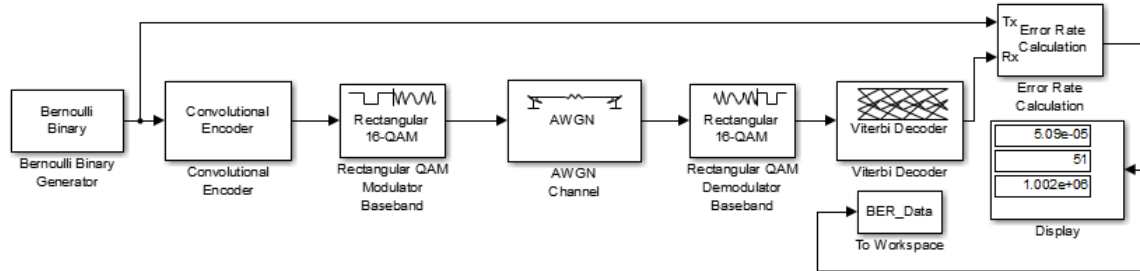


Рис. 17. Simulink-модель дослідження ефективності поєднання модуляції і кодування

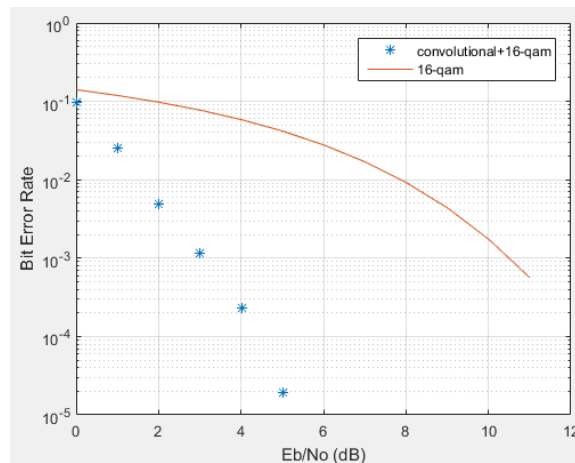


Рис. 18. Залежність BER від відношення E_b/N_0 для 16-QAM і згорткового кодування

Згорткові коди збільшують надмірність за рахунок того що вихідні дані залежать не тільки від поточних вхідних даних, але і від кількох попередніх вхідних даних. За рахунок залежності виходу від попереднього стану зменшується число дозволених станів – з'являється надмірність. Термін «згортковий код» пояснюється тим, що кодове слово можна розглядати як згортку відгуку лінійної системи (кодера) і вхідної інформаційної послідовності. Тому згорткові коди є лінійними, для яких сума будь-яких кодових послідовностей також є кодовою послідовністю. Введення згорткового кодування дає енергетичний вигравш 7 дБ для $BER = 10^{-4}$.

Висновки. Зі збільшенням позиційності модуляції, ймовірність бітової помилки збільшується. При збільшенні спектральної ефективності енергетична ефективність зменшується. Збільшення позицій (рівнів) модуляції збільшує спектральну ефективність у $k = \log_2 M$ разів. Модуляція M-QAM перевершує по ефективності M-PSK. Енергетичний вигравш M-QAM збільшується з ростом M. Наприклад, для $M = 16$ вигравш становить близько 4 дБ, при $M = 64$ близько 10 дБ, а при $M = 256$ близько 17 дБ. Це пояснюється тим, що відстань між сусідніми точками в сигнальному сузір'ї M-PSK менша, ніж M-QAM. Відстань між точками сигнального сузір'я модуляції 16-QAM у 1,62 рази більше ніж 16-PSK модуляції. Перевага високих значень номера QAM – це підвищена швидкість передачі даних, оскільки таким чином може бути передана більша кількість бітів інформації протягом одного циклу. Ще більший вигравш дає модуляція з гратчастим кодуванням (TCM), оптимізація форми сигнальних сузір'їв і використання багатовимірних сигнальних сузір'їв.

Канальне кодування істотно знижує ймовірність помилки на біт в порівнянні з некодованою системою при однаковому відношенні E_b/N_0 . Тобто, кодування забезпечує енергетичний вииграш. Канальне кодування підвищує якість зв'язку. При використанні завадостійких кодів сигнал стає менше чутливим до шумів, завад, завмирань. Введення згорткового кодування дає енергетичний вииграш 7 дБ для $BER=10^{-4}$.

Література

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр ; пер с англ. – 2-е изд., испр. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
2. Прокис Д. Цифровая связь / Д. Прокис ; пер. с англ. ; под ред. Д.Д. Кловского. – М. : Радио и связь, 2000. – 800 с.
3. Бойко, Ю.М. Аналіз енергетичної та спектральної ефективності сигналів у цифрових телекомунікаційних системах [Текст] / Ю. М. Бойко, О. І. Єрмоєнко, Ю. Б. Ісаєнко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2013. – № 6. – С. 147-160.
4. Boiko J. M. Research of to antijammingnes of signals is with phase manipulation in digital satellite channels passed information / J. M. Boiko, R. O. Boryachok // Modern directions of theoretical and applied researches 2013 SWorld, 19—30 March, Odessa.

References

1. Skljar B. Cifrovaja svjaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie / B. Skljar ; per s angl. – 2-e izd., ispr. – M. : Izdatel'skij dom «Vil'jams», 2003. – 1104 s.
2. Prokis D. Cifrovaja svjaz' / D. Prokis ; per. s angl. ; pod red. D.D. Klovsogo. – M. : Radio i svjaz', 2000. – 800 s.
3. Boiko J.M. Analysis of energy and spectral signals efficiency in digital telecommunications system / J.M. Boiko, O.I. Eromenko, Y.B. Isaenko // Visnyk KHNY. Tekhnichni nauky №6, 2013 – С. 147-160.
4. Boiko J. M. Research of to antijammingnes of signals is with phase manipulation in digital satellite channels passed information / J. M. Boiko, R. O. Boryachok // Modern directions of theoretical and applied researches 2013 SWorld, 19—30 March, Odessa.

Рецензія/Peer review : 25.10.2018 Надрукована/Printed : 11.02.2019
Рецензент: д. т. н., проф. Бойко Ю. М.

За зміст повідомлень редакція відповідальності не несе

Підп. до друку 04.02.2019. Ум. друк. арк. 11,08. Обл.-вид. арк. 10,95
Формат 30x42/4, папір офсетний. Друк різнографією.
Наклад 100, зам. №

Тиражування здійснено з оригінал-макету, виготовленого
редакцією журналу “Вісник Хмельницького національного університету”

Редакційно-видавничий центр Хмельницького національного університету
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1, тел. (0382) 72-83-63
