

ЛІНІЙНА ЦИФРОВА МОДУЛЯЦІЯ

Мета роботи: Ознайомитись з методами цифрової маніпуляції та методами кодування сигналів. Дослідити вплив форми сузір'я (виду цифрової маніпуляції) на завадостійкість системи зв'язку. Вивчити вплив типу розкладу бітових послідовностей по вершинах сузір'я.

1. Теоретичні відомості

В попередніх лабораторних роботах були розглянуті методи цифрової маніпуляції, в яких при передачі одного символу передавали один біт інформації. При цьому постає питання, чи можливо і яким чином за допомогою одного імпульсу закодувати відразу два імпульси бітового потоку. Нижче ми розглянемо дане питання і розглянемо квадратну фазову маніпуляцію (quadrature phase shift keying QPSK). Але перед тим розглянемо поняття комплексної огибаючої та сигнали з двійковою фазовою маніпуляцією (BPSK).

Розглянемо гармонічний сигнал (несуче коливання)

$$s_{\text{нес}}(t) = a \cos(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

де a - амплітуда коливання, ω - частота, φ - початкова фаза. Можна ввести поняття повної фази $F(t) = \omega t + \varphi$ та миттєвої частоти $\omega = \frac{d}{dt} F(t)$. Як видно, у гармонічного коливання є лише два параметри (амплітуда та повна фаза), змінюючи які можна отримати амплітудну модуляцію, частотну або інші види модуляції.

$$s(t) = a(t) \cos(\omega t + \varphi(t)), \quad (2)$$

де $a(t)$ - закон зміни амплітуди модулюючого сигналу, $\varphi(t)$ - закон зміни фази відповідно до зміни модулюючого сигналу.

Як вам має вже бути відомим з курсу «Радіотехнічні кола та сигнали», коливання (2) можна представити у наступному аналогічному до (2) комплексному вигляді

$$z(t) = a(t) \exp(i(\omega t + \varphi(t))) \quad (3)$$

Причому такий вигляд є зручним як в задачах аналізу сигналів в радіотехнічних колах так і для візуального представлення сигналів. Як видно, дійсна частина комплексного сигналу (3) співпадає з сигналом (2). Перепишемо формулу (3) у вигляді

$$z(t) = z_m(t) \exp(i\omega t), \quad (4)$$

де вираз $z_m(t) = a(t) \exp(i\varphi(t))$ називається комплексною амплітудою (комплексною огибаючою сигналу $s(t)$).

Як відомо, будь-яке комплексне число можна представити у вигляді точки або вектора на комплексній площині. Причому цей вектор (4) на комплексній площині здійснюватиме поворот на кут ω за секунду, якщо амплітуда та фаза фіксовані, результатом такого обертання буде коло. При залежності амплітуди та фази від часу коло буде спотворюватись у відповідності до змін параметрів. Якщо уявити, що на комплексну площину нанесено два сигнали, що мають однакову частоту та різні амплітуди і фази, в результаті отримаємо обертання двох векторів. Причому в «системі відліку» одного з векторів ситуація виглядатиме так, наче вектори нерухомі, а лише відрізняються один відносно одного довжиною та кутом повороту – це інформація, що міститься в комплексній огибаючій. Тому при зображенні сигналів $\exp(i\omega t)$ опускають, зображуючи тільки комплексні амплітуди. Таким чином, різним сигналам відповідатимуть різні вектори в прямокутній системі координат з відповідною амплітудою та фазою, що є дуже зручним для їх порівняння та аналізу.

Розглянемо комплексну огибаючу та запишемо її у вигляді дійсної та уявної частини

$$z_m(t) = \underbrace{a(t) \cos(\varphi(t))}_{I(t)} + \underbrace{ia(t) \sin(\varphi(t))}_{Q(t)}, \quad (5)$$

де $I(t)$ - синфазна складова комплексної огибаючої (координата по осі абсцис), $Q(t)$ - квадратурна складова комплексної огибаючої (координата по осі ординат). Тепер в термінах синфазної та квадратурної складових комплексний сигнал (4) можна записати в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} z(t) &= (I(t) + iQ(t)) \exp(i\omega t) = (I(t) + iQ(t))(\cos(\omega t) + i \sin(\omega t)) = \\ &= (I(t) \cos(\omega t) - Q(t) \sin(\omega t)) + i(I(t) \sin(\omega t) + Q(t) \cos(\omega t)). \end{aligned} \quad (6)$$

Тоді сигнал (2) матиме вигляд $s(t) = I(t) \cos(\omega t) - Q(t) \sin(\omega t)$ (7). Якщо існує модулюючий сигнал, з якого сформовані синфазна та квадратурна компоненти

комплексної огинаючої сигналу, формула (7) дає практичну вказівку яким чином можна здійснити фазову модуляцію.

Двійкова фазова маніпуляція (binary phase shift key BPSK).

Розглянемо сигнал $b(t)$, що є послідовністю імпульсів цифрової інформації, як зображено на рис.1.

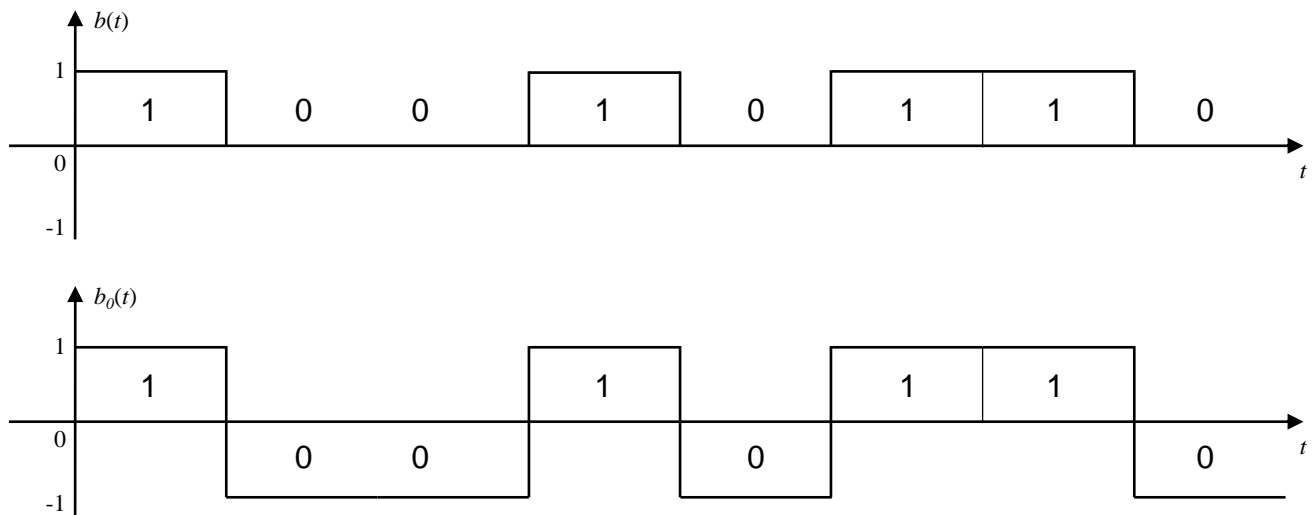


РИС.1

На верхньому графіку зображено уніполярний сигнал $b(t)$ («1» -1, «0» - 0), на нижньому біполярний $b_0(t)$ («1» -1, «0» - -1). Сигнал $b(t)$ можна використати в якості модулюючого, тобто в якості фази несучого коливання. Зазвичай $\varphi(t)$ вибирають таким чином що вона кратна π . Для цього модулюючий сигнал потрібно відмасштабувати, в цьому випадку $\varphi(t) = \pi b(t)$. Синфазна та квадратурна компоненти відповідно матимуть вигляд:

$$I(t) = \cos(\pi b(t)) = \pm 1 = b_0(t), \quad Q(t) = \sin(\pi b(t)) = 0. \quad (8)$$

Таким чином модульований сигнал можна представити у наступному вигляді $s(t) = I(t)\cos(\omega t) - Q(t)\sin(\omega t) = b_0(t)\cos(\omega t)$ (див. рис.2.)

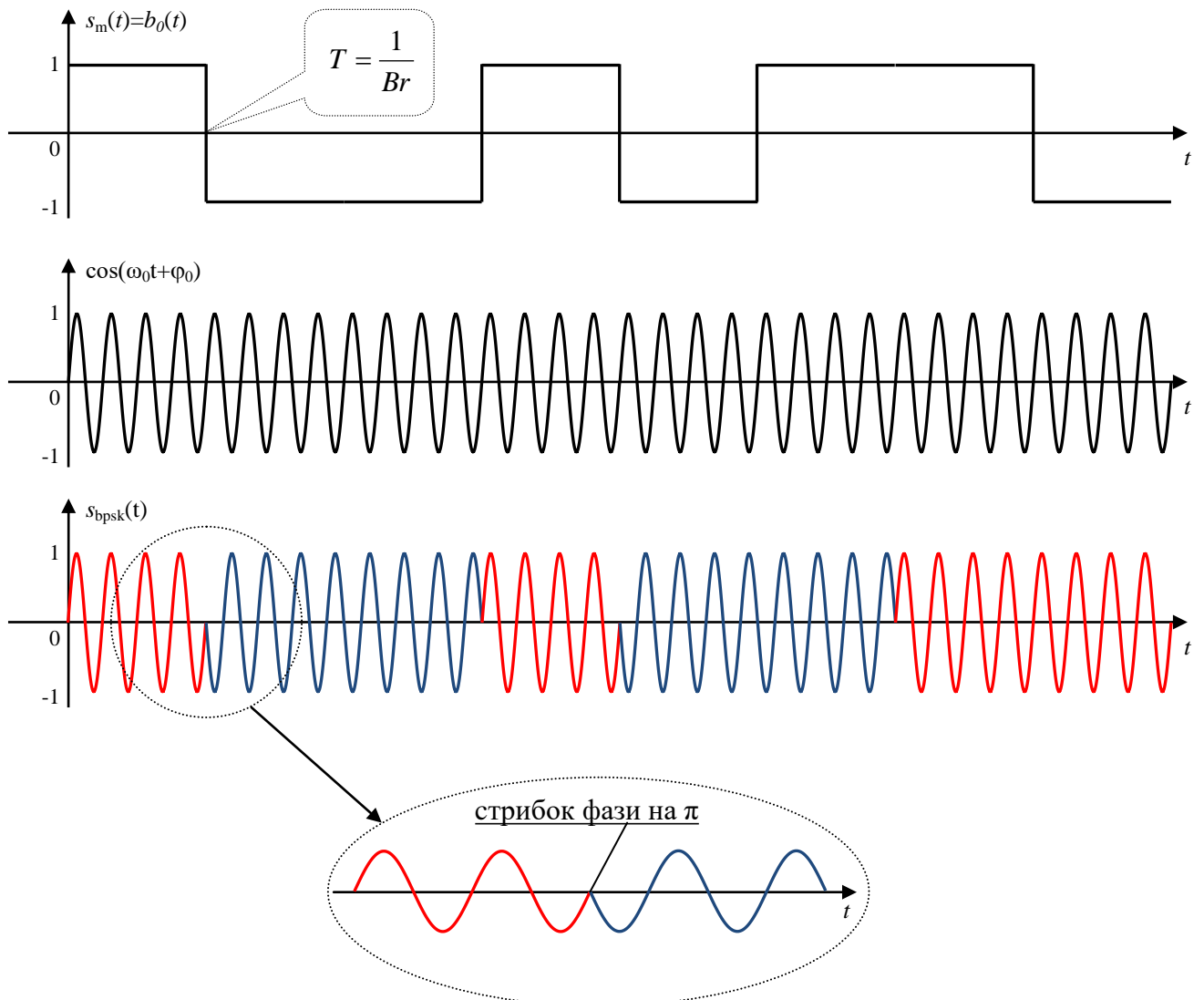


РИС.2

Розглянемо векторну діаграму сформованого сигналу $s_m(t) = I(t) + iQ(t)$. Відповідно до (8) вона матиме наступний вигляд, зображений на рис.3. Так як вектор комплексної огибаючої може набувати одне із двох значень $I(t)=1$ (при передачі інформаційного нуля) та $I(t)=-1$ (при передачі інформаційної одиниці), то матимемо лише дві точки на комплексній площині. Таке представлення виду цифрової маніпуляції називається сузір'ям, як буде видно далі таке графічне представлення є досить зручним для порівняння різних методів маніпуляції.

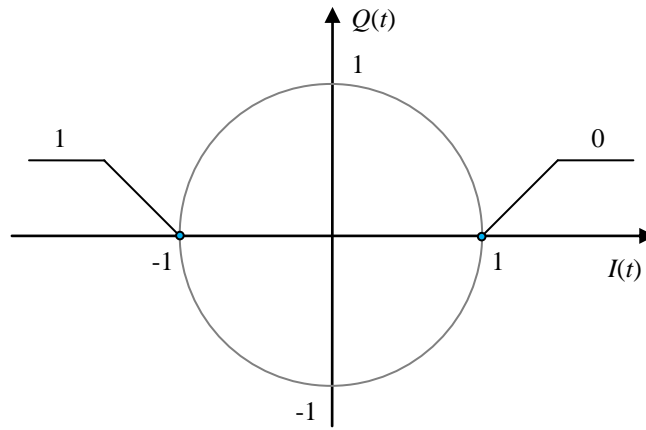


Рис.3

Квадратурна фазова маніпуляція (quadro phase shift key QPSK).

Метод модуляції, що базується на ідеї кодування двох біт передаваної інформації за допомогою одного імпульсу. Знаючи принцип роботи BPSK, легко зрозуміти, як це можна реалізувати. Розглянемо деякий бітовий потік: 1100101101100001... Очевидно якщо брати з нього послідовно парами по два біти, то можливі лише наступні комбінації: 00, 01, 10, 11. Тобто, за такого представлення інформаційної послідовності бітів, будь який сигнал можна представити у вигляді комбінації пар (00, 01, 10, 11). По аналогії з BPSK, кожній парі потрібно поставити у відповідність вектор (точку) у координатах синфазної та квадратурної компонент, як це робилося раніше. Зазвичай, точки на векторній діаграмі вибирають таким чином, щоб вони були максимально рівновіддаленими одна від одної. У випадку квадратурної фазової маніпуляції сигнальне сузір'я має вигляд, що зображено на рис.4.

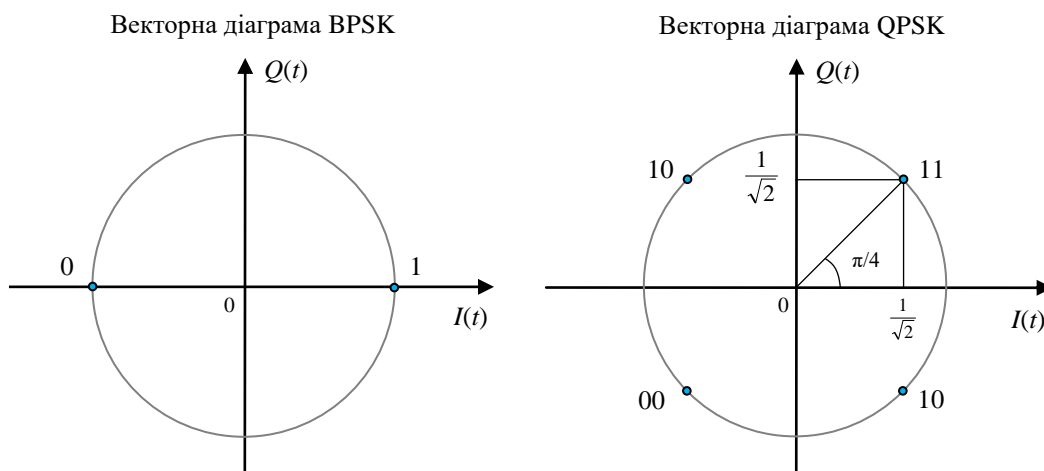


Рис.4

Технічно даний метод кодування здійснюється наступним чином. Бітовий потік розбивається на парні та непарні біти. $I(t)$ - кодуватиме парні біти, а $Q(t)$ - непарні. Два послідовних біти кодуються одночасно синфазним та квадратурним сигналом. Це наглядно зображено на наведених на рис.5 осцилограмах.

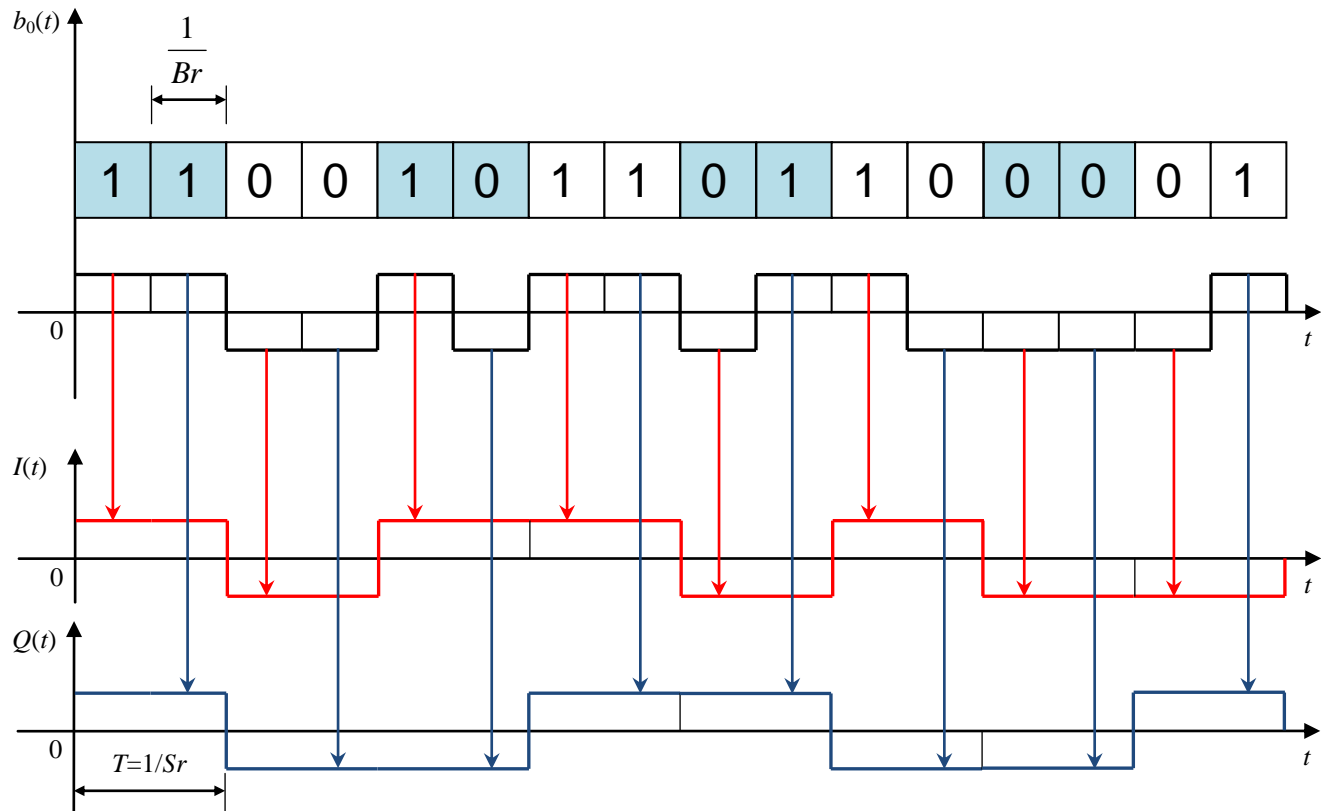


Рис.5

Отже сформувавши таким чином з бітової послідовності за наведеним вище алгоритмом два сигнали $I(t)$ та $Q(t)$ (синфазний та квадратурний), можна сформувати сигнал (за допомогою (7)), що передаватиметься в канал (тобто здійснити маніпуляцію). Так як $I(t)$ та $Q(t)$ є дійсною та уявною компонентами комплексної огинаючої сигналу. Можна побудувати залежність фази з часом такого сигналу за відомим співвідношенням

$$\varphi(t) = \arctan\left(\frac{Q(t)}{I(t)}\right). \quad (9)$$

На рис.6. зображено осцилограми синфазної та квадратурної компонент і відповідної їм фази сигналу.

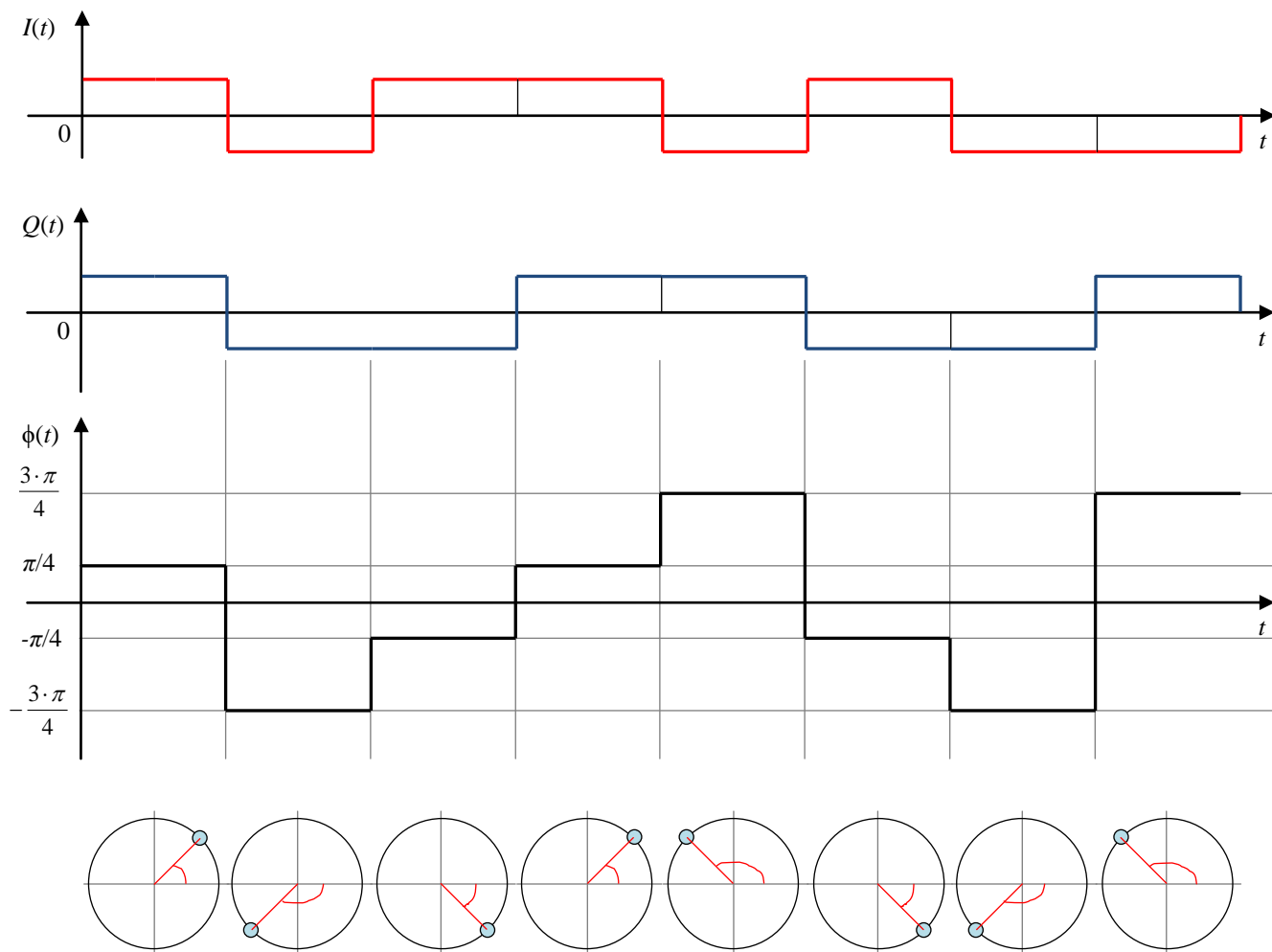


Рис.6

Переваги розглянутого методу кодування очевидні, оскільки при передачі даного імпульсу передається відразу два біти інформації. Проте такий метод і йому подібні, що будуть розглянуті в лабораторній роботі, мають недолік в порівнянні з методом двійкової фазової маніпуляції: за наявності завад більш імовірно помилки розпізнавання символів. Однак є метод що дозволяє зменшити цю похибку та підвищити ефективність системи передачі інформації.

Код Грея

Код Грея – система числення, в якій два сусідніх значення відрізняються лише одним розрядом. На практиці найчастіше застосовується рефлексивний бінарний код Грея. Продемонструємо на прикладі 3-бітної послідовності. В наведеній нижче таблиці наведено 3-бітні слова у бінарному представленні та в представленні коду Грея.

№	Бінарний код	Код Грея
0	000	000
1	001	001
2	010	011
3	011	010
4	100	110
5	101	100
6	110	101
7	111	100

Код Грея має застосування в задачах передачі та приймання інформації. А саме, зменшує імовірність похибки розпізнавання символу. Продемонструємо це на прикладі вісімкової фазової модуляції (2^3) (8-PSK). На рис.7. зображено тип розкладу бітових послідовностей по вершинах сузір'я.

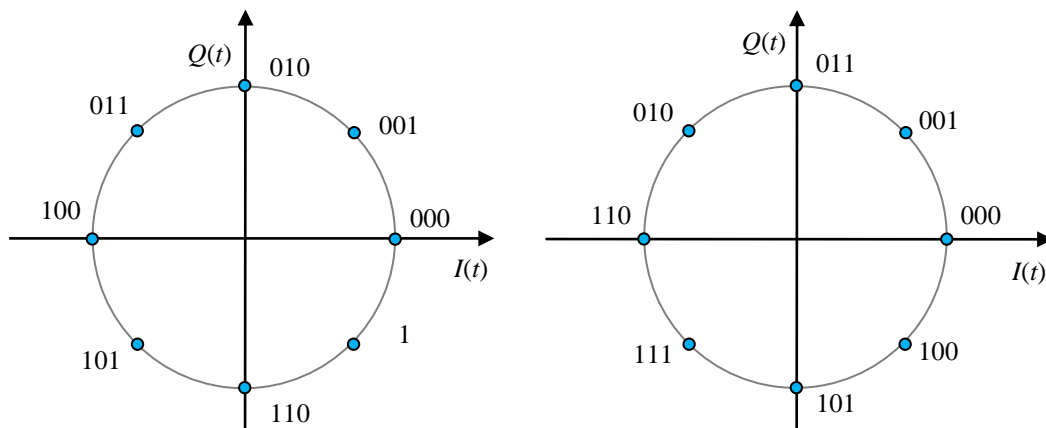


Рис.7

Очевидно, що за наявності значних завад будуть помилки розпізнавання символів. Чи то у випадку фазової маніпуляції, чи у випадку амплітудної модуляції найчастіше виникатимуть помилки між сусідніми символами. Тому розглянемо наступний випадок. Наприклад, за рахунок завад символ з бітовою послідовністю (001) якому відповідає фаза $\pi/4$ детектором розпізнано як символ з фазою $\pi/2$, йому відповідає закодована бітова послідовність (010). Таким чином у вихідному детектованому бітовому потоці виявиться два не вірно розпізнаних біти. Розглянемо тепер випадок розкладки бітових

послідовностей відповідно до алгоритму Грея, тобто таким чином, що сусідні бітові послідовності відрізнялися лише одним розрядом. Нехай знову детектор помиляється в розпізнаванні символу з фазою $\pi/4$ і видає символ з фазою $\pi/2$. В такому випадку в бітовому потоці замість послідовності (001) з'явиться послідовність (011). Як видно в такому випадку невірно розпізнаним буде лише один біт. Таким чином кодування Грея є ефективним засобом підвищення завадостійкості систем передачі інформації, що використовується на практиці.

Порядок виконання роботи

Дослідження впливу форми сузір'я (виду модуляції) на завадостійкість системи зв'язку

1. Створіть нову пусту модель.
2. Побудуйте модель простої системи зв'язку з амплітудною маніпуляцією, використовуючи наступні блоки:
 - Джерело даних – блок генерації бітового потоку (*Communications Blockset> Comm Sources> Random Data Sources> Bernoulli Binary Generator*);
 - Перетворювач послідовного коду в паралельний – блок буферу (*Signal Processing Blockset> Signal Management> Buffers> Buffer*) ;
 - Модулятор – блок моделювання комплексної огибаючої сигналу з амплітудною маніпуляцією (*Communications Blockset> Modulation> AM> M-PAM Modulator Baseband*) ;
 - Канал зв'язку – блок моделювання каналу (*Communications Blockset> Channels> AWGN Chanel*) ;
 - Демодулятор – блок демодуляції комплексної огибаючої сигналу з амплітудною маніпуляцією (*Communications Blockset> Modulation> AM> M-PAM Demodulator Baseband*) ;
 - Перетворювач паралельного коду в послідовний – блок дебуферизації (*Signal Processing Blockset> Signal Management> Buffers> Unbuffer*) ;
 - Приймач даних – блок оцінки імовірності похибки розпізнавання (*Communications Blockset> Comm Sinks> Error Rate Calculation*) ;
 - Індикатор імовірності похибки – блок числового дисплея (*Simulink> Sinks> Display*) ;

- Крім того, для перегляду форми сигнального сузір'я додайте до моделі блок візуалізації діаграми розсіювання (*Communications Blockset* > *Comm Sinks* > *Discrete-Time Scatter Plot Scope*) та підключіть його до точки, в якій отримується зашумлений сигнал (від блока *AWGN Chanel*);
3. Використовуйте наступні налаштування блоків (для не вказаних параметрів залиште значення за замовчуванням):
- Буфер: Розмір буфера (*Output buffer size (per channel)*) – 4 (так як використовуються 4-бітові символи) ;
 - Модулятор:
 - Число точок в сузір'ї (*M-ray number*) – 16 (2^4) ;
 - Тип вхідних даних (*Input type*) - *Bit* (так як на вхід поступають саме біти а не багатобітові цілі числа) ;
 - Тип розкладу бітових комбінацій по точках сузір'я (*Constellation ordering*) – *Gray* (код Грея) ;
 - Нормування масштабу сузір'я (*Normalization method*) – *Average power* (за заданою середньою потужністю) ;
 - АБГШ-канал: тривалість символів в сигналі (*Symbol period*) – 4 (так як символи формуються з 4-бітових комбінацій);
 - Демодулятор: всі налаштування такі самі як і для модулятора;
 - Блок оцінки імовірності похибки:
 - Затримка прийому (*Receive delay*) має бути рівною подвоєному числу біт в символі, тобто 8;
 - Напрямок виводу результатів (*Output data*) – *Port* (в вихідний порт) ;
 - Режим автоматичної зупинки моделювання (галочка *Stop simulation*) – включити;
 - Візуалізатор діаграми розсіювання:
 - Число точок що відображаються (*Points displayed*) – 400;
 - Інтервал оновлення (*New points per display*) – 100;
 - Загальні параметри процесу моделювання: тип ядра (*Solver options*) – дискретний з фіксованим кроком (*Type: Fixed-Step, Solver discrete (no continuous states)*);
 - Час закінчення роботи (*Stop time*) – *inf* (нескінченність);

- Встановіть в блоці *AWGN Chanel* нескінченне значення відношення С/Ш (E_s/N_0), запустіть модель та впевніться, що помилки передавання відсутні;
4. Зніміть залежність імовірності бітової похибки від відношення E_s/N_0 , змінюючи останнє в діапазоні 10...25 дБ, з кроком 1 дБ. Результати занесіть до таблиці, формат якої наведено нижче.

E_s/N_0 , дБ	$P_{пox}$

5. Для того щоб в процесі моделювання спостерігати сузір'я сигналу повністю, використовуйте в вікні візуалізатора функцію автомасштабування (команда *Autoscale* в контекстному меню вікна). Проаналізуйте сигнальні сузір'я для $E_s/N_0=(10, 20, inf)$.
6. Замініть модулятор та демодулятор на аналогічні блоки для фазової маніпуляції (*Communications Blockset > Modulation > Digital Baseband Modulation > PM > M-PSK (De)Modulator Baseband*). Задайте для цих блоків такі ж налаштування як у випадку амплітудної маніпуляції.
7. Зніміть залежність імовірності бітової помилки від відношення E_s/N_0 , змінюючи останнє в діапазоні 10...25 дБ, з кроком 1 дБ. Результати занесіть в таку ж таблицю, як раніше для випадку амплітудної модуляції. Проаналізуйте сигнальні сузір'я для $E_s/N_0=(10, 20, inf)$.
8. Замініть модулятор і демодулятор на аналогічні блоки для квадратурної модуляції з квадратним сузір'ям (*Communications Blockset > Modulation > Digital Baseband Modulation > AM > Rectangular QAM (De)Modulator Baseband*). Задайте для цих блоків такі ж налаштування як і в попередніх випадках.
9. Зніміть залежність імовірності бітової помилки від відношення E_s/N_0 , змінюючи останнє в діапазоні 10...25 дБ, з кроком 1 дБ. Результати занесіть в таку ж таблицю, як раніше. Проаналізуйте сигнальні сузір'я для $E_s/N_0= (10, 20, inf)$.

Дослідження впливу способу розкладу бітових комбінацій по точках сузір'я на завадостійкість системи зв'язку.

Для випадку амплітудної, фазової та квадратурної модуляції:

10. Змініть в блоках модулятора і демодулятора спосіб розкладу бітових комбінацій по точках сузір'я, вибравши для параметра *Constellation ordering* варіант *Binary*.
11. Зніміть залежність імовірності бітової помилки від відношення E_s/N_0 , змінюючи останнє в тому ж діапазоні 10...25 дБ. Результати занесіть в таку ж таблицю, як раніше.

Дослідження впливу числа точок в сузір'ї на завадостійкість системи зв'язку

12. Відновіть використання коду Грея для способу розкладу бітових комбінацій по точках сузір'я, вибравши для параметра *Constellation ordering* модулятора і демодулятора варіант *Gray*.
13. Зніміть залежність імовірності бітової помилки від відношення E_s/N_0 , для різного числа точок сузір'я КАМ (QAM) -модуляції: 4 точки (10...25 дБ) та 64 точки (10...25 дБ). Результати заносьте до таблиці того самого формату що і раніше. Для зміни числа точок сузір'я необхідно налаштовувати наступні параметри моделі:

- буфер: розмір буферу має відповідати числу біт, що містяться в одному символі, тобто для 4-точкового сузір'я має бути рівним $\log_2 4 = 2$, а для 64 – точкового $\log_2 64 = 6$.
- Модулятор і демодулятор: необхідно задати необхідне число точок в сузір'ї (*M-ray number*).
- АБГШ-канал: тривалість символів сигналу (*Symbol period*) має дорівнювати числу біт, що містяться в одному символі, тобто співпадати з розміром буферу (див вище);
- Блок оцінки імовірності: затримка прийому (*Receive delay*) повинна бути рівною подвоєному числу біт в символі.

Продемонструйте робочу модель викладачеві. Підготуйте звіт.

Зміст звіту:

1. Схема моделі.
2. В одних координатах зобразіть залежності імовірності похибки від величини співвідношення С/Ш для амплітудної, фазової та квадратурної модуляції.
3. Наведіть зображення сигнальних сузір'їв для амплітудної, фазової та квадратурної модуляції для $E_s/N_0 = (10, 20, \text{inf})$.
4. Для кожного з випадків амплітудної, фазової та квадратичної модуляції зобразіть в одних координатах графіки залежності бітової помилки для двох способів розкладу бітових послідовностей по точках сузір'я: *Binary*, *Gray*.
5. Для випадку квадратичної модуляції (4 точки та 64 точки) побудуйте в одних координатах залежність бітової помилки від величини співвідношення сигнал/шум.
6. Висновки.

Запитання:

1. Методи модуляції (маніпуляції) сигналів.
2. Чим обумовлена необхідність використання модуляції.
3. Комплексна огибающая сигналу.
4. Сигнальне сузір'я.
5. Як залежить величина бітової похибки від кількості точок в сузір'ї.
6. Бінарний код. Код Грея.
7. Порівняйте стійкість до завад для різних методів модуляції за однакового числа точок в сузір'ї.

Список посилань

1. С.А. Ахманов, Ю.Е. Дьяков, А.С. Чиркин, Введение в статистическую радиофизику и оптику, - М: Наука, 1981.
2. Прокис, Дж. Цифровая связь / Дж. Прокис; пер. с англ., под ред. Д. Д. Кловского. – М. : Радио и связь, 2000. – 800 с.
3. О. В. Малинкина, А. Б. Натальин, А. Б. Сергиенко, Цифровая связь: Методические указания к выполнению лабораторных работ / Сост.: СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. 44 с.
4. <http://www.dsplib.ru>