

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЦИФРОВИХ МЕТОДІВ МОДУЛЯЦІЇ/ДЕМОДУЛЯЦІЇ

Анотація. В роботі проведено аналіз деяких цифрових методів модуляції/демодуляції в системах зв'язку та передачі інформації. Розглянуто особливості основних методів демодуляції цифрових інформаційних систем з метою виявлення загальних закономірностей і ефективності цих методів. Здійснена систематизація основних показників, цифрових методів модуляції з метою підвищення ефективності використання спектру частот при передачі інформації. Наведено приклади дослідження особливостей демодуляції ЧМн сигналів.

Вступ

Сучасні системи передачі/прийому інформації використовують широкий спектр аналогових та цифрових методів модуляції/демодуляції. У всіх випадках цифрової модуляції (маніпуляції), аналоговий несучий сигнал модулюється цифровим сигналом. Це можна охарактеризувати як форму аналого-цифрового перетворення. Зміни в несучому сигналі вибираються для певного числа альтернативних символів (модуляційний алфавіт) [1].

Розрізняють такі основні методи маніпуляції: амплітудна маніпуляція (АМн); частотна маніпуляція (ЧМн); фазова маніпуляція (ФМн); відносна фазова маніпуляція (ВФМн); квадратурна амплітудна маніпуляція (КАМ) (комбінація фазової і амплітудної маніпуляцій з кінцевим числом, як мінімум двох фазових і двох амплітудних коливань).

У випадку цифрової модуляції, кожній з фаз, частот і амплітуд привласнюється унікальна послідовність бінарних біт. Зазвичай кожна фаза, частота і амплітуда кодується однаковою кількістю біт [2].

Аналіз останніх досліджень

Повідомлення, які складаються з N сигналів найкраще характеризувати за допомогою кореляційної функції і спектральної густини. Кореляційна функція описується виразом [3]:

$$R_{ij}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T u_{si}(t) \cdot u_{ij}(t - \tau) dt, \quad (1)$$

де T – тривалість сигналу, $i = \overline{1, N}$ – номер сигналу, R_{ij} – автокореляційна функція.

Спектральна густина потужності визначається як пряме перетворення Фур'є від автокореляційної функції:

$$U_s(f) = \frac{1}{2 \cdot \pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R_{ij}(\tau) e^{-j2\pi f \tau} dt. \quad (2)$$

При цьому енергетична відстань між сигналами:

$$D_{ij} = \int_0^T ((u_{si}(t) - u_{sj}(t)) \cdot ((u_{si}(t) - u_{sj}(t))^* dt, \quad (3)$$

де знак * - це знак комплексного спряження.

Відстань між сигналами, яку отримують в точці прийому, зв'язана з ймовірністю бігової помилки $P_{\text{пом}}$. Для прикладу приведемо визначення бігової помилки для гаусівського каналу і двійкової модуляції:

$$P_{\text{пом}} = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\sqrt{\frac{D_{1,2}}{2 \cdot k \cdot T_u \cdot \Delta F}} \right) \right], \quad (4)$$

де κ – коефіцієнт Больцмана, $T_{ш}$ – температура шуму, ΔF – смуга приймального тракту, $\Phi(x)$ – функція Лапласа.

У випадку двійкової ФМн спектральна густина визначається з формули:

$$u_s(t) = A^2 \cdot T_c \frac{\sin^2(2 \cdot \pi \cdot f \cdot T_c)}{(2 \cdot \pi \cdot f \cdot T_c)}, \quad (5)$$

де $A^2 \cdot T_c = E_c$ - енергія сигналу.

Відстань між сигналами для такого виду маніпуляції визначається з формули:

$$D_{1,2} = 2 \cdot \sqrt{E}$$

Взаємкореляційна функція $R_{1,2} = -1$, тому ці сигнали часто називають протилежними. Імовірність помилки при двійковій ФМн визначається згідно виразу (4):

$$P_{номPSK} = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\sqrt{\frac{2 \cdot E}{N_0}} \right) \right], \quad (6)$$

де N_0 – спектральна густина білого шуму.

При використанні в системах передачі інформації багатомірних сигналів ФМн, відстань між ними визначається за виразом:

$$D_{i,i+1} = \sqrt{E \left(2 - 2 \cos \frac{2 \cdot \pi}{M} \right)} = 2 \cdot \sqrt{E} \sin \frac{\pi}{M}, \quad (7)$$

тобто $D_{1,2} = 2 \cdot \sqrt{E}$ при $M=4$, а $D_{1,2} = 2 \cdot \sqrt{0,6E}$ при $M=8$.

В подальшому із збільшенням M відстань між каналами буде зменшуватися в $k = \log_2 M$, тому багатопозиційна ФМн використовується тільки у випадках $M \leq 8$.

Імовірність бігової помилки в гаусівському каналі для багатопозиційної ФМн визначається згідно виразу (4):

$$P_{номMPSK} = 2 \left[1 - \Phi \left(\sqrt{\frac{2 \cdot E_0 \log_2 M}{N_0} \sin \frac{\pi}{M}} \right) \right], \quad (8)$$

де $E_0 \log_2 M$ – енергія на один символ.

При проведенні аналізу виразу (8) видно, що при збільшенні кількості сигналів M^k , завадостійкість зменшується. Це пояснюється тим, що сигнали багатопозиційної ФМн при $M > 4$ втрачають ортогональність і протилежність, що призводить до зниження завадостійкості [4].

Зважаючи на вирази (7) і (8) для підвищення завадостійкості важливим є збільшення відстані між сигналами і за рахунок цього значного зменшення імовірності бігової помилки. Тому часто використовують КАМ, де відстань між сигналами визначається з виразу:

$$D_{i,i+1} = \sqrt{2E} (\sqrt{M} - 1)^{-1}, \quad (9)$$

Спектральна густина сигналу КАМ визначається:

$$u_s(t) = \frac{A_{cp}^2}{2} \left(\frac{\sin^2(\pi \cdot (f - f_s) \cdot T)}{(\pi \cdot (f - f_s) \cdot T)} \right), \quad (10)$$

В свою чергу для ЧМн кореляційні функції системи сигналів визначаються:

$$R_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (11)$$

Це свідчить про те, що сигнали є ортогональними. Рознесення між сигналами зазвичай обирають $\Delta f = 1/2T$. Завадостійкість цих сигналів залежить від типу приймача. (когерентний або не когерентний прийом).

$$P_{номFSK} = 0,5 \left[1 - \Phi \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \right], \quad (12)$$

де E_b/N_0 – відношення енергії сигналів, що витрачається на передачу одного символу, до питомої потужності шуму.

Завадостійкість ЧМн сигналів залежить від типу приймача і відстані між сигналами, яку можна обирати в залежності від типу двійкової інформації. Тому ефективність ЧМн модуляції характеризують значенням бігової помилки на виході приймача, яку визначають за виразом (12).

В результаті проведеного дослідження зрозуміло, що завадостійкість цифрових повідомлень залежить від спектральної густини, кореляційної функції і відстані між сигналами. Для багатопозиційних видів цифрової модуляції для забезпечення оптимальної завадостійкості, кількість сигналів не повинна перевищувати 8. При перевищенні кількості маніпуляцій цих сигналів, відстань між сигналами буде зменшуватися, що призведе до значного зменшення завадостійкості.

Дослідження параметрів цифрових засобів демодуляції за допомогою засобів MATLAB

Кожен тип цифрової модуляції вимагає певного мінімального значення відношення рівня сигналу до шуму. Крім відношення С/Ш важливим є значення бігової помилки (BER) після демодуляції радіосигналів. Будь-яка цифрова модуляція буде вважатися ефективною, якщо значення бігової помилки не будуть перевищувати допустимого рівня.

Використовуючи середовище програми Matlab проведемо оцінювання завадостійкості двійкової ЧМн у випадку когерентної і некогерентної демодуляції. Для цього змодулюємо випадковий інформаційний сигнал і промодулюємо його за законами ЧМн. Після цього додамо до нього шум і дослідимо ефективність різних методів демодуляції. Для цього згенеруємо М-файл в системі Matlab:

```
N = 10000; % число переданих біт
x = randint(N, 1); % цифрове повідомлення
M = 2; % двійкова ЧМн маніпуляція
Fd = 300; % символна швидкість
Fs = 9600; % частота дискретизації
f0 = 1180; % частота "нуля"
f1 = 980; % частота "одиниці"
Fc = (f0 + f1) / 2; % середня частота
tone = f1 - f0; % різниця частот
s = dmod(x, Fc, Fd, Fs, 'fsk', M, tone); % ЧМн сигнал
snr = -10:10; % вектор відношення С/Ш (в децибелах)
for k = 1:length(snr)
    sn = awgn(s, snr(k), 'measured'); % додавання шуму
    % когерентна демодуляція
    y_c = ddemod(sn, Fc, Fd, Fs, 'fsk', M, tone);
    % некогерентна демодуляція
    y_nc = ddemod(sn, Fc, Fd, Fs, 'fsk/noncoherence', M, tone);
    % розрахунок імовірності бігових помилок на виході приймача
    [n_err, er_c(k)] = symerr(x, y_c);
    [n_err, er_nc(k)] = symerr(x, y_nc);
end
% побудова графіка
semilogy(snr, er_c, snr, er_nc)
```

Приведений графік (рис. 1) показує залежність імовірності помилки від відношення сигнал/шум (у децибелах). Перша крива відповідає когерентній демодуляції, друга - некогерентній. Видно, що програш некогерентного варіанту демодуляції когерентному складає від 1 до 2,5 дБ.

З графіка добре видно, що завадостійкість ЧМн сигналів дуже висока навіть при відношенні $C/\text{Ш}=0$ дБ. При цьому імовірність помилки складає $2 \cdot 10^{-4}$ для когерентної демодуляції і $1,5 \cdot 10^{-3}$ для некогерентної. Недоліком при цьому є досить низька швидкість передачі даних, яка була обрана при модуляції.

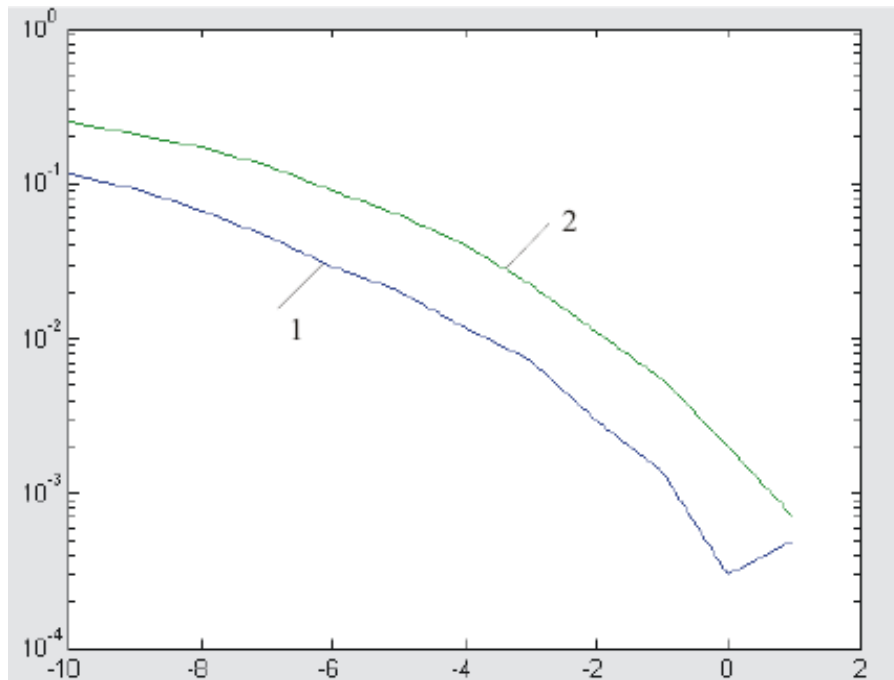


Рис. 1 – Завадостійкість ЧМн сигналу при когерентній демодуляції (1) і некогерентній демодуляції (2)

Висновки

1. Проведене порівняння цифрових видів модуляції з метою ефективного використання їх в системах передачі інформації. Порівняння було здійснене за допомогою кореляційної функції, спектральної густини та енергетичної відстані між сигналами. Було доведено, що за рахунок цих параметрів можна визначити реальну завадостійкість окремого виду маніпуляції.

2. Важливим параметром для визначення завадостійкості сигналів цифрової модуляції є автокореляційна функція і енергетична відстань між сигналами. В цьому випадку завадостійкими є протилежні і ортогональні сигнали, при $R_{1,2} = -1$. Як видно із проведеного моделювання перехід на високошвидкісні та спектрально-ефективні методи модуляції пов'язаний з застосуванням при формуванні та детектуванні інформації квадратурних та когерентних методів демодуляції.

3. Результати моделювання в Matlab свідчать, що завадостійкість ЧМн дуже висока навіть при дуже низьких відношеннях $C/\text{Ш}$. При відношенні $C/\text{Ш}=0$ імовірність бігової помилки для когерентної демодуляції складає $2 \cdot 10^{-4}$ і для некогерентної демодуляції $1,5 \cdot 10^{-3}$.

Література

1. Ричард Рид. Основы теории передачи информации: пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2007. – 304 с.
2. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации / А.И. Фалько, В.Л. Банкет, П.В. Иващенко; [под. ред. А.Г. Зюко]. – М. : Радио и связь, 1985. –304 с.
3. Хворостенко Н.П. Статистическая теория демодуляции дискретных сигналов. – М. 1968. – 334 с.
1. Григорьев В.А. Сети и системы радиодоступа / Григорьев В.А., Лагутенко О.И. – М.: Экотрендз, 2005. – 375 с.
1. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов (второе издание). – СПб, Питер, 2006. 751 с.