

УДК 621.384

С. В. ТОЛЮПА, д-р техн. наук, професор;

В. С. НАКОНЕЧНИЙ, канд. техн. наук, ст. наук. співробітник;

Н. В. ЦЬОПА, аспірантка, Державний університет телекомунікацій, Київ

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ РАДІОЗВ'ЯЗКУ ІЗ OFDM ЗА РАХУНОК ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ СИГНАЛЬНО-КОДОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

**Запропоновано метод розв'язання актуального завдання — підвищення швидкості передавання інформації в системах радіозв'язку за рахунок узгодження форми передаваних сигналів і виду модуляції з параметрами каналу зв'язку без додаткового розширення смуги пропускання каналу та збільшення потужності передавача.**

**Ключові слова:** радіозв'язок; радіотракт; ефективність; сигнально-кодові конструкції; міжсимвольна інтерференція; коригувальний код; блоковий код.

### Вступ

Один із головних чинників, котрі впливають на якість радіозв'язку, — це завмирання сигналів, що виникає через багатопроменеве поширення радіохвиль, а також унаслідок нелінійних спотворень сигналу в радіотракті.

При передаванні сигналів багатопроменевими каналами зв'язку активно використовують метод ортогонального частотного розділення з мультиплексуванням (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* — OFDM) [1; 2]. Ця технологія забезпечує такі переваги, як висока стійкість щодо селективних завмирань і висока частотна ефективність.

Побудова систем радіозв'язку (СРЗ) із OFDM передбачає пошук сигнально-кодових конструкцій (СКК), які дозволяють підвищити швидкість передавання інформації за обмежень на енергетику та ширину смуги робочих частот (підвищити частотну ефективність системи) [3].

Більшість відомих СКК базується на використанні сигналів багатопозиційної фазової маніпуляції (ФМ-М), квадратурної амплітудної модуляції (КАМ-М) і амплітудно-фазової модуляції (АФМ-М) [4].

Важливий напрямок підвищення швидкості передавання інформації в СРЗ без зниження енергетичної ефективності полягає у використанні сигнально-кодових конструкцій [5; 6], що являють собою множину сигнальних послідовностей, отриманих на основі завадостійких кодів і ансамблів сигналів зі щільним укладанням. Роль завадостійких кодів можуть відігравати як блокові, так і згорткові коди [7; 8].

### Основна частина

Найбільша ефективність систем передавання із СКК досягається в разі використання згорткових кодів у поєднанні з ансамблями АФМ сигналів. Наприклад, енергетичний виграш, якого вдається досягти в гауссівському каналі, дорівнює

3...6 дБ — залежно від складності об'єднаної системи модуляції та кодування.

Значний інтерес становлять так звані *рознесені сигнали* — біртогональні, симплексні та ортогональні.

Вони характеризуються тим, що зі збільшенням  $M$  відстань між сигнальними точками зростає і, відповідно, зростає енергетична ефективність  $\beta_E$  за рахунок зниження частотної ефективності  $\beta_F$ .

Нехай  $E$  — енергія сигналу. Тоді якщо сигнальні точки візьмемо на лініях, котрі збігаються з ортами, на відстанях  $\sqrt{E}$  від початку координат, то дістанемо систему ортогональних сигналів. Кількість сигналів у такому ансамблі  $M = N$ , де  $N$  — розмірність ансамблю сигналів (кількість вимірів на інтервалі тривалості сигналу).

До *ортогональних сигналів* належать, скажімо, ЧМ-М сигнали, в яких окремі символи передаються відрізками гармонічних коливань із різними значеннями частоти. При цьому сигнал на виході модулятора має вигляд

$$A_{\text{ЧМ}}(t) = a_0 \cos 2\pi(f_i t + \varphi_0),$$

де  $\varphi_0$  — значення початкової фази сигналу.

Такі сигнали застосовують у ширококутових системах передавання інформації.

*Біртогональні сигнали* утворюються за таким правилом: до кожного ортогонального сигналу додається протилежний. Тут кількість сигналів  $M = 2N$ . Найпростіший із біртогональних — це ансамбль при  $M = 4$ . Сигнали мають однакову енергію і містяться на однаковій відстані від початку координат. Як приклад ансамблю біртогональних сигналів розглянемо ансамбль сигналів із чотирьох позиційною фазовою маніпуляцією (ФМ-4). Відстань між найближчими сигнальними точками цього ансамблю дорівнює  $\sqrt{2E}$ , а між протилежними становить  $2\sqrt{E}$ .

*Симплексні сигнали* містяться на однаковій відстані один від одного. У  $N$ -вимірному просторі вони утворюють правильний симплекс, кількість вершин якого  $M = N + 1$ . Зокрема, у двовимірному

му просторі це буде рівносторонній трикутник, а в тривимірному — тетраедр.

Як зазначено в [9], найбільш ефективні сигнальні ансамблі дістають вибором необхідної кількості сигнальних точок із двовимірних нескінченних решіток. При передаванні дискретних повідомлень ансамбль сигналів складається, як правило, із  $M = 2^k$  елементів. При оцінюванні ефективності сигнальної конструкції враховують її середню енергію та відстань між елементами, що визначає завадостійкість ансамблю. Середня енергія визначається як середнє суми квадратів відстаней  $d_i$  від початку координат до  $i$ -ї сигнальної точки

$$E_k = \frac{1}{2^k} \sum_{i=1}^{2^k} d_i^2.$$

Розрізняють *квадратні* та *трикутні* решітки. Для ансамблів на основі квадратних решіток при  $k \geq 4$  можлива апроксимація середньої енергії сигнальної конструкції. У цьому випадку для сигнального ансамблю у вигляді квадрата середня енергія  $\bar{E} = (2/3)2^k$ , для хрестоподібного ансамблю (для непарних  $k$ )  $\bar{E} = (31/48)2^k$ . Оскільки хрестоподібні конструкції ефективніші від квадратних, то є сенс використовувати хрестоподібні конструкції і для парних значень  $k$ . Найкраща фігура, котра має мінімальну середню енергію, є коло. Для ансамблів сигналів, укладених у коло, середня енергія апроксимується значенням  $\bar{E} = (2/\pi)2^k$ , а це ефективніше, ніж квадратна і хрестоподібна конструкції.

Оскільки у двовимірному просторі ущільнене розміщення (а отже, і завадостійкість) забезпечують трикутні решітки, то ансамблі сигналів, які використовують точки таких решіток, на 0,6 дБ ефективніші, ніж ансамблі на основі квадратних решіток.

Графіки, що характеризують залежності  $\beta_E(\beta_F)$  для деяких ансамблів двовимірних багатопозиційних сигналів, наведено на рис. 1. Значення енергетичної ефективності визначалися за кривими завадостійкості  $P_{\text{пом}} = f(Q^2)$  для заданого значення  $P_{\text{пом}} = 10^{-5}$ . При цьому  $v_i \approx v_c = \frac{1}{\tau_i}$ , а також

$$\beta_E = \frac{1}{E/G_0} = \frac{1}{Q^2}; \text{ що ж до частотної ефективності, то вона визначалася згідно з формулою}$$

$$\beta_F = \frac{\log_2 M}{\tau_i \Delta F} = \frac{2 \log_2 M}{N}, \quad (1)$$

де  $N$  — розмірність простору сигналів.

Окрім того, на рис. 1 наведено граничні криві  $\beta_E(\beta_F)$  для неперервного (межа Шеннона), напівнеперервного (ННК) і дискретного симетричного каналу (ДСК).

Розрізняють два класи багатопозиційних сигналів. Перший утворюють сигнали, в яких зі збільшенням  $M$  при фіксованій розмірності  $N$  відстань

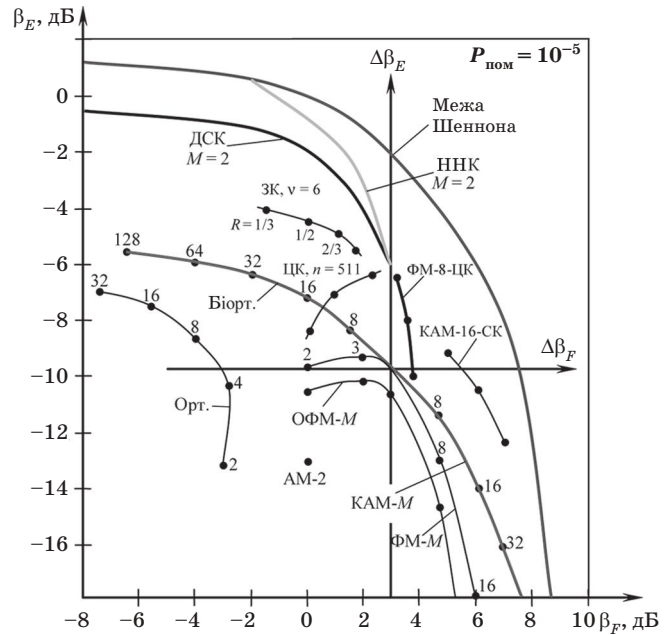


Рис. 1. Графіки енергетичної та частотної ефективності систем радіозв'язку

між сигналами зменшується, супроводжуючись відповідним зниженням енергетичної ефективності  $\beta_E$ . Як приклад таких сигналів наведено криві для ФМ-М і КАМ-М.

Прикладом другого класу сигналів є біртогональні, симплексні та ортогональні сигнали. У таких сигналів зі збільшенням  $M$  відстань між сигнальними точками зростає, і, відповідно, збільшується енергетична ефективність за рахунок зниження частотної ефективності  $\beta_F$ .

Розрахунок енергетичної ефективності пов'язаний із визначенням відношення сигнал/шум і, відповідно, імовірності помилкового приймання сигналу (імовірності помилки).

Для сигналів ФМ-М імовірність помилки при великому відношенні сигнал/шум можна розрахувати за наближеною формулою

$$P_{\text{пом ФМ-М}} \approx 1 - \Phi \left[ \sin \left( \frac{\pi}{M} \sqrt{\frac{E_c \log_2 M}{G_0}} \right) \right], \quad (2)$$

де  $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-t^2/2} dt$  — функція Крампа;  $E_c$  — енергія сигналу.

Завадостійкість приймання сигналів із квадратурною амплітудною маніпуляцією в разі великого відношення сигнал/шум можна оцінювати за допомогою виразу

$$P_{\text{пом КАМ-М}} \approx \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \sum_{i=1, i \neq k}^M \frac{1}{2} \left[ 1 - \Phi \left( \sqrt{\frac{d_{ki}^2}{2G_0}} \right) \right], \quad (3)$$

де  $d_{ki}$  — відстань між сигналами з номерами  $k$  та  $i$ . Для ортогональної системи сигналів з однаковою енергією ймовірність помилки (одна й та сама

при передаванні будь-якого символу) виражається таким інтегралом:

$$P_{\text{пом ЧМ-М}} = 1 - \frac{1}{\sqrt{8\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} [1 + \Phi(y)]^{M-1} \cdot e^{-\left(y - \sqrt{\frac{2E_c}{G_0}}\right)^2} dy.$$

При цьому ймовірність помилки монотонно зменшується зі зростанням відношення сигнал/шум.

Адитивна верхня межа для ймовірності помилки в такій системі оцінюється формулою

$$P_{\text{пом ЧМ-М}} \leq \frac{1}{2}(M-1) \left[ 1 - \Phi\left(\sqrt{\frac{E_c}{G_0}}\right) \right]. \quad (4)$$

Криві залежності коефіцієнта використання потужності сигналу від розмірності  $M$  ансамблю сигналів для сигналів із багатопозиційною частотною, фазовою, відносно фазовою і квадратурною амплітудною маніпуляцією подано на рис. 2. Значення енергетичної ефективності визначалися для заданого значення  $P_{\text{пом}} = 10^{-5}$ .

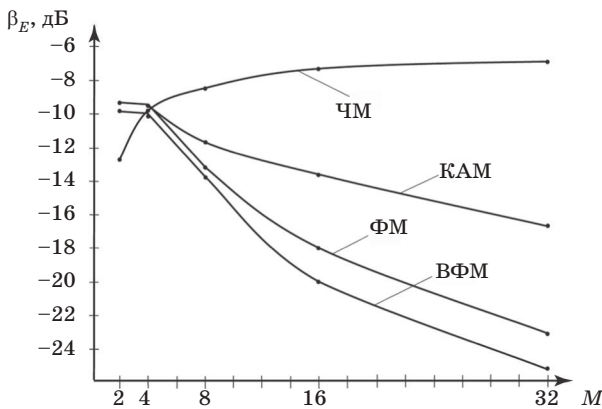


Рис. 2. Енергетична ефективність багатопозиційних сигналів

При порівняльному оцінюванні ефективності систем багатопозиційних сигналів, за еталон доцільно брати систему із сигналами ФМ-4, що належать до класу біортогональних при  $M = 4$ . З-поміж простих систем ця система найефективніша. Якщо початок координат перенести в точку, що відповідає ФМ-4, то в новій системі координат по вертикальній осі буде відлічуватися енергетичний вигреш  $\Delta\beta_E$  розглянутих систем порівняно з ФМ-4, а по горизонтальній осі — вигреш  $\Delta\beta_F$  за питомою швидкістю. Таким чином, усі системи передавання можна умовно поділити на чотири групи, що відповідають чотирьом квадрантам на площині.

1. Малоефективні системи (ІІІ квадрант), що мають відносно ФМ-4 програш за  $\beta_E$  і  $\beta_F$  (наприклад, АМ-2, ЧМ-2).

2. Системи з високою енергетичною ефективністю (ІІ квадрант), що забезпечують вигреш за  $\beta_E$  і програш за  $\beta_F$  (системи передавання з коригувальними кодами).

3. Системи з високою частотною ефективністю (ІV квадрант), що забезпечують вигреш за  $\beta_F$  і програш за  $\beta_E$  (системи з багатопозиційною ФМ та КАМ).

4. Високоєфективні системи (І квадрант), які дозволяють одночасно досягти виграшу за обома показниками ефективності  $\beta_E$  і  $\beta_F$  (сигнально-кодової конструкції).

Повертаючись до рис. 1, зауважимо, що наведені там криві ефективності для циклічного коду (ЦК) і згорткового коду (ЗК) з декодуванням за алгоритмом Вітербі, де  $n$  — довжина кодової послідовності;  $\nu$  — кодове обмеження;  $R$  — швидкість коду, показують: застосування ЦК дозволяє отримати енергетичний вигреш  $\Delta\beta_E = 2...3$  дБ, а ЗК —  $\Delta\beta_E = 5...6$  дБ в обмін на зниження частотної ефективності вдвічі (на 3 дБ). Застосування каскадних кодів дозволяє досягти ще більшого енергетичного виграшу й істотно наблизитися до граничної кривої для двійкових систем. Енергетичний вигреш  $\Delta\beta_E$  від застосування завадостійкого кодування буде тим більший, чим вища вірогідність передавання (чим менше  $P_{\text{пом}}$ ).

Оскільки завдяки сучасній елементній базі витрати на реалізацію пристроїв кодування і декодування значно зменшились, то «вартість» виграшу  $\Delta\beta_E$  за рахунок кодування може бути істотно менша від вартості того самого виграшу, отриманого за рахунок збільшення енергетики каналу зв'язку (потужності передавача або розмірів антен).

Спільне застосування багатопозиційних сигналів і завадостійких кодів (циклічного коду в каналі з ФМ і згорткового коду в каналі з КАМ) дозволяє одночасно отримати вигреш як за енергетичною, так і за частотною ефективністю (або принаймні вигреш за одним із показників).

У разі незалежного розподілу помилок у кодових символах з ймовірністю помилки  $P_{\text{пом}}$  ймовірність того, що виникне помилка кратності  $j$  в кодовій комбінації довжиною  $n$

$$P_j = C_n^j P_{\text{пом}}^j (1 - P_{\text{пом}})^{n-j}.$$

Оскільки код виправляє всі помилки кратності  $s_i = \frac{(d-1)}{2}$  і меншої, то ймовірність отримання кодової комбінації з не виправленими помилками

$$P_{\text{пом КК}} = \sum_{j=s_i+1}^n P_j.$$

При цьому ймовірність помилкового декодування кодової комбінації

$$P_{\text{пом КК}} = \sum_{j=s_i+1}^n C_n^j P_{\text{пом}}^j (1 - P_{\text{пом}})^{n-j}. \quad (5)$$

Тоді показники ефективності системи із СКК визначаються так:

$$\begin{aligned} \beta_E &= \beta_{E_M} + \Delta\beta_{E_{КК}} + \Delta\beta_{E_{МК}}, \\ \beta_F &= \beta_{F_M} - \Delta\beta_{F_{КК}}, \end{aligned} \quad (6)$$



де  $\beta_{EM}$  і  $\beta_{FM}$  — показники ефективності системи модуляції (ансамблю сигналів);

$\Delta\beta_{EKK}$  — енергетичний виграш кодування;

$\Delta\beta_{FKK}$  — втрати частотної ефективності за рахунок кодування (визначаються швидкістю кодування  $R$ );

$\Delta\beta_{EMK}$  — енергетичний виграш від застосування оптимального маніпуляційного коду.

Насамкінець зазначимо, що при побудові високоєфективних систем на основі сигнально-кодових конструкцій основним обмежувальним фактором є неминуче збільшення складності системи. Завдання полягає в тому, аби побудувати систему, яка забезпечує високі показники ефективності за мінімальної (припустимої) складності та вартості системи.

### Висновки

Показано, що головний напрямок підвищення швидкості в СРЗ із OFDM без зниження енергетичної ефективності полягає у використанні сигнально-кодових конструкцій, отримуваних на основі завадостійких кодів і ансамблів сигналів із щільним укладанням. Особливо високої ефективності в широкосмугових системах передавання інформації вдається досягти завдяки використанню згорткових кодів у поєднанні з ансамблями сигналів із КАМ.

### Література

1. Вишневикий, В. М. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / [В. М. Вишневикий, А. И. Ляхов, С. Л. Портной, И. В. Шахнович].— М.: Техносфера, 2005. — 592 с.
2. Григорьев, В. А. Сети и системы радиодоступа / В. А. Григорьев, О. И. Лагутенко, Ю. А. Распаев.— М.: Эко-Трендз, 2005.— 384 с.
3. Волков, Л. Н. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики: учеб. пособие /Л. Н. Волков, М. С. Немировский, Ю. С. Шинаков.— М.: Эко-Трендз, 2005.— 392 с.

С. В. Толюпа, В. С. Наконечный, Н. В. Цюпа

### ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ РАДИОСВЯЗИ С OFDM ЗА СЧЕТ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ СИГНАЛЬНО-КODOVЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Предложен метод решения актуальной задачи — повышения скорости передачи информации в системах радиосвязи за счет согласования формы передаваемых сигналов и вида модуляции с параметром канала связи без дополнительного расширения полосы пропускания канала и увеличения мощности передатчика.

**Ключевые слова:** радиосвязь; радиотракт; эффективность; сигнально-кодовые конструкции; межсимвольная интерференция; корректирующий код; блочный код.

S. V. Tolyupa, V. S. Nakonechniy, N. V. Tsopa

### IMPROVING THE EFFICIENCY OF RADIO COMMUNICATION SYSTEMS IN OFDM BY DETERMINING THE OPTIMAL SIGNAL CODE CONSTRUCTIONS IS VIEWED

Proposed a method of solving an actual problem to increase the data rate in radio communication systems due to the shape matching of the transmitted signals and with the type of modulation parameters of the communication channel without bandwidth expansion and increasing of transmitter power.

**Keywords:** radio communication; radio path; efficiency; signal code constructions; symbol-to-symbol interference; correcting code; block code.

4. Системы подвижной радиосвязи / Пер. с польск. И. Д. Рудинского; под ред. А. И. Ледовского.— М.: Горячая линия—Телеком, 2006.— 536 с.

5. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации / Под ред. А. Г. Зюко.— М.: Радио и связь, 1985.— 272 с.

6. Кувшинов, О. В. Основы теории завадостойкого кодування: навч. посібник / О. В. Кувшинов, О. П. Лежнюк, С. П. Лівенцев.— К.: ВІПІ НТУУ «КПІ», 2001.— 72 с.

7. Ungerboeck, G. Channel coding with multilevel: phase signals / G. Ungerboeck // IEEE Trans.— 1982.— Vol. IT-28, №1.— P. 55–67.

8. Немировский, Э. Э. Полосно-эффективное кодирование и модуляция для гауссовского канала связи. Ч. 1. / Э. Э. Немировский, С. Л. Портной // Зарубежная радиоэлектроника.— 1984.— № 8.— С. 3–18.

9. Портной, С. Л. Сигнально-кодовые конструкции для высокоскоростных модемов / [С. Л. Портной, С. И. Ортюков, Д. А. Флорковский, О. А. Гриднев] // Радиотехника.— 1997.— №2.— С. 91–95.

10. Баушев, С. В. Перспективы развития сигнально-кодовых конструкций для гауссовского канала связи / С. В. Баушев, И. Е. Зайцев, А. А. Яковлев // Зарубежная радиоэлектроника.— 1990.— № 1.— С. 15–31.

11. Баушев, С. В. Построение сигнально-кодовых конструкций с низкой вероятностью ошибки / С. В. Баушев, С. В. Григорьев // Радиотехника.— 1996.— № 12.— С. 12–14.

12. Сайко, В. Г. Адаптивный розподіл підносійних у підканаллах систем OFDMA / В. Г. Сайко, С. В. Толюпа // Зв'язок.— 2012.— № 1(97).— С. 13–17.

13. Сайко, В. Г. Исследование статистических характеристик частотно-селективного канала систем беспроводной широкополосной радиосвязи / В. Г. Сайко, С. В. Толюпа, А. В. Жданенко // Зв'язок.— 2011.— № 4(96).— С. 5–8.

14. Толюпа, С. В. Аналіз методів оцінювання параметрів багатопроменевих каналів зв'язку / С. В. Толюпа, Т. Г. Гурський, А. І. Восколович // Вісник ДУІКТ.— 2011.— Т. 9, № 3.— С. 194–204.

15. Толюпа, С. В. Аналіз існуючих методів забезпечення завадозахищеності засобів радіозв'язку / С. В. Толюпа, О. М. Макаруч // Захист інформації.— 2011.— № 3(52).— С. 5–9.