

**А. В. ШИШАЦЬКИЙ,**

науковий співробітник (Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)

**О. Г. ЖУК,** кандидат технічних наук

**М. В. БОРОЗНЮК**

**І. Ю. РУБЦОВ**

(Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації, м. Київ)

## Порівняльний аналіз ефективності сучасних сигнально-кодових конструкцій для систем військового радіозв'язку

За показниками спектральної та енергетичної ефективності проведений аналіз сучасних сигнально-кодових конструкцій, що використовуються в сучасних системах радіозв'язку.

По показателям спектральної і енергетичної ефективності проведений аналіз сучасних сигнально-кодових конструкцій, которые применяются в современных системах радиосвязи

Для систем військового радіозв'язку завадозахищеність засобів є не тільки бажаною властивістю, але питанням життєво важливим, а тому обов'язковим. Відомими вченими вже проаналізовано ефективність різних методів підвищення завадозахищеності [1, 2], доведено, що універсального найкращого методу не існує, кожен з них є доцільним тільки у визначених умовах для конкретних параметрів радіозасобів.

Розвиток систем радіозв'язку привів до появи принципово нового методу підвищення завадозахищеності систем радіозв'язку – сигнально-кодових конструкцій. Приклад сигнально-кодових конструкцій наведено на рис. 1.

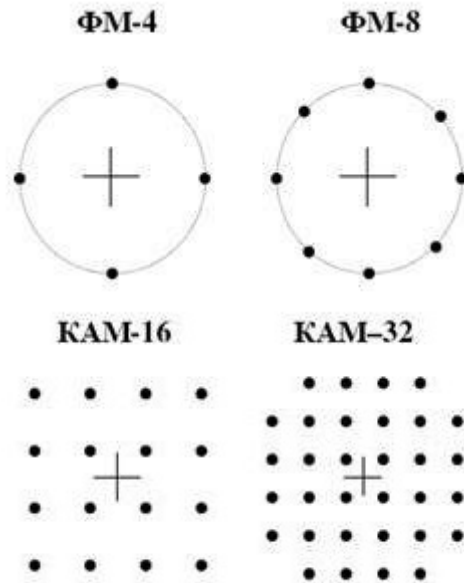


Рис. 1. Зовнішній вигляд основних сигнально-кодових конструкцій

Тому порівняльний аналіз ефективності сигнально-кодових конструкцій для сучасних систем військового радіозв'язку як комбінованого методу покращення ефективності радіозасобів є питанням важливим і актуальним.

Важливими характеристиками системи радіозв'язку будь-якого призначення є енергетична та спектральна ефективність. Як універсальний показник енергетичної ефективності систем цифрового радіозв'язку прийнято розглядати величину  $h_b^2 = E_b/N_0$ , що характеризує енергетичні витрати  $E_b$  на передачу одного біта інформації для забезпечення величини середньої ймовірності помилкового приймання одного символу переданого повідомлення, що не вище заданого значення в умовах впливу адитивного білого гаусівського шуму зі спектральною щільністю середньої потужності  $N_0/2$  [2].

Показником спектральної ефективності  $\gamma$  прийнято розглядати питому швидкість передачі інформації, що визначається як відношення  $\gamma = I/F$  [біт/с·Гц] швидкості передачі інформації  $I$  до ширини смуги робочих частот  $F$  [1, 2].

Зв'язок показників енергетичної та спектральної ефективності для граничного випадку передачі зі

швидкістю, рівною пропускній здатності безперервного каналу, як відомо, визначається відношенням [2]

$$h_b^2 = \frac{2^\gamma - 1}{\gamma}$$

Відповідна залежність (межа Шенона) зображена у вигляді кривої на рис. 2, де також показані значення залежності енергетичної ефективності від спектральної ефективності при різних методах передачі без кодування, що відповідають величині ймовірності помилки  $p_b = 10^{-5}$ . З графіка видно, що навіть при значній величині  $m$  об'єму алфавіту ортогональних або біортогональних сигналів (практично те ж, що для симплексного ансамблю сигналів) результати досить далекі від граничних, хоча показники ефективності при такому виборі сигналів, як відомо, зі зростанням значення  $m$  асимптотично наближаються до межі Шенона.

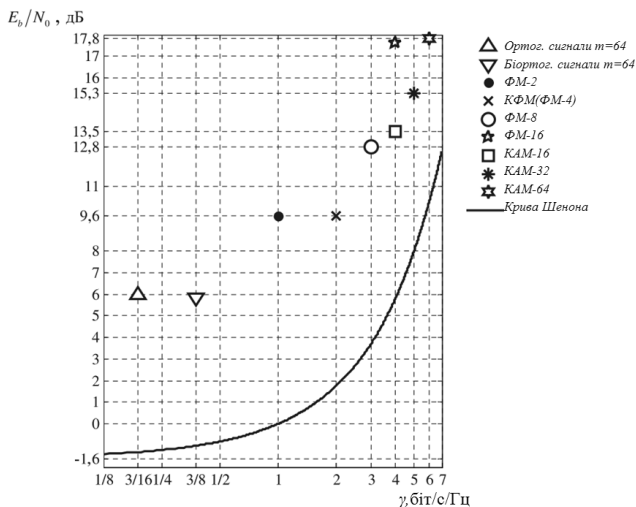


Рис. 2. Показники енергетичної та спектральної ефективності при передачі інформації без кодування

Вибір методу двійкової фазової модуляції ФМ-2, що мінімізує значення ймовірності  $p_b$  при оптимальному посимвольному прийманні, не призводить до додаткових (по відношенню до ортогонального ансамблю  $m = 64$ ) відчутних енергетичних втрат (близько 3,6 дБ), проте істотно підвищує спектральну ефективність, хоча питома швидкість передачі при цьому досягає значення всього лише  $\gamma = 1$ .

Намагання значно збільшити показник  $\gamma$  шляхом використання багатопозиційної фазової модуляції (ФМ-М) типу ФМ-4, ФМ-8, ФМ-16 та ін., за виключенням випадку модуляції типу ФМ-4 (метод квадратурної фазової модуляції КФМ), призводить до катастрофічних енергетичних втрат, рівень яких вдається знизити завдяки переходу до методу квадратурної амплітудної модуляції КАМ (КАМ-8, КАМ-16 тощо).

Використання завадостійкого кодування може привести до підвищення енергетичної ефективності, проте в умовах збереження заданої швидкості передачі інформації це вимагає перетворення частоти надходження двійкових символів вихідних повідомлень на більш високу частоту надходження кодових символів, що залежить від швидкості коду  $R$ , що, у свою чергу, при

заданому виді модуляції супроводжується зниженням спектральної ефективності [2, 3].

У той же час, для багатьох випадків виникає задача істотного підвищення саме спектральної ефективності, що, очевидно, крім деяких винятків (для випадку використання модуляції типу ФМ-4), призведе до різкого зниження енергетичної ефективності. Досягти розумного компромісу між вказаними вимогами є можливим шляхом використання складених сигналів, елементарні сигнали яких побудовані на основі спектрально ефективних видів модуляції типу ФМ-М та КАМ у поєднанні з додатковою надлишковістю у повідомленні, що передається, методами каналного кодування [3]. При цьому енергетична ефективність системи передачі визначається безпосередньо виглядом спектра взаємних евклідових відстаней між сформованими складеними сигналами, а кодування та модуляцію вже не можна розглядати опосередковано одне від одного, тому говорять про деяку єдину процедуру сигнального кодування, або кодової модуляції, кінцевим результатом якої є формування сигнально-кодових конструкцій (СКК) [2, 3].

Одним з найбільш поширених видів СКК є решітчасті конструкції, які формуються в результаті решітчастоткової модуляції РКМ (*trellis coded modulation TCM*) [4].

На рис. 3 наведені результати моделювання залежностей ймовірності  $p_b$  від відношення  $E_b/N_0$  для РКМ, а також відповідна залежність для випадку передачі без кодування при тому ж значенні питомої швидкості передачі  $\gamma = 2$  (ФМ-4). Аналогічні залежності для випадку використання СКК на основі решітчастого кодера з параметрами: кількість станів кодера  $Q = 8$ , кількість кодових символів  $n = 4$ , кількість вхідних символів  $k = 3$  та ансамблю сигналів КАМ-16 – показані на рис. 4, де також проводиться порівняння з передачею без кодування при тій ж питомій швидкості передачі  $\gamma = 3$  (ФМ-8).

Як видно з наведених залежностей, використання модуляції РКМ дозволяє досягти істотного зниження енергетичних втрат, що викликані використанням спектрально ефективних методів модуляції без кодування.

Як видно з результатів моделювання, що показані на рис. 4, ускладнення кодувального пристрою (збільшення кількості чарунок пам'яті  $\nu$ ) при РКМ несуттєво відбивається на енергетичній ефективності. У будь-якому випадку вибір значень  $\nu$  більше 2-3 не дає істотного ефекту.

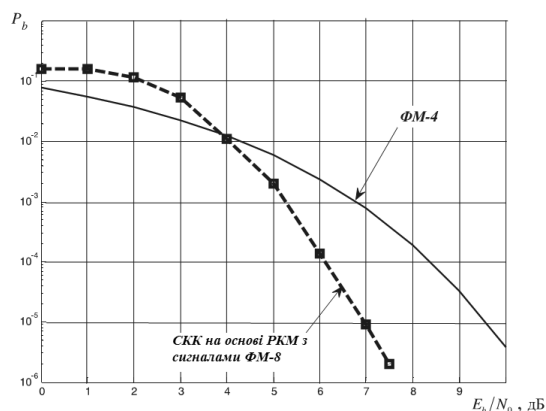


Рис. 3. Порівняння РКМ на основі ФМ-8 з передачею без кодування

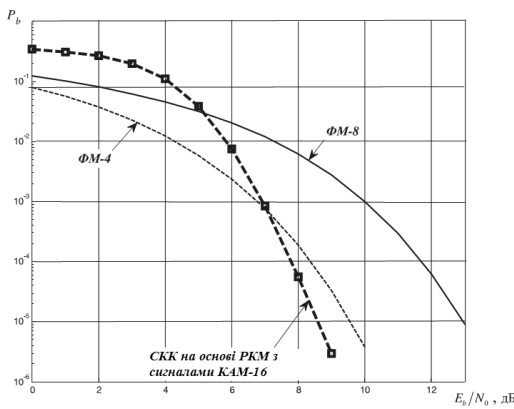


Рис. 4. Порівняння РКМ на основі КАМ-16 з передачею без кодування

Крім того, показники ефективності РКМ досить далекі від потенційно можливих, що визначаються межею Шенона.

Необхідно звернути увагу на те, що решітчастий кодер, по суті, є  $m$ -ічним кодером, тому доцільно для побудови СКК використовувати широко відомий недвійковий блоковий код Ріда–Соломона (РС) [2, 3]. Наприклад, використання коду РС у поєднанні з методом модуляції КАМ-64 та кодуванням двійкових повідомлень відносно простим 64-ічним кодом РС вигляду (63, 53) забезпечує значення ймовірності  $p_b = 10^{-5}$  при  $E_b/N_0 \approx 14,3$  дБ.

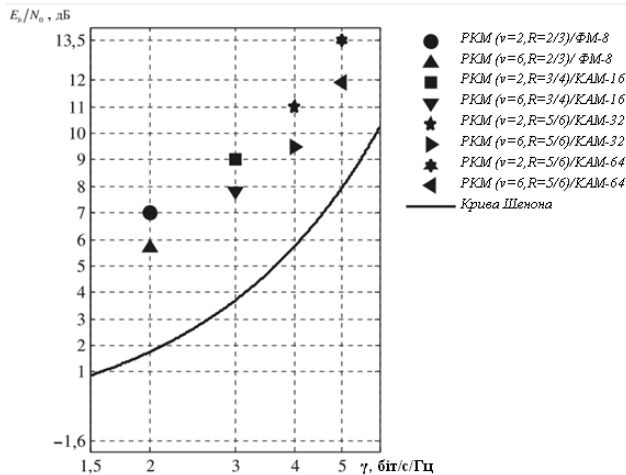


Рис. 5. Показники енергетичної та спектральної ефективності СКК на основі РКМ

Така СКК, що має спектральну ефективність  $\gamma = (53/63)\log_2 64 \approx 5,05$ , як видно з рис. 5, має таку ж саму енергетичну та спектральну ефективність, що й РКМ на основі КАМ-64. Подібний метод блокового недвійкового кодування можливо узагальнити та кодувати блок з  $K$  двійкових символів за допомогою  $J = \log_2 m$  двійкових компонентних кодерів [5] однієї довжини  $N$ , спільно формуючи  $m$ -ічні символи, де  $K = \sum_{j=1}^J K_j$ . Така схема СКК дозволяє формувати ансамбль з  $m = 2^K$  складених сигналів, кожний з яких містить  $N$  елементарних сигналів. При цьому вибір компонентних кодів та параметра  $K_j$  може бути заснований на врахуванні

взаємних евклідових відстаней між сигналами КАМ. На цьому принципі засновано побудову багаторівневої кодової модуляції БКМ (MultiLevel Coded Modulation MLCM) [6].

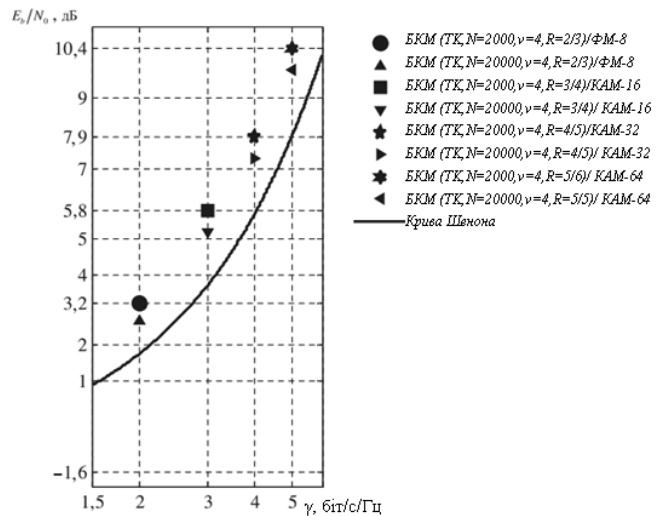


Рис. 6. Показники енергетичної та спектральної ефективності СКК на основі БКМ

Як компонентні коди можуть бути використані будь-які блочні коди. Для прикладу на рис. 5 наведені показники енергетичної та спектральної ефективності СКК на основі БКМ, де як компонентні коди використані турбо-коди (ТК), побудовані на основі рекурсивного згорткового кодера з  $v = 4$  чарунками пам'яті [7].

Як видно з рис. 6, подібні СКК мають помітний енергетичний вигравш у порівнянні з СКК на основі РКМ, хоча їх істотним недоліком є складність реалізації алгоритму декодування, який, як правило, передбачає використання більшої кількості компонентних декодерів. Наприклад, БКМ з ТК для сигналів КАМ-64 вимагає використання п'яти декодерів ТК.

Методи РКМ та БКМ засновані на врахуванні кодером взаємних евклідових відстаней ансамблю сигналів модулятора. Альтернативним підходом, що не враховує такі відстані, як і в розглянутому вище кодуванні кодом РС в поєднанні з КАМ, є застосування кодування, орієнтованого на модуляцію сигналів ФМ-2 і ФМ-4 у поєднанні з недвійковою модуляцією спектрально ефективними сигналами ФМ-М та КАМ. Стимулом до цього, насамперед, є забезпечення прийнятної складності реалізації декодування на основі застосування розроблених і широко використовуваних декодерів.

При цьому двійкові кодові символи перед модуляцією піддають операції перемежування, глибина якого визначається величиною  $\log_2 m$ . Тоді на вхід модулятора надходить потік двійкових каналних символів, які наближено можна вважати статично незалежними. При цьому вибір кожного з  $m$  сигналів модулятора відбувається з ймовірністю, близькою до величини  $1/m$ .

Крім того, при вказаних вище умовах вихідні двійкові значення демодулятора можуть утворюватися шляхом прийняття «м'яких» незалежних рішень про кожен з  $\log_2 m$  таких символів. Як «м'які» рішення можуть

використовуватися апостеріорні ймовірності символів. У результаті після депережування «м'яких» рішень демодулятора на вхід двійкового декодера надходить потік «м'яких» рішень про передані двійкові кодові символи. На цьому заснований метод [6], що отримав назву кодової модуляції з бітовим перемережуванням КМБП (bit-interleaved coded modulation BICM).

Такий метод знайшов широке використання в сучасних системах зв'язку завдяки наявності ефективних кодів та розроблених для них декодерів з «м'яким» входом. До таких кодів насамперед відносяться ТК та коди з малою щільністю перевірок на парність (Low-Density Parity-Check LDPC), або низькощільнісні коди [8]. Наприклад, в цифровому телевізійному мовленні стандартів DVB-T2, DVB-S2, DVB-C2 саме таким чином поєднуються сигнали з модуляціями типу ФМ-М та КАМ та двійкове кодування низькощільнісним кодом. Іншим прикладом служить безпроводна система мобільного доступу стандарту IEEE 802.16e/m (Mobile WiMax/WiMax 2), де використовуються ТК.

Як приклад на рис. 7 наведені результати моделювання залежностей ймовірності  $p_b$  від відношення  $E_b/N_0$  для КМБП з ТК стандарту IEEE 802.16e/m.

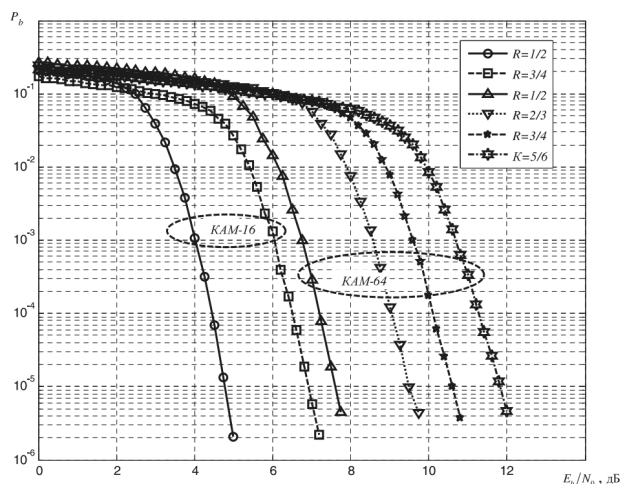


Рис. 7. Завадостійкість КМБП з ТК стандарту IEEE 802.16e/m

### Висновки

Як показує проведений аналіз, історично склався погляд про переваги СКК, що засновані на використанні спектрально ефективних методів модуляції, проте модуляція типу ФМ-М та КАМ у поєднанні з алгоритмами кодування, що забезпечують мінімальне значення евклідової відстані ансамблів сигналів, що формуються, є, безумовно, найкращим поєднанням. При цьому поширена думка про переваги СКК саме на основі РКМ може бути скоригована за результатом проведеного вище аналізу ефективності СКК на основі БКМ, оскільки в

останньому випадку вдається забезпечити ефективність, що досить близька до границі Шенона.

З іншого боку, врахування складності реалізації декодувальних пристроїв призводить до висновку про доцільність розгляду альтернативних методів побудови СКК, заснованих на застосуванні добре розроблених методів кодування, орієнтованих на модуляцію сигналів ФМ-2 і ФМ-4, в поєднанні з МФМ та КАМ. До таких СКК відносяться, наприклад, конструкції на основі кодової модуляції з бітовим перемережуванням в поєднанні з турбо-кодами або кодами з малою щільністю перевірок на парність.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Банкет В. Л. Сигнально-кодовые конструкции в телекоммуникационных системах / В. Л. Банкет. – Одесса : Фенікс. – 180 с.
2. Кувшинов, О. В. Теорія електричного зв'язку. Ч. 2: Основи теорії завадостійкості, кодування та інформації : підруч. [Текст] / О. В. Кувшинов, С. П. Лівенцев, О. П. Лежнюк [та ін.]. – К. : ВПІ НТУУ «КПІ», 2008. – 286 с.
3. Волков, Л. Н. Основы цифровой радиосвязи : базовые методы и характеристики : учеб. пособие [Текст] / Л. Н. Волков, М. С. Немировский, Ю. С. Шинаков. – М. : Эхо Трендз, 2005.
4. Складар, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение [Текст] / Б. Складар ; пер. с англ. – М. : ИД Вильямс, 2003.
5. Зяблов, В. В. Высокоскоростная передача информации в реальных каналах [Текст] / В. В. Зяблов, Д. Л. Коробков, С. Л. Портной. – М. : Радио и связь, 1991. – 288 с.
6. Wachsmann, U. Multilevel codes: Theoretical concepts and practical design rules [Text] / U. Wachsmann, R.F.H. Fischer, J.B. Huber // IEEE Transactions On Information Theory. – July 1999. – Vol. 45. – № 5. – P. 1361–1391.
7. Золотарёв, В. В. Помехоустойчивое кодирование : методы и алгоритмы : справ. [Текст] / В. В. Золотарёв, Г. В. Овечкин. – М. : Горячая линия–Телеком, 2004.
8. Морелос-Сарагоса, Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение [Текст] / Р. Морелос-Сарагоса; пер. с англ. – М. : Техносфера, 2005.

**Рецензент М. І. Луханін**, д-р техн. наук, проф.,  
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та  
військової техніки Збройних Сил України, м. Київ