

## ПОБУДОВА СИГНАЛЬНО-КODOВИХ КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ БАГАТОПРОМЕНЕВИХ КАНАЛІВ РАДІОЗВ'ЯЗКУ

**Толюпа С.В. Побудова сигнально-кодових конструкцій для багатопроменевих каналів радіозв'язку.** Вирішується завдання побудови високоефективної системи радіозв'язку (СРЗ) при мінімальній складності і вартості. Основним напрямком підвищення швидкості в СРЗ з OFDM без зниження енергетичної ефективності є використання сигнально-кодових конструкцій (СКК). Пропонується оптимальні параметри OFDM-СКК визначати для випадку передачі інформації по каналу зв'язку із урахуванням нелінійних спотворень сигналу в радіотракті.

**Ключові слова:** СИСТЕМА РАДІОЗВ'ЯЗКУ, OFDM, СИГНАЛЬНО-КОДОВА КОНСТРУКЦІЯ

**Толюпа С.В. Построение сигнально-кодовых конструкций для многоручевых каналов радиосвязи.** Решается задача построения высокоэффективной системы радиосвязи (СРС) при минимальной сложности и стоимости. Основным направлением повышения скорости в СРС с OFDM без снижения энергетической эффективности является использование сигнально-кодовых конструкций (СКК). Предлагается оптимальные параметры OFDM-СКК определять для случая передачи информации по каналу связи с учетом нелинейных искажений сигнала в радиотракте.

**Ключевые слова:** СИСТЕМА РАДИОСВЯЗИ, OFDM, СИГНАЛЬНО-КОДОВАЯ КОНСТРУКЦИЯ

**Toliupa S.V. Construction of signal - code structures for multipath channel radio.** The task of building of the high - efficiency radio system at minimum complication and cost decides. The main focus of increasing speed in radio systems with OFDM without compromising energy efficiency is the use of signal - code structures (SCS). Suggested optimum parameters OFDM - SCS to determine if transmission of information over a communications channel, taking into account nonlinear distortion signal radio line.

**Keywords:** RADIO SYSTEM, OFDM, SIGNAL-CODE STRUCTURES.

Одними з основних факторів, що впливають на якість радіозв'язку, є завмирання сигналів, які виникають внаслідок багатопроменевого розповсюдження радіохвиль, а також нелінійні спотворення сигналу в радіотракті. При передачі сигналів багатопроменевими каналами зв'язку широко використовується метод ортогонального частотного розділення з мультиплексуванням (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* – OFDM) [1,2]. Основними перевагами даної технології є висока стійкість відносно селективних завмирань, а також висока частотна ефективність. При побудові систем радіозв'язку (СРЗ) із OFDM велика увага приділяється питанням побудови сигнально-кодових конструкцій (СКК), які дозволяють підвищити швидкість передачі інформації при обмеженнях на енергетику та ширину смуги робочих частот (підвищити частотну ефективність системи). Підвищення частотної ефективності СРЗ із OFDM за рахунок узгодження форми переданих сигналів і виду модуляції з параметрами каналу зв'язку без додаткового розширення смуги пропускання каналу і збільшення потужності передавача є досить актуальним завданням.

Основним напрямком підвищення швидкості передачі інформації в СРЗ без зниження енергетичної ефективності є використання сигнально-кодових конструкцій [3], що представляють собою множину сигнальних послідовностей, отриманих на основі завадостійких кодів і ансамблів сигналів із щільним укладанням. В якості завадостійких кодів можуть застосовуватися як блокові, так і згорткові коди [4]. Найбільша ефективність систем передачі з СКК досягається при використанні згорткових кодів у сполученні з ансамблями АФМ-сигналів. Їх енергетичний виграв у гаусовському каналі становить 3...6 дБ залежно від складності об'єднаної системи модуляції і кодування.

Аналіз ефективності СРЗ показує, що використання багатопозиційної модуляції хоча і дозволяє підвищити швидкість передачі в порівнянні з двійковою модуляцією, але не дозволяє наблизитися до пропускної здатності ні за частотною, ні за енергетичною ефективністю. Використання ж коригуючих кодів разом із двійковою модуляцією дозволяє наблизитися до пропускної здатності, близької до границі Шеннона.

У реальних багатопроменевих каналах зв'язку крім адитивного шуму виникає міжсимвольна інтерференція (МСІ), викликана пам'яттю каналів. Реакція каналу на послідовність вхідних сигналів викликає взаємне накладення сигналів на виході каналу.

Якщо нормувати за потужністю амплітудно-частотну характеристику каналу, то можна сказати, що МСІ призводить до значної зміни відстаней між сигналами на виході каналу і, що особливо важливо, до зменшення мінімальної відстані між ними. При синтезі сигналів і кодів для каналів із МСІ цей ефект, як правило, не враховується, тобто в якості вхідних сигналів вибираються такі, які погоджені з ідеальним каналом без МСІ. Однак МСІ прагнуть враховувати при синтезі оптимального приймача (декодера). Широко відомим рішенням такого роду є алгоритм Вітербі і його модифікація, яка враховує згорткове кодування [5].

Розглянемо підхід до кодування в каналах із МСІ, оснований на синтезі таких СКК, які враховують “деформацію” простору сигналів при передачі по реальному каналу [6]. Основою цього підходу є можливість перетворення каналів із МСІ в сукупність гаусових каналів без пам’яті, тобто без МСІ, але які відрізняються один від одного скалярним коефіцієнтом передачі або відношенням сигнал/шум. Сутність методики полягає в побудові СКК з оптимальними за критерієм максимуму частотної ефективності параметрами при обмеженні на значення ймовірності помилкового приймання сигналів в умовах селективних завмирань і нелінійних спотворень.

**Постановка задачі.** *Задано:* параметри передавального пристрою і каналу зв’язку  $\Psi = \{\psi_i\}$ ,  $i = 1, 10$ , де  $\psi_1 \dots \psi_{10}$  – потужність корисного сигналу; відношення сигнал/шум; вид модуляції; швидкість передачі інформації; смуга пропускання каналу зв’язку; розмірність ансамблю сигналів; коефіцієнт нелінійних спотворень сигналу в радіотракті; довжина кодової комбінації; швидкість коригуючого коду; величина кодової відстані.

**Необхідно:** побудувати OFDM-СКК, яка максимізує частотну ефективність СРЗ  $\beta_F$  при виконанні обмеження на ймовірність помилкового приймання сигналів  $P_{\text{пом}} \leq P_{\text{пом доп}}$ .

**Обмеження:** розмірність ансамблю сигналів  $2 \leq M \leq 256$ ; вид коригування – згорткові коди зі швидкістю  $R = 0,5 - 0,9$ ; ймовірність помилкового приймання сигналів  $P_{\text{пом}} \leq 10^{-5}$ .

Завдання визначення параметрів СКК з максимальними показниками частотної ефективності зводяться до типової оптимізаційної задачі. Система рівнянь для розв’язання оптимізаційної задачі має вигляд:

$$\begin{cases} \beta_F = F_1(v_i, \Delta F, M, K_3, n, R, d) = \max; \\ P_{\text{пом}} = F_2(P_c, M, n, R, d) \leq P_{\text{пом доп}} \end{cases}$$

де  $n$  – довжина кодової комбінації;  $P_c$  – потужність сигналу;  $M$  – розмірність ансамблю сигналів;  $R$  – швидкість коригуючого коду;  $d$  – величина кодової відстані.

**Методика вибору OFDM-СКК для систем радіозв’язку** складається з наступних етапів.

**Введення вихідних даних.** Вводяться параметри передавального пристрою і каналу зв’язку  $\Psi = \{\psi_i\}$ , а також значення допустимої величини ймовірності помилкового приймання сигналів  $P_{\text{пом доп}}$ .

**Вибір кількості піднесучих.** При проходженні групового сигналу з OFDM через нелінійні радіотракти радіо засобів порушується ортогональність піднесучих, що призводить до їх взаємного впливу і, в підсумку, до зниження завадостійкості приймання сигналів.

**Оцінка передатної характеристики каналу зв’язку.** На даному етапі за допомогою методу, запропонованого в [7], оцінюється стан багатопроменевого каналу зв’язку.

**Перетворення каналу з міжсимвольними спотвореннями в сукупність гаусівських каналів без пам’яті.** В реальних частотно-обмежених каналах зв’язку крім адитивного шуму виникає МСІ, викликана пам’яттю каналів. Реакція каналу на послідовність вхідних сигналів викликає взаємне накладення сигналів на виході каналу. Якщо нормувати за потужністю амплітудно-частотну характеристику каналу, то можна сказати, що МСІ призводить до значної зміни відстаней між сигналами на виході каналу і, що особливо важливо, до зменшення мінімальної відстані між ними.

У гаусовського каналу із МСІ (ГКМСІ) вхід і вихід пов'язані виразом  $Z = K_h X + B$ , де  $X$  – відліки переданого сигналу на вході каналу;  $B$  – відліки білого гаусівського шуму (БГШ);  $K_h$  – матриця каналу ( $L_0 \times L$ ), елементами якої є компоненти вагової послідовності  $\{h_n\}_{n=0}^{l-1}$  [6]. При цьому параметр  $l$  визначає пам'ять каналу, оскільки кожний відлік сигналу на вході являє собою лінійну комбінацію  $l$  переданих відліків. Якщо тривалість (кількість відліків) захисного інтервалу  $l_0$  більше або дорівнює пам'яті каналу  $l-1$ , то блоки на виході каналу перекриваються. Таким чином, умова  $l_0 \geq l$  є умовою відсутності міжблокової інтерференції. Довжина блоку на виході більше, ніж на вході, і дорівнює  $L_0 = L + l - 1$ .

Для такого каналу справедливо наступне **твердження**. Якщо потужність БГШ на виході ГКМСІ дорівнює  $P_{\text{ш}}$ , а середня потужність сигналу на його виході обмежена величиною  $P_{\text{сеп}}$ , то пропускна здатність ГКМСІ, власні значення якого  $|K_0| \geq |K_1| \geq \dots \geq |K_{L-1}|$ , дорівнює

$$C = v_0 \frac{1}{L} \sum_{i=0}^M \frac{1}{2} \log_2 \left[ |K_i|^2 \frac{L}{M} \left( \frac{P_{\text{ш}}}{P_{\text{сеп}}} + \frac{1}{L} \sum_{m=0}^M \frac{1}{|K_m|^2} \right) \right]; v_0 = \frac{L}{L_0} = \frac{1}{1 + l_0 / L},$$

де  $v_0$  – відносна швидкість передачі при введенні захисних інтервалів між сигнальними блоками;  $M \leq L - 1$  – найбільше число, для якого вхідна потужність

$$P_M = P_{\text{сеп}} \frac{L}{M} + P_{\text{ш}} \left[ \frac{L}{M} \sum_{m=0}^M \frac{1}{|K_m|^2} - \frac{1}{|K_M|^2} \right] > 0.$$

При  $L \rightarrow \infty$  ГКМСІ перетворюється в гаусівський канал без пам'яті (ГКБП), входом якого є стаціонарна випадкова послідовність  $\{Z_K\}_{K \rightarrow \infty}$ , а виходом – стаціонарна випадкова послідовність  $\{\tilde{Z}_K\}_{K \rightarrow -\infty}$ . У результаті описаного вище перетворення ГКМСІ в сукупність незалежних паралельних ГКБП, вхід і вихід кожного каналу пов'язані виразом

$$Z_i = K_i X_i + B_i, \quad i = \overline{0, L-1}.$$

**Визначення параметрів передспотворення сигналів.** Розглянемо підхід до кодування в каналах з МСІ, оснований на синтезі таких сигнально-кодових конструкцій, які враховують “деформацію” простору сигналів при передачі по реальному каналу.

Для оптимізації параметрів групового сигналу з OFDM вводиться передспотворення сигналу на передачі  $X_i = \frac{1}{|K_i|} \xi_i$  і корекція на прийомі  $\xi_i = b_i Z_i$ , де  $b_i = e^{-j \arg K_i}$ .

**Визначення середньої потужності сигналу на виході підканалу.** Якщо вихідний канал має істотну нерівномірність амплітудно-частотної характеристики в смузі Найквіста, то отримані канали можуть бути досить різні. Розходження характеристик підканалів повинне враховуватися при побудові сигналів і СКК.

Як правило, у паралельних підканалах із передспотвореннями використовуються різні алфавіти сигналів з фазовою (ФМ) та з квадратурною амплітудною модуляцією (КАМ), але з тою ж самою мінімальною відстанню Евкліда  $d$ , що не залежить від номера підканалу  $i$ . Необхідність розгляду цього варіанта пояснюється можливістю побудови на його основі ефективних сигналів і сигнально-кодових конструкцій [5].

Нехай  $0 < m_1 < m_2 < m_3 < \dots < m_Q \leq M_1$  – деяке розбиття послідовності номерів підканалів. Покладемо, що в підканалі з номерами від  $m_{j-1}$  до  $m_j - 1$  ( $m_0 = 0$ ) використовується алфавіт КАМ з  $2^{q_j}$  символами,  $1 \leq j \leq Q$  причому  $q_1 > q_2 > \dots > q_Q \geq 1$ . Це означає, що алфавіти з більшою кількістю точок використовуються в підканалах з більшим відношенням сигнал/шум або, що те ж саме, з більшими власними значеннями  $K_i$ .

Середня потужність на виході  $i$ -го підканалу має вигляд

$$P_{\text{вих } i} = P_{q_j} / |K_i|^2, \quad m_{j-1} \leq i \leq m_j - 1, \quad (1)$$

де  $P_{q_j} = d_E^2 x(2^{q_j})$  – середня потужність сигналу КАМ на виході підканалів із номерами

$$m_{j-1} \text{ до } m_j - 1, \text{ а } x(q) = \begin{cases} (2^q - 1/2) / 6, & q = 2n - 1, \\ (2^q - 1) / 6, & q = 2n, \quad n = 1, 2, \dots \end{cases}.$$

Середня потужність на виході групового каналу з OFDM обмежена величиною  $P_{\text{сеп}}$ :

$$\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{M-1} P_{\text{вих } i} \leq P_{\text{сеп}}. \quad (2)$$

Підставляючи вираз (1) в формулу (2), одержуємо:

$$d_E^2 \sum_{j=1}^Q x(2^{q_j}) \frac{1}{N} \sum_{i=m_{j-1}}^{m_j-1} \frac{1}{|K_i|^2} \leq P_{\text{сеп}}.$$

Враховуючи, що  $\frac{1}{L} \sum_{i=m_{j-1}}^{m_j-1} \frac{1}{|K_i|^2} = f_m(m_j) - f_m(m_{j-1})$ , де  $f_L(M) = (1/L) \sum_{i=0}^{M-1} 1/|K_i|^2$ , одержуємо:

$$d_E^2 \sum_{j=1}^Q x(2^{q_j}) [f_L(m_j) - f_L(m_{j-1})] \leq P_{\text{сеп}}.$$

**Розрахунок максимальної швидкості передачі у кожному підканалі.** При фіксованому  $q_j$  цей параметр визначається виразом:  $v(q_j, P_{q_j} / P_{\text{ш}}) = v(q_j, d_E^2 \varphi(2^{q_j}) / P_{\text{ш}})$ .

**Визначення максимальної швидкості передачі групового сигналу.** Сумарна швидкість у каналі з OFDM задається виразом  $v = v_0 \frac{1}{N} \sum_{j=1}^Q s_j v(q_j, d_E^2 x(2^{q_j}) / P_{\text{ш}})$ , де  $s_j = m_j - m_{j-1}$ ,  $m_0 = 0$  – кількість підканалів з однаковим алфавітом КАМ.

Оптимізація розглянутого варіанту по швидкості при обмеженій середній потужності сигналу на вході каналу зводиться до вибору оптимального розбиття паралельних ГКБП на групи з однаковою швидкістю, оптимального вибору алфавітів КАМ і мінімальної відстані  $d$  у них. Максимально можлива швидкість для каналу з OFDM з передспотвореннями та довільними алфавітами КАМ у кожному з паралельних підканалів за умови, що мінімальна відстань у всіх алфавітах постійна і дорівнює  $d$ , задається виразом:

$$v_{\text{max}} = \max_{d>0} \max_{s_j=1,2,\dots} \max_{q_j=1,2,\dots} v_0 \frac{1}{N} \sum_{j=1}^Q m_j v \left( q_j, \frac{d_E^2 x(2^{q_j})}{P_{\text{ш}}} \right)$$

при обмеженнях, наведених вище, на припустиму середню потужність сигналу на вході каналу з OFDM; а  $s_j = m_j - m_{j-1}$ ,  $m_0 = 0$ ,  $0 < m_1 < m_2 < \dots < m_Q \leq M_1$  – розбиття множини підканалів на групи з  $v_j$  паралельних каналів, у кожному з яких використовується однаковий алфавіт КАМ з середньою потужністю  $P_{q_j} = d_E^2 x(2^{q_j})$ .

Таким чином, ми одержали східчасту конструкцію, у якій переданий блок у результаті віртуальних перетворень на передавальному і приймальному боці перетворить систему до  $N$  паралельних каналів, з яких  $m_1$  модулюються КАМ-2,  $m_2$  сигналів модулюються КАМ-4,  $m_3$  сигналів модулюються КАМ-8 і т.д. Останні  $m_Q$  сигналів модулюються КАМ-  $2^Q$ .

Тепер на дану сигнальну конструкцію можна “накладати” коригуючий код і одержувати СКК. У принципі можливе застосування кожної з відомих блокових або згорткових СКК. Необхідна лише досить проста модифікація СКК, яка враховує різницю алфавітів у послідовних символах. У результаті виходить так звана східчаста СКК, яка кодується і декодується в межах одного блоку перетворення сигналів.

**Висновки.** При побудові високоефективних систем на основі СКК основним обмежуючим фактором є неминуче збільшення складності системи.

Завдання полягає в тому, щоб побудувати систему, яка задовольняє високим показникам ефективності, при мінімальній (припустимій) складності і вартості системи. Основним напрямком підвищення швидкості в СРЗ з OFDM без зниження енергетичної ефективності є використання СКК, які представляють собою множину сигнальних послідовностей, отриманих на основі завадостійких кодів і ансамблів сигналів з щільною укладкою.

У запропонованій методиці оптимальні параметри OFDM-СКК визначаються для випадку передачі інформації по каналу зв'язку в умовах селективних завмирань із урахуванням нелінійних спотворень сигналу в радіотракті. Рациональні параметри СКК для конкретного стану каналу зв'язку визначаються зі скінченної кількості допустимих варіантів, що дозволяє спростити практичну реалізацію модемного обладнання адаптивних систем радіозв'язку.

### **Література**

1. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В.М. Вишнеvский, 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.: Око-Трендз, 2005. – 384 с.
3. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации / под ред. А.Г. Зюко. – М.: Радио и связь, 1985. – 272 с.
4. Злотник В.М. Помехоустойчивые коды в системах связи / В.М. Злотник – М.: Радио и связь, 1989. – 230 с.
5. Кувшинов О.В. Основы теории завадостойкого кодирования: навч. посіб. / О.В. Кувшинов, О.П. Лежнюк, С.П. Ливенцев. – К.: ВІПНТУУ “КПІ”, 2001. – 72 с.
6. Зяблов В.В. Высокоскоростная передача сообщений в реальных каналах / В.В. Зяблов, Д.Л. Коробков, С.Л. Портной. – М.: Радио и связь, 1991. – 288 с.
7. Міночкін Д.А. Метод контролю стану каналу зв'язку із селективними завмираннями / Д.А. Міночкін, І.В. Борисов // Збірник наукових праць ВІПНТУУ „КПІ”. – 2006. – Вип. 3. – С. 66–71.

УДК 621.396

**Зайцев Г.Ф.**, д.т.н.; **Булгач В.Л.**, к.т.н.; **Гниденко О.Н.**, асп; **Градобоєва Н.В.**, к.т.н.  
(Государственный университет информационно-коммуникационных технологий)

### **ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ЧАСТОТНОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ С АСТАТИЗМОМ ПЕРВОГО ПОРЯДКА И ПОВЫШЕННЫМ БЫСТРОДЕЙСТВИЕМ**

**Зайцев Г.Ф., Булгач В.Л., Гниденко О.Н., Градобоєва Н.В.** Показники якості комбінованої системи частотного автопідстроювання з астатизмом першого порядку і підвищеною швидкістю. Визначені динамічні, середньоквадратичні похибки і показники якості перехідного процесу комбінованої системи частотного автопідстроювання, компенсаційний зв'язок по збурюючій дії якої синтезовано у відповідності з умовами перетворення статичної системи в систему з астатизмом першого порядку і підвищення швидкості (компенсації повідано загасаючої компоненти перехідного процесу) системи.

**Ключові слова:** ЧАСТОТНЕ АВТОПІДСТРОЮВАННЯ, СТАТИЧНА СИСТЕМА, АСТАТИЗМ

**Зайцев Г.Ф., Булгач В.Л., Гниденко О.Н., Градобоєва Н.В.** Показатели качества комбинированной системы частотной автоподстройки с астатизмом первого порядка и повышенным быстродействием. Определены динамические, среднеквадратические ошибки и показатели качества переходного процесса комбинированной системы частотной автоподстройки, компенсационная связь по возмущающему воздействию которой синтезирована в соответствии с условиями преобразования статической системы в систему с астатизмом первого порядка и повышения быстродействия (компенсации медленно затухающей компоненты переходного процесса) системы.

**Ключевые слова:** ЧАСТОТНАЯ АВТОПОДСТРОЙКА, СТАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА, АСТАТИЗМ