УДК 621.384

С.В. Толюпа, В.С. Наконечний, Л.О. Комарова

Державний університет телекомунікацій, Київ.

ПОБУДОВА СИГНАЛЬНО-КОДОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ БАГАТОПРОМЕНЕВИХ КАНАЛІВ СПЕЦІАЛЬНОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ

Основним напрямком підвищення швидкості передачі інформації в системах спеціального радіозв'язку (СРЗ) без зниження енергетичної ефективності є використання сигнально-кодових конструкцій, що представляють собою безліч сигнальних послідовностей, отриманих на основі завадостійких кодів і ансамблів сигналів із щільним укладанням. У статті запропоновано методику де оптимальні параметри OFDM сигнально-кодових конструкцій визначаються для випадку передачі інформації по каналу зв'язку в умовах селективних завмирань із урахуванням нелінійних спотворень сигналу в радіотракті. Раціональні параметри сигнально-кодових конструкцій для конкретного стану каналу зв'язку визначаються зі скінченної кількості допустимих варіантів, що дозволяє спростити практичну реалізацію модемного обладнання адаптивних систем радіозв'язку.

Ключові слова: *радіозв'язок, радіотракт, ефективність, сигнально-кодові конструкції, міжсимвольна інтерференція, коригуючий код, блокові коди.*

В якості завадостійких кодів можуть застосовуватися як блокові, так і згорточні коди [6]. Найбільша ефективність систем передачі з СКК досягається при використанні згорточних кодів у сполученні з ансамблями АФМ-сигналів. Їх енергетичний виграш у гауссівському каналі становить 3...6 дБ залежно від складності об'єднаної системи модуляції і кодування.

Аналіз ефективності систем радіозв'язку 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 коригувальних 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 згорточне кодування [6].

Розглянемо підхід до кодування в каналах із МСІ, заснований на синтезі таких сигнально-кодових конструкцій, які враховують «деформацію» простору сигналів при передачі по реальному каналу.

сновою цього підходу є можливість перетворення каналів із МСІ в сукупність гауссовських каналів без пам'яті, тобто без МСІ, але відрізняющихся один від одного скалярним коефіцієнтом передачі або відношенням сигнал/шум.

Сутність методики полягає в побудові сигнально-кодової конструкції з оптимальними за критерієм максимуму частотної ефективності параметрами при обмеженні на значення ймовірності помилкового приймання сигналів в умовах селективних завмирань і нелінійних спотворень.

Постановка завдання

<u>Задано:</u> параметри передавального пристрою і каналу зв'язку $\Psi=\{\Psi_i\}$, $i=\overline{1,10}$, де $\Psi_1...\Psi_{10}$ – 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 коригувального коду, величина кодової відстані.

<u>Необхідно:</u> побудувати OFDM-СКК, яка максимізує частотну ефективність СРЗ β_F при виконанні обмеження на значення ймовірності помилкового приймання сигналів $P_{пом} \le P_{пом\ доп}$.

<u>Обмеження:</u> розмірність ансамблю сигналів $2 \le M \le 256$; вид коригувального коду – згорточні

коди зі швидкістю R = 0,5-0,9; ймовірність помилкового приймання сигналів $P_{пом} \le 10^{-5}$.

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

$$\begin{cases} \beta_F = F_1(v_i, \Delta F, M, K_3, n, R, d) = \max; \\ P_{пом} = F_2(P_c, M, n, R, d) \le P_{пом\ доп}, \end{cases} \quad (1)$$

де n J довжина кодової комбінації;

P_c J потужність сигналу;

M – розмірність ансамблю сигналів,

R J швидкість коригувального коду,

d J 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 $P_{пом\ доп}$.

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

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

Перетворення каналу з міжсимвольними спотвореннями в сукупність гауссовських каналів без пам'яті. В реальних частотно-обмежених 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.

У гауссовського каналу із МСІ (ГКМСІ) вхід і вихід каналу пов'язані виразом:

$$Z = K_h X + B, \quad (2)$$

де X – відліки переданого сигналу на вході каналу;

B – відліки білого гауссовського шуму (БГШ);

K_h – матриця каналу ($L_0 \times L$), елементами якої є компоненти вагової послідовності $\{h_n\}_{n=0}^{l-1}$.

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 $l_0 \ge l$ 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 $P_ш$, а середня потужність сигналу на його виході обмежена величиною $P_{сер}$, то пропускна здатність ГКМСІ, власні значення якого $|K_0|^3 |K_1|^3 \ldots |K_{L-1}|$, дорівнює:

$$C = v_0 \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{M} \frac{1}{2} \log_2 \left[|K_i|^2 \frac{L}{M} \left(\frac{P_ш}{P_{сер}} + \frac{1}{L} \sum_{m=0}^{M} \frac{1}{|K_m|^2} \right) \right]; \quad v_0 = \frac{L}{L_0} = \frac{1}{1+l_0/L}, \quad (3)$$

де v_0 – відносна швидкість передачі при введенні захисних інтервалів між сигнальними блоками;

$M \le L-1$ – найбільше число, для якого вхідна потужність

$$P_M = P_{сер} \frac{L}{M} + P_ш \left[\frac{L}{M} \sum_{m=0}^{M} \frac{1}{|K_m|^2} - \frac{1}{|K_\mu|^2} \right] > 0.$$

При $L \to \infty$ ГКМСІ перетворюється в гауссовський канал без пам'яті (ГКБП), входом якого є стаціонарна випадкова послідовність $\{Z_K\}_{K \to -\infty}^{\infty}$, а виходом – стаціонарна випадкова послідовність $\{\tilde{Z}_K\}_{K \to -\infty}^{\infty}$.

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 [9,10].

Як правило, у паралельних підканалах із передспотвореннями використовуються різні алфавіти сигналів з фазовою маніпуляцією (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.

Нехай $0<m_1<m_2<m_3<...<m_Q \le M_1$ – 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, $1 \le j \le Q$ причому $q_1>q_2>...>q_Q \ge 1$. 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

$$P_{\text{вих } i} = P_{q_j}/|K_i|^2, \quad m_{j-1} \le i \le m_j-1, \qquad (4)$$

де $P_{q_j} = d_E^2 x(2^{q_j})$ – середня потужність сигналу КАМ на виході підканалів із номерами m_{j-1} до m_j-1, а

$$x(q) = \begin{Bmatrix} (2^q-1/2)/6, \ q=2n-1, \\ (2^q-1)/6, \ q=2n, \ n=1,2,... \end{Bmatrix}. \qquad (5)$$

Середня потужність на виході групового каналу з OFDM обмежена величиною $P_{сер}$

$$\frac{1}{N}\sum_{i=0}^{M_1-1} P_{\text{вих } i} \le P_{сер}. \qquad (6)$$

Підставляючи вираз (4) в формулу (6), одержуємо

$$d_E^2 \sum_{j=1}^{Q} x(2^{q_j}) \frac{1}{N} \sum_{i=m_{j-1}}^{m_j-1} \frac{1}{|K_i|^2} \le P_{сер}. \qquad (7)$$

З врахуванням того, 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

$$d_E^2 \sum_{j=1}^{Q} x(2^{q_j}) \left[f_L(m_j)-f_L(m_{j-1}) \right] \le P_{сер}. \qquad (8)$$

Розрахунок максимальної швидкості передачі в кожному підканалі. Максимальна швидкість у кожному підканалі при фіксованому q_j визначається в таким чином:

$$v(q_j, P_{qj}/P_ш) = v(q_j, d_E^2 \varphi(2^{q_j})/P_ш). \qquad (9)$$

Визначення максимальної швидкості передачі групового сигналу. Сумарна швидкість у каналі з OFDM задається виразом

$$v=v_0 \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{Q} s_j v(q_j, d_E^2 x(2^{q_j})/P_ш), \qquad (10)$$

де $s_j=m_j-m_{j-1}$, $m_0=0$ – кількість підканалів з однаковим алфавітом КАМ.

Оптимізація розглянутого варіанта 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 передспотворенями та довільними алфавітами КАМ у кожному з паралельних підканалів за умови, що мінімальна відстань у всіх алфавітах постійна і дорівнює d, задається виразом:

$$v_{max} = \max_{d>0} \max_{s_j=1,2,...} \max_{q_j=1,2,...} v_0 \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{Q} m_j v\left(q_j, \frac{d_E^2 x(2^{q_j})}{P_ш} \right) \qquad (11)$$

при обмеженнях, наведених вище, на припустиму середню потужність сигналу на вході каналу з OFDM, а

$s_j=m_j-m_{j-1}$, $m_0=0$, $0<m_1<m_2<...<m_Q \le M_1$ – розбиття множини підканалів на групи з ν_j паралельних каналів, у кожному з яких використовується однаковий алфавіт КАМ з середньою потужністю

$$P_{qj}=d_E^2 x(2^{q_j}).$$

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 тощо. Останні m_q сигналів модулюються КАМ-2^q.

Тепер на дану сигнальну конструкцію можна «накладати» коригувальний код і одержувати СКК. У принципі можливе застосування кожної з відомих блокових або згорточних СКК, описаних вище.

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.

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.

Раціональні 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.

Список літератури

1. *Широкополосные беспроводные сети передачи информации /В.М Вишневский, А.И. Ляхов, С.Л. Портной, И.В .Шахнович.* J *М.: Техносфера, 2005.* J *592 с.*
2. Григорьев В.А. Сети и системы радиодоступ /В.А. Григорьев, О.И. Лагутенко, Ю.А. Распаев. – М.: Око-Трендз, 2005. – 384 с.
3. *Prasad R., van Nee R. OFDM Wireless Multimedia Communications. London: Artech House, 2000.*
4. *Толюпа С.В Адаптивне управління системами радіозв'язку при впливі навмисних завад / С.В. Толюпа // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. Науково-виробничий збірник – 2012. – №2 (22) С. 5 – 10.*
5. *Борисов І.В. Методика вибору сигнально-кодових конструкцій для каналів зв'язку з селективними завмираннями / І.В. Борисов // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ".* J *2007.* J *Вип. 1.* J *С. 19–24.*
6. *Кувшинов О.В. Основи теорії завадостійкого кодування: навч. посіб. / О.П. Лежнюк, С.П. Лівенцев, О.В. Кувшинов.* J *К.: ВІТІ НТУУ "КПІ", 2001.* J *72 с.*
7. *Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации / [под ред. А.Г. Зюко]. – М.: Радио и связь, 1985.* – 272 с.
8. *Міночкін Д.А. Метод контролю стану каналу зв'язку із селективними завмираннями / Д.А. Міночкін, І.В. Борисов // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ".* J *2006.* J *Вип.3.* J *С. 66–71.*
9. *Толюпа С.В. Метод контролю стану каналу сучасних та перспективних радіосистем / С.В. Толюпа // Науково-технічний журнал "Сучасний захист інформації". – Спецвипуск - 2012. – С. 73-79.*
10. *Толюпа С.В. Вибор оптимальних значень параметрів OFDM-сигналу засобів радіозв'язку в залежності від стану каналу./ С.В. Толюпа // Збірник наукових праць "Компютерні технології друкарства". - 2012 - №28. - С. 187-194.*

Надійшла до редколегії 30.03.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Козелков, Державний університет телекомунікацій, Київ.

ПОСТРОЕНИЕ СИГНАЛО-КОДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ МНОГОЛУЧЕВЫХ КАНАЛОВ СПЕЦИАЛЬНОЙ РАДИОСВЯЗИ

С.В. Толюпа, В.С. Наконечний, Л.О. Комарова

Основным направлением повышения скорости передачи информации в СРЗ без снижения энергетической эффективности является использование сигнально-кодовых конструкций, представляющих собой множество сигнальных последовательностей, полученных на основе помехоустойчивых кодов и ансамблей сигналов с плотной укладкой. В статье предложена методика, где оптимальные параметры OFDM сигнально-кодовых конструкций определяются для случая передачи информации по каналу связи в условиях селективных замираний с учетом нелинейных искажений сигнала в радиотракте. Рациональные параметры сигнально-кодовых конструкций для конкретного состояния канала связи определяются из конечного числа допустимых вариантов, позволяет упростить практическую реализацию модемного оборудования адаптивных систем радиосвязи.

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

CONSTRUCTION OF SIGNALO-CODE CONSTRUCTIONS FOR MULTIBEAM DUCTINGS OF THE SPECIAL RADIO CONTACT

S.V. Tolyupa, V.S. Nakonechniy, L.O. Komarova

By basic direction of increase speed of information transfer in SRZ without the decline of power efficiency there is the use alarm - code constructions, being a great number of alarm sequences, got on the basis of antijamming kodas and bands of signals with dense piling. In the article a method is offered where optimum parameters of OFDM alarm - code constructions determined for the case of information transfer on a communication channel in the conditions of the selective stoppings beating taking into account nonlinear distortions of signal in a radiohighway. Rational parameters alarm - code constructions for the concrete state of communication channel determined from the eventual number of possible variants, allows to simplify practical realization of modem equipment of the adaptive systems of radio contact.

Keywords*: radio contact, radiohighway, efficiency, alarm-code constructions, intercharacter interference, correcting a code, sectional code.*