

УДК 681.3.06

## СИСТЕМЫ ОРТОГОНАЛЬНЫХ БИФАЗНЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ БЕНТ-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ДЛИНЫ 16

К. т. н. А. В. Соколов, Н. А. Барабанов

Одесский национальный политехнический университет  
Украина, г. Одесса  
radiosquid@gmail.com

*Предложено использование бент-последовательностей и регулярного оператора диадного сдвига для генерации систем ортогональных бифазных сигналов порядка 16. Полученные  $J=896$  ортогональных систем сигналов обладают хорошими апериодическими авто- и взаимокорреляционными свойствами, что позволяет рекомендовать их к использованию в технологии CDMA.*

*Ключевые слова: CDMA, ортогональная система бифазных сигналов, бент-последовательность.*

Важнейшими сигнальными конструкциями, обеспечивающими работоспособность технологии CDMA, лежащей в основе систем связи поколений 3G, 4G и 5G, являются ортогональные системы сигналов на основе функций Уолша [1], например, упорядоченных по Адамару:

$$\mathbf{A}_{L+1} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_L & \mathbf{A}_L \\ \mathbf{A}_L & -\mathbf{A}_L \end{bmatrix}, \mathbf{A}_1 = 1. \quad (1)$$

Известно, что системы ортогональных систем сигналов на основе функций Уолша не лишены недостатков, связанных с плохими апериодическими авто- и взаимокорреляционными свойствами, что диктует необходимость разработки новых методов синтеза ортогональных систем сигналов. С другой стороны, решение задач защиты информации требует формирования больших классов оптимальных сигналов для реализации концепции оперативной смены ансамбля рабочих сигналов. Для решения данных проблем существуют два основных подхода. Первый основан на использовании производных ортогональных систем сигналов, построение которых производится путем умножения исходной ортогональной системы сигналов на производящую  $m$ -последовательность, обладающую хорошими апериодическими авто- и взаимокорреляционными свойствами. Второй, более современный подход подразумевает синтез ортогональных систем сигналов на основе таких совершенных алгебраических конструкций как Совершенные двоичные решетки (СДР) и позволяет добиться существенного улучшения апериодических авто- и взаимокорреляционных свойств [2]. В данном случае, генерация системы ортогональных сигналов происходит на основе эквивалентных  $E(N)$  классов двумерных массивов, обладающих идеальными двумерными периодическими автокорреляционными свойствами.

Исследования показывают, что дальнейшее наращивание количества оптимальных с точки зрения апериодических авто- и взаимокорреляционных свойств систем ортогональных сигналов возможно за счет использования других совершенных алгебраических конструкций — бент-последовательностей.

Целью работы является разработка метода синтеза систем ортогональных бифазных сигналов на основе бент-последовательностей длины 16 для технологии CDMA.

Бинарная последовательность  $\mathbf{V} = [b_0, b_1, \dots, b_i, \dots, b_{n-1}]$ , где коэффициенты  $b_i \in \pm 1$ , четной длины  $n = N^2$ , называется бент-последовательностью (БП) [3], если она имеет равномерный по модулю спектр Уолша-Адамара, который представим в матричной форме

$$\mathbf{W}_B(\omega) = \mathbf{V} \cdot \mathbf{A}_N = \pm 2^{N/2}, \quad \omega = \overline{0, n-1}. \quad (4)$$

Регулярный метод синтеза бент-последовательностей длины  $n=16$  разработан в [5], полная мощность класса составляет  $J_{bent16}=896$ . Подклассом множества бент-последовательностей длины  $n=16$  является полный класс СДР порядка  $N=4$ , мощности  $J_{PBA}=384$  [3].

В [4] установлено, что на основе каждой бент-последовательности может быть построена орто-

гональная матрица под действием оператора диадного сдвига

$$\mathbf{Diad}(n) = \begin{bmatrix} \mathbf{Diad}(n/2), & \mathbf{Diad}(n/2) + n/2 \\ \mathbf{Diad}(n/2) + n/2, & \mathbf{Diad}(n/2) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Diad}(2) = \begin{bmatrix} 1, & 2 \\ 2, & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Таким образом, каждая бент-последовательность под действием оператора диадного сдвига (3) определяет ортогональную матрицу, строки и столбцы которой, соответственно, являются системой бифазных ортогональных векторов. При этом объем таких систем сигналов определяется количеством существующих бент-последовательностей.

Проведенные исследования для бент-последовательностей длины  $n = 16$  позволили найти такое их множество, элементы которого позволяют добиться наивысшей помехоустойчивости при моделировании системы передачи информации вследствие оптимальных аperiodических авто- и взаимокорреляционных свойств. Элементы данного множества представлены в виде своих шестнадцатеричных эквивалентов

$$\Upsilon = \left\{ \begin{array}{l} \text{AC60,5360,5C90,A390,60AC,9FAC,905C,6F5C,06CA,F9CA,F63A,093A,CA06,3506,3AF6,C5F6,} \\ \text{3A09,C509,CAF9,35F9,F6C5,09C5,0635,F935,90A3,6FA3,6053,9F53,5C6F,A36F,AC9F,539F} \end{array} \right\}. \quad (4)$$

Установлено, что ни одна из последовательностей (4) не является СДР. Пример моделирования зависимости вероятности ошибки  $P_{\text{ош}}$  от отношения сигнал/взаимная помеха  $q$  для ортогональной системы сигналов на основе бент-последовательности AC60 приведен на рисунке.

Таким образом, применение бент-последовательностей и регулярного оператора диадного сдвига для построения ортогональных бифазных систем сигналов позволяет добиться значительного улучшения

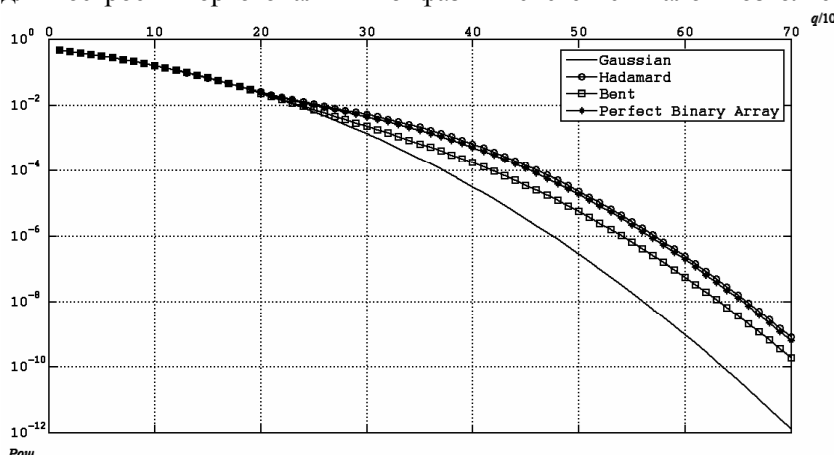


График зависимости вероятности ошибки от отношения сигнал/взаимная помеха

аperiodических авто- и взаимокорреляционных свойств по отношению к системам ортогональных сигналов на основе функций Уолша или СДР. Так, для систем на основе функций Уолша максимум бокового лепестка аperiodической автокорреляционной функции  $\max\{R_{\text{ABКФ}}\} = 0,9375$ , для систем на основе СДР —  $\max\{R_{\text{ABКФ}}\} = 0,8125$ , тогда как для систем на основе бент-последовательностей  $\max\{R_{\text{ABКФ}}\} = 0,5625$ . Результаты проведенного моделирования подтверждают большую эффективность ортогональных систем на основе бент-последовательностей с точки зрения задачи повышения помехоустойчивости. Количество построенных ортогональных систем сигналов равно мощности класса бент-последовательностей  $J = 896$ .

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Варакин, Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. — Москва: Радио и связь, 1985
2. Мазурков, М. И. Системы широкополосной радиосвязи. — Одесса: Наука и Техника. — 2010.
3. Мазурков, М. И., Соколов А. В. Регулярные привила построения полного класса бент-последовательностей длины 16 // Труды ОНПУ. — 2013. — № 2(41). — С. 231—237.
4. Мазурков, М. И., Соколов А. В. Быстрые ортогональные преобразования на основе бент-последовательностей // Информатика та математичні методи в моделюванні. — 2014. — № 1. — С. 5—13.

A. V. Sokolov, N. A. Barabanov

#### Systems of orthogonal biphasic signal based on bent sequences of length 16.

It is proposed to use bent sequences and regular operator of dyadic shift to generate orthogonal biphasic signal systems. The resulting  $J=896$  orthogonal signal systems having good aperiodic auto and cross correlation properties can be recommended to use in CDMA technology.

Keywords: CDMA, orthogonal system of biphasic signals, bent sequence.