

---

УДК 621.396.253

А.А. Смирнов

Кировоградский национальный технический университет, Кировоград

## **ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВЫБОРА АНСАМБЛЕЙ ДИСКРЕТНЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ РАДИОСИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С МНОЖЕСТВЕННЫМ ДОСТУПОМ**

*Показано, что обеспечение требуемых показателей качества цифровой связи, повышение абонентской емкости множественного доступа, обеспечение помехозащищенности, имитостойкости и скрытности радиоканалов управления может быть достигнуто за счет использования дискретных сигналов с улучшенными ансамблевыми, корреляционными и структурными свойствами. Определено, что перспективным направлением дальнейших исследований в этом смысле является разработка методов синтеза дискретных сигналов с особыми корреляционными свойствами.*

**Ключевые слова:** ансамбли дискретных сигналов, радиосистемы управления с множественным доступом.

### **Постановка проблемы в общем виде и анализ литературы**

В современных условиях эффективное функционирование радиосистем управления сопряжено с обеспечением множественного доступа, обеспечением требуемых показателей помехозащищенности, имитостойкости и скрытности каналов связи [1 – 5].

Проведенный анализ качественных характеристик современных систем связи и АСУ показывает, что обеспечение требуемых показателей помехозащищенности, имитостойкости и скрытности радиоканалов управления мобильной компоненты системы связи может быть достигнуто за счет применения широкополосных систем радиосвязи с организацией множественного доступа по технологии кодового разделения каналов [2 – 5]. Реализация динамического режима функционирования, использование больших ансамблей дискретных сигналов с улучшенными свойствами позволит обеспечить требуемые показатели эффективности каналов управления и связи.

Целью данной статьи является обоснование критериев и показателей выбора ансамблей дискретных сигналов для построения широкополосных шумоподобных радиосистем управления и связи с реализацией множественного доступа по технологии кодового разделения каналов.

### **Обоснование критериев и показателей выбора ансамблей дискретных сигналов для радиосистем управления с множественным доступом**

В соответствии с основными положениями теории дискретных сигналов, теории защиты информации и кодирования в качестве показателей выбора ансамблей дискретных сигналов для радиосистем управления с множественным доступом используют [2 – 4]:

– корреляционные свойства, характеризующие отклик оборудования на последовательности принимаемых сигналов;

– ансамблевые свойства, характеризующие мощность множеств (ансамблей) используемых для организации информационного обмена дискретных сигналов, длину последовательностей и число неэквивалентных множеств (ансамблей);

– структурные свойства, характеризующие непредсказуемость передаваемых последовательностей, их псевдослучайность и информационную скрытность.

Рассмотрим перечисленные свойства дискретных сигналов и соответствующие показатели их отбора для использования в радиосистемах управления с множественным доступом.

**Корреляционные свойства дискретных сигналов.** Рассмотрим ансамбль (множество) дискретных сигналов

$$S = \{S_0, S_1, \dots, S_{M-1}\},$$

где  $S_i = (S_{i_0}, S_{i_1}, \dots, S_{i_{n-1}})$  – псевдослучайная последовательность (кодированный сигнал) элементы которой принимают одно из значений:

$$S_{i_z} = \begin{cases} +1 \\ -1 \end{cases}, z = 0, \dots, n-1.$$

Определим нормированную аperiodическую функцию взаимной корреляции (АФВК) для сигналов

$$S_i = (S_{i_0}, S_{i_1}, \dots, S_{i_{n-1}}) \text{ и } S_j = (S_{j_0}, S_{j_1}, \dots, S_{j_{n-1}})$$

выражением:

$$\begin{aligned} R_{i,j}^{АФВК}(l) &= \\ &= \frac{1}{n} (S_{i_0} S_{j_l} + S_{i_1} S_{j_{l+1}} + \dots + S_{i_{n-1}} S_{j_{l+n-1}}) =, (1) \\ &= \frac{1}{n} \sum_{z=0}^{n-1} S_{i_z} S_{j_{l+z}} \end{aligned}$$

где  $l$  – число тактов, на которые две последовательности сдвинуты одна относительно другой, причем  $l = -n+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, n-1$ ,  $S_{j_{(n-1)<x<0}} = 0$ .

АФВК характеризует отклик оборудования на отличный от ожидаемого сигнал, сдвинутой во времени на  $l$  символов влево. Очевидно, что ее значения лежат в пределах:  $-1, \dots, +1$ .

Нормированная периодическая функция взаимной корреляции (ПФВК) характеризует отклик оборудования на периодическую последовательность сигналов, отличных от ожидаемого сигнала и определяется по выражению:

$$\begin{aligned} R_{i,j}^{ПФВК}(l) &= \\ &= \frac{1}{n} (S_{i_0} S_{j_{(l) \bmod n}} + S_{i_1} S_{j_{(l+1) \bmod n}} + \\ &\quad + \dots + S_{i_{n-1}} S_{j_{(l+n-1) \bmod n}}) = \\ &= \frac{1}{n} \sum_{z=0}^{n-1} S_{i_z} S_{j_{(l+z) \bmod n}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Отклик оборудования на последовательность отличных от ожидаемого сигнала и ожидаемого сигнала характеризует нормированная стыковая функция взаимной корреляции (СФВК).

Для оценки меры подобности последовательности ей самой, сдвинутой во времени на  $l$  символов влево, подобности ППСЧ ей самой, введем нормированную аperiodическую функцию автокорреляции (АФАК):

$$\begin{aligned} R_{i,i}^{АФАК}(l) &= \\ &= \frac{1}{n} (S_{i_0} S_{i_l} + S_{i_1} S_{i_{l+1}} + \dots + S_{i_{n-1}} S_{i_{l+n-1}}) =, (3) \\ &= \frac{1}{n} \sum_{z=0}^{n-1} S_{i_z} S_{i_{l+z}} \end{aligned}$$

которая имеет максимальное значение при  $l = 0$ :

$$\begin{aligned} R_{i,i}^{АФАК}(0) &= \\ &= \frac{1}{n} (S_{i_0} S_{i_0} + S_{i_1} S_{i_1} + \dots + S_{i_{n-1}} S_{i_{n-1}}) = \\ &= \frac{1}{n} \sum_{z=0}^{n-1} (S_{i_z})^2 = \frac{1}{n} n = 1 \end{aligned}$$

Нормированная периодическая функция автокорреляции (ПФАК) характеризует отклик оборудования на периодическую последовательность ожидаемых сигналов и определяется по выражению:

$$\begin{aligned} R_{i,i}^{ПФАК}(l) &= \\ &= \frac{1}{n} (S_{i_0} S_{i_{(l) \bmod n}} + S_{i_1} S_{i_{(l+1) \bmod n}} + \\ &\quad + \dots + S_{i_{n-1}} S_{i_{(l+n-1) \bmod n}}) = \\ &= \frac{1}{n} \sum_{z=0}^{n-1} S_{i_z} S_{i_{(l+z) \bmod n}} \end{aligned} \quad (4)$$

Задача синтеза больших ансамблей дискретных сигналов с улучшенными ансамблевыми и корреляционными свойствами состоит в построении такого множества  $S = \{S_0, S_1, \dots, S_{M-1}\}$ , чтобы при наибольшем значении мощности  $M$  множества  $S$  минимально и максимально допустимые уровни боковых лепестков функций авто и взаимной корреляции лежали в установленных пределах [2 – 4]:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{\min}^{АФВК} \leq R_{i,j}^{АФВК}(l) \leq R_{\max}^{АФВК} \\ R_{\min}^{ПФВК} \leq R_{i,j}^{ПФВК}(l) \leq R_{\max}^{ПФВК} \\ R_{i,i}^{АФАК}(0) = 1 \\ R_{\min}^{АФАК} \leq R_{i,i}^{АФАК}(l \neq 0) \leq R_{\max}^{АФАК} \\ R_{i,i}^{ПФАК}(0) = 1 \\ R_{\min}^{ПФАК} \leq R_{i,i}^{ПФАК}(l \neq 0) \leq R_{\max}^{ПФАК} \end{array} \right\}, \quad (5)$$

где  $-R_{\min}^{АФВК}$  и  $R_{\max}^{АФВК}$  – минимально и максимально допустимые уровни боковых лепестков аperiodической функций взаимной корреляции кодированных сигналов;

–  $R_{\min}^{\text{ПФВК}}$  и  $R_{\max}^{\text{ПФВК}}$  – минимально и максимально допустимые уровни боковых лепестков периодической функций взаимной корреляции кодовых сигналов;

–  $R_{\min}^{\text{АФАК}}$  и  $R_{\max}^{\text{АФАК}}$  – минимально и максимально допустимые уровни боковых лепестков аperiodической функций автокорреляции кодовых сигналов;

–  $R_{\min}^{\text{ПФАК}}$  и  $R_{\max}^{\text{ПФАК}}$  – минимально и максимально допустимые уровни боковых лепестков периодической функций автокорреляции кодовых сигналов.

Таким образом, минимально и максимально допустимые уровни боковых лепестков функций (1)–(4) характеризуют корреляционные свойства дискретных сигналов. Максимальное значение модуля  $\rho$  боковых лепестков (см. выражение (5)) функций корреляции является определяющей величиной при оценке помехоустойчивости радиоканалов связи.

Следовательно, при синтезе дискретных сигналов одним из основных критериев является минимизация этого значения.

**Ансамблевые свойства дискретных сигналов.** Мощность  $M$  ансамбля дискретных сигналов  $S = \{S_0, S_1, \dots, S_{M-1}\}$  характеризует максимальное число абонентских каналов информационного обмена в системе связи с кодовым разделением каналов.

Проведенный анализ [2–4] показывает, что при фиксированной длине  $n$  последовательностей увеличение мощности  $M$  формируемых ансамблей сигналов сопровождается, как правило, увеличением модуля  $\rho$  боковых лепестков функций корреляции, как следствие, применение таких сигналов приводит к снижению помехоустойчивости радиоканалов управления.

Кроме того, увеличение длины  $n$  последовательностей приводит к резкому повышению сложности процессов обработки дискретных сигналов на приемной и передающей стороне.

Таким образом, построение системы связи с кодовым разделением каналов сопряжено с поиском компромисса между показателями абонентской емкости (мощности ансамбля дискретных сигналов), помехоустойчивости (величины модуля боковых лепестков функции корреляции) и стоимости реализации системы (выраженной, например, в сложности реализации процедур обработки дискретных сигналов).

Помимо мощности  $M$  ансамбля дискретных сигналов важной ансамблевой характеристикой является также число  $N$  неэквивалентных ансамблей дискретных сигналов (каждый мощности  $M$ ). Это

число можно трактовать как число возможных состояний системы связи, т.е. как меру неопределенности, характеризующую имитостойкость системы связи.

Действительно, если предположить, что противник пытается навязать информацию одному из абонентов информационного обмена простым перебором возможностей, тогда вероятность успеха при одиночной попытке будет определяться выражением:  $P_n = N^{-1}$ .

С другой стороны, величину  $N$  можно трактовать как возможное расширение ансамбля дискретных сигналов, т.е. простым объединением  $N$  неэквивалентных ансамблей дискретных сигналов можно расширить абонентскую емкость системы до  $M' = MN$  абонентских радиоканалов.

**Структурные свойства дискретных сигналов.** Структурная скрытность  $S$  дискретных сигналов характеризует способность противостоять определению противником элементов передаваемой последовательности по известным (перехваченным) элементам.

В качестве показателя структурной скрытности дискретных сигналов используют выражение  $S = B/L$ , где  $B$  – минимальное число элементов последовательности, требуемое для однозначного восстановления правила формирования сигнала,  $L$  – период последовательности.

На практике число  $B$  оценивают методом Берлекэмп (как показатель линейной сложности), т.е.  $B$  оценивают как минимальное число элементов памяти в линейном устройстве (рекуррентном регистре), который может сформировать исследуемую последовательность.

Очевидно, что при  $B = L$  никаким линейным устройством с числом памяти меньшим периода последовательности определить правило формирования нельзя.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что задача формирования дискретных сигналов для радиосистем управления с организацией множественного доступа на основе кодового разделения каналов сводится к задаче синтеза больших ансамблей слабокоррелированных псевдослучайных последовательностей.

С точки зрения построения современных инфотелекоммуникационных систем и сетей связи с предоставлением большому числу абонентов информационного обмена многосервисных услуг постановку задачи синтеза дискретных сигналов сформулируем как задачу повышения мощности формируемых ансамблей при фиксированном уровне боковых лепестков функции корреляции и заданных структурных свойствах:

$$\max M : (\rho \leq \rho_{\text{тр}}, S \geq S_{\text{тр}}). \quad (6)$$

Постановку задачі можна трактувати як задачу підвищення абонентської ємності сучасних радіосистем управління з багатоканальним доступом при забезпеченні необхідних показників помехостійкості, імунітету та секретності радіоканалів управління.

## Висновки

Проведений аналіз показав, що забезпечення необхідних показників якості цифрової зв'язу, підвищення абонентської ємності багатоканального доступу, забезпечення помехозахищеності, імунітету та секретності радіоканалів управління може бути досягнуто за рахунок використання дискретних сигналів з покращеними ансамблевими, кореляційними та структурними властивостями.

Ефективне функціонування цифрових систем зв'язу з забезпеченням багатоканального доступу за технологією кодового розділення каналів безпосередньо залежить від ансамблевих, кореляційних та структурних властивостей формуваних дискретних сигналів.

Перспективним напрямком подальших досліджень в цьому сенсі є розробка методів синтезу дискретних сигналів з особливими кореляційними властивостями. Величини бокових викидів функції кореляції для таких сигналів визначаються строгими аналітичними співвідношеннями та безпосередньо пов'язані з структурними та груповими властивостями ансамблів дискретних послідовностей.

## Список літератури

1. Кушнір О.І. Перспективи розвитку системи зв'язу, РТЗ, автоматизованих та інформаційних систем Повітряних Сил / О.І. Кушнір // Восьма наукова конференція Харківського університету Повітряних Сил ім. Івана

Кожедуба «Новітні технології – для захисту повітряного простору», 18-19 квітня 2012 року: тези доповідей – Х.: ХУПС ім. І. Кожедуба. – 2012. – С. 150-151.

2. Стасев Ю.В. Основи теорії побудови сигналів / Ю.В. Стасев – Х.: ХВУ, 1999. – 87 с.

3. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр – М.: Вильямс, 2003. – 1104 с.

4. Гряник М.В. Технология CDMA – будущее сотовых систем в Украине / М.В. Гряник, В.И. Фролов // Мир связи. – 1998. – № 3. – С. 40-43.

5. Смирнов А.А. Анализ перспективных направлений в совершенствовании радиосистем управления и связи с организацией множественного доступа / А.А. Смирнов, В.Н. Сай, А.В. Коваленко // Новая №13

6. Цифровые методы в космической связи. /Под ред. С. Голомба. – М.: Связь, 1969. – 272 с.

7. Горбенко И.Д. Анализ производных ортогональных систем сигналов / И.Д. Горбенко, Ю.В. Стасев // Радиотехника. – 1989. – № 9. – С. 16-18.

8. Свердлик М.Б. Оптимальные дискретные сигналы / М.Б. Свердлик – М.: Сов. радио, 1975. – 200 с.

9. ДСТУ В 3265 – 95. Зв'язок військовий. Терміни та визначення. – К.: УкрНДІССІ, 1995. – 23с.

10. Варакин Л.Е. Теория систем сигналов / Л.Е. Варакин – М.: Сов. радио, 1978. – 304 с.

11. Горбенко И.Д. Теория дискретных сигналов. Ортогональные сигналы / И.Д. Горбенко, Ю.В. Стасев, А.А. Замула. – МО СССР: 1988. – 119 с.

Поступила в редколлегию 10.09.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.А. Кузнецов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## ОБҐРУНТУВАННЯ КРИТЕРІЇВ І ПОКАЗНИКІВ ВИБОРУ АНСАМБЛІВ ДИСКРЕТНИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ РАДІОСИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ІЗ МНОЖИННИМ ДОСТУПОМ

О.А. Смирнов

Показано, що забезпечення необхідних показників якості цифрової зв'язу, підвищення абонентської ємності багатоканального доступу, забезпечення помехозахищеності, імунітету та секретності радіоканалів управління може бути досягнуто за рахунок використання дискретних сигналів з покращеними ансамблевими, кореляційними та структурними властивостями. Визначено, що перспективним напрямком подальших досліджень у цьому сенсі є розробка методів синтезу дискретних сигналів з особливими кореляційними властивостями.

**Ключові слова:** ансамблі дискретних сигналів, радіосистем управління із багатоканальним доступом.

## BASIS OF CRITERIA AND INDICATORS CHOICE OF THE ENSEMBLE OF DISCRETE SIGNALS OR RADIO SYSTEMS CONTROL MULTIPLE ACCESS

A. A. Smirnov

It is shown that the provision of the required quality of digital communication, increase subscriber capacity multiple access, providing immunity to simulate resistance and stealth radio control can be achieved through the use of digital signals with improved ensemble, correlation and structural properties. Determined that and promising for further research in this regard is the development of methods for the synthesis of digital signals with special correlation properties.

**Keywords:** ensembles of discrete signals, radio control with multiple access.