

for Power-Efficient Digital Signal Processing in Embedded Processors. *Proc. of 2009 International Conference on Compilers, Architecture, and Synthesis for Embedded Systems*, 2009, pp. 19-28. doi: 10.1145/1629395.1629401.

8. Kalampoukas L. et al. High-Speed Parallel-Prefix Modulo  $2^n-1$  Adders. *IEEE Trans. Computers*, 2000, vol. 49, no. 7, pp. 673-680. doi: 10.1109/12.863036.

*Received 17.01.2017*

**Seyed Mostafa Mirhosseini**, Department of Computer Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, e-mail: s.m.mirhoseini@srbiau.ac.ir.

**Amir Sabbagh Molahosseini**, Department of Computer Engineering, Kerman Branch, Islamic Azad University, Kerman, Iran, e-mail: sabbagh@iauk.ac.ir

**Mehdi Hosseinzadeh**, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran; Computer Science, University of Human Development, Sulaimanyah, Iraq. E-mail: hosseinzadeh.m@iums.ac.ir .

## НОВЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ СИСТЕМЫ ОСТАТОЧНЫХ КЛАССОВ

*Сейед Мостафа Мирхоссеини, Амир Саббаг Молахоссеини, Мехди Хоссеинзаде, Мехди Хоссеинзаде*  
E-mail: s.m.mirhoseini@srbiau.ac.ir

Система остаточных классов (СОК) рассматривается в качестве эффективного параллельного инструмента повышения производительности вычислительных систем. Однако СОК содержит некоторые компоненты, увеличивающие ее сложность. В данной статье предлагается новый подход к проектированию СОК, основанный на унификации последовательных сумматоров (ПС) в арифметических устройствах СОК для обратного преобразования. Предложенный метод исключает сложные модулярные ПС для некоторых каналов и улучшает существующие обратные преобразователи за счет перемещения некоторых сложных суммирований из арифметического канала СОК в обратный преобразователь. Экспериментальные результаты показывают существенное уменьшение аппаратных затрат, энергопотребления и задержки по сравнению с известными разработками.

**Ключевые слова:** система остаточных классов, вычислительная система, сумматор, обратное преобразование

**Сейед Мостафа Мирхоссеини**, Кафедра вычислительной техники (ВТ), научно-исследовательский отдел, Исламский университет Азад, Тегеран, Иран. E-mail: s.m.mirhoseini@srbiau.ac.ir

**Амир Саббаг Молахоссеини**, Кафедра ВТ, Исламский университет Азад, филиал в г. Керман, Иран. E-mail: sabbagh@iauk.ac.ir

**Мехди Хоссеинзаде**, Иранский медицинский университет, Тегеран, Иран; Университет развития человека, Сулейманья, Ирак. E-mail: hosseinzadeh.m@iums.ac.ir

УДК 621.396.1

## ОЦЕНКА КОЛИЧЕСТВА АНСАМБЛЕЙ НОВЫХ МНОГОФАЗНЫХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ

*Жук А.П., Белан Н.В., Карасев И.В., Луганская Л.А.*  
*Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, РФ*  
E-mail: nadya\_belan@mail.ru

В работе представлена методика оценки количества вариантов ансамблей многофазных ортогональных сигналов, получаемых при расчете собственных векторов для матрицы различных порядков. В результате сравнительного анализа количества предложенных ансамблей многофазных ортогональных сигналов и известных псевдослучайных хаотических последовательностей выявлено преимущество первых, что позволило сделать вывод о возможности их стохастического использования для передачи информации в радио- и оптическом каналах с целью повышения структурной скрытности сигналов-переносчиков информации.

**Ключевые слова:** количество ансамблей многофазных ортогональных сигналов, сложные шумоподобные сигналы, кодовое разделение каналов, собственные векторы эрмитовой матрицы

## Введение

Существующие и перспективные беспроводные телекоммуникационные технологии предполагают использование широкополосных каналов связи со сложными шумоподобными сигналами (СШПС) [1]. Использование данного подхода обеспечивает ряд преимуществ [2-3]:

- высокую помехозащищенность систем связи;
- эффективную борьбу с искажениями сигналов в канале связи;
- одновременную работу многих абонентов в общей полосе частот за счет кодового разделения каналов (КРК);
- совместимость передачи информации с измерением параметров движения объектов;
- более эффективное использование спектра частот на ограниченной территории.

Применение полученных ансамблей многофазных ортогональных сигналов (АМФОС) возможно не только в радиоканале, но и в оптическом канале. Например, в [8] разработано устройство, позволяющее передавать  $M$ -арный символ с псевдослучайной перестройкой интенсивности свечения фотоэлемента. Следовательно, при его использовании возможна передача полученных многофазных сигналов, интенсивность свечения которых будет определяться значением фазы.

В случае использования достаточно представительного количества ансамблей СШПС требуемого объема вполне возможно реализовать их стохастическое применение, которое позволит повысить структурную скрытность данных сигналов [4]. Одной из разновидностей СШПС являются ансамбли ортогональных сигналов (АОС), которые могут быть получены различными способами, в том числе путем моделирования собственными векторами (СВ) эрмитовых матриц (ЭМ) [5].

Для стохастического применения АОС в телекоммуникационных системах, помимо спектральных и корреляционных свойств, большое значение имеет количество используемых ансамблей. Объемы АОС, представленные последовательностями Уолша и псевдослучайными хаотическими последовательностями (ПСХП), оценивались в [3,5-7], а количество получаемых вариантов АМФОС, описываемых СВ бидиагональной ЭМ, не оценивалось.

Задача статьи – разработка подхода к оценке количества получаемых вариантов АМФОС, опи-

сываемых СВ бидиагональной ЭМ. Целью статьи является определение верхней границы количества АМФОС, описываемых СВ бидиагональной ЭМ.

## Расчет числа АМФОС

Расчет числа АМФОС осуществим на примере ЭМ четвертого порядка ( $N = 4$ ) для простоты заключений. Также для расчета уникальных АМФОС, получаемых в результате моделирования СВ ЭМ, необходимо:

- определить диапазон значений фаз коэффициентов ЭМ, при котором возможно получение уникальных АМФОС;
- определить значения СВ бидиагональной ЭМ, описываемой выражением (1), позволяющие получить для каждого значения фазы коэффициентов ЭМ ( $360^\circ$ ) ансамбль из  $N$  сигналов.

В ЭМ вида (1) диагональные коэффициенты являются комплексными числами, то есть содержат модули  $A_{i,j}$  и аргументы  $\varphi_{i,j}$ .

$$A = \begin{pmatrix} 0 & A_{1,2} \cdot e^{i\varphi_{1,2}} & 0 & 0 \\ A_{2,1} \cdot e^{i\varphi_{2,1}} & 0 & A_{2,3} \cdot e^{i\varphi_{2,3}} & 0 \\ 0 & A_{3,2} \cdot e^{i\varphi_{3,2}} & 0 & A_{3,4} \cdot e^{i\varphi_{3,4}} \\ 0 & 0 & A_{4,3} \cdot e^{i\varphi_{4,3}} & 0 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Модули диагональных коэффициентов второй диагонали ЭМ симметричны относительно ее главной диагонали, то есть  $A_{i,j} = A_{j,i}$ . Определенные значения амплитуд и фаз коэффициентов ЭМ позволяют получить модель ортогональных сигналов, описываемую СВ ЭМ, вида:

$$X = \begin{pmatrix} x_{1,1} \cdot e^{i\varphi_{1,1}} & x_{1,2} \cdot e^{i\varphi_{1,2}} & \dots & x_{1,m} \cdot e^{i\varphi_{1,m}} \\ x_{2,1} \cdot e^{i\varphi_{2,1}} & x_{2,2} \cdot e^{i\varphi_{2,2}} & \dots & x_{2,m} \cdot e^{i\varphi_{2,m}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n,1} \cdot e^{i\varphi_{n,1}} & x_{n,2} \cdot e^{i\varphi_{n,2}} & \dots & x_{n,m} \cdot e^{i\varphi_{n,m}} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Определим общее количество АМФОС, получаемых при изменении фазы одного коэффициента ЭМ, с учетом вышеописанных условий по формуле

$$K = ND, \quad (3)$$

где  $K$  – общее число АМФОС при изменении фазы одного коэффициента ЭМ;  $N$  – порядок ма-

трицы;  $D$  – количество используемых фаз диагонального коэффициента ЭМ.

С учетом (3) получим

$$K = 4 \cdot 360 = 1440. \quad (4)$$

В таблице 1 представлены АМФОС, полученные при значении фазы  $\varphi = 15^\circ$  коэффициента  $A_{1,2}$ . Для коэффициентов  $A_{2,3}$  и  $A_{3,4}$   $\varphi = 0^\circ$ .

Таблица 1. АМФОС, полученные при значении фазы  $\varphi = 15^\circ$  коэффициента  $A_{1,2}$

№	Значения сигналов S1 – S4			
S1	$0,01 \cdot e^{i \cdot 88}$	$-0,06 \cdot e^{i \cdot (-106)}$	$0,68 \cdot e^{i \cdot 0}$	$-0,67 \cdot e^{i \cdot 179}$
S2	$0,68 \cdot e^{i \cdot 0}$	$-0,67 \cdot e^{i \cdot 179}$	$-0,01 \cdot e^{i \cdot (-92)}$	$0,06 \cdot e^{i \cdot 74}$
S3	$0,01 \cdot e^{i \cdot 88}$	$0,06 \cdot e^{i \cdot 74}$	$0,68 \cdot e^{i \cdot 0}$	$0,67 \cdot e^{i \cdot (-1)}$
S4	$0,68 \cdot e^{i \cdot 0}$	$0,67 \cdot e^{i \cdot (-1)}$	$-0,01 \cdot e^{i \cdot (-92)}$	$-0,06 \cdot e^{i \cdot (-106)}$

На рис. 1-2 представлены АМФОС, визуализированные по данным из таблицы 1. Фазы единичных элементов сигналов имеют различные значения, что показано разной штриховкой (см. рис. 3). Однако следует учитывать, что возможно одновременное изменение фаз оставшихся коэффициентов ЭМ ( $A_{2,3}$ ,  $A_{3,4}$ ).

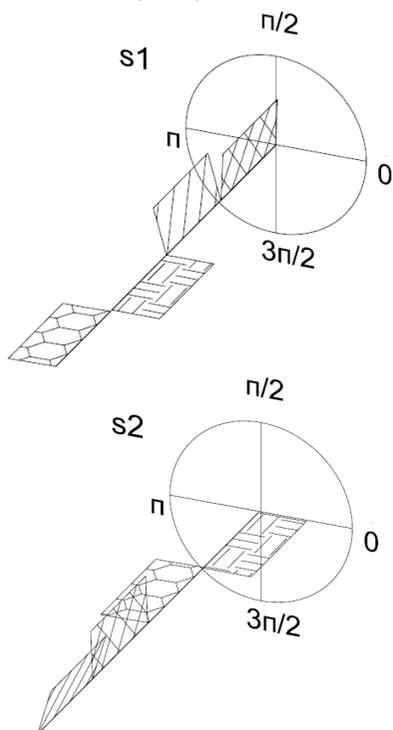


Рис. 1. Модели сигналов S1-S2 при значении фазы  $\varphi = 15^\circ$  коэффициента  $A_{1,2}$

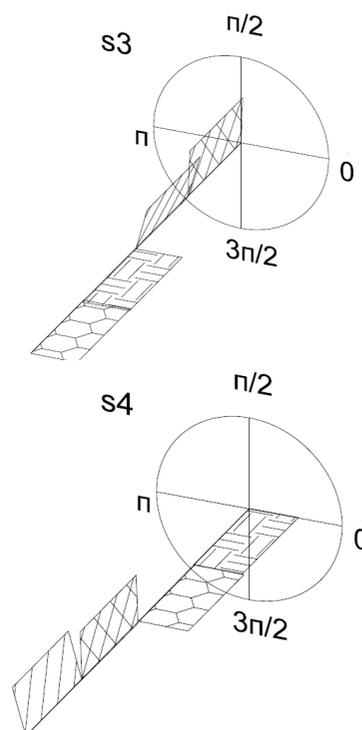


Рис. 2. Модели сигналов S3-S4 при значении фазы  $\varphi = 15^\circ$  коэффициента  $A_{1,2}$

Для определения количества комбинаций таких изменений воспользуемся известной формулой сочетаний [9]

$$C_n^k = \frac{n!}{k! (n - k)!}, \quad (5)$$

где  $C$  – число сочетаний;  $n$  – число коэффициентов в ЭМ;  $k$  – число коэффициентов ЭМ, фазы которых подвергаются изменению в экспериментах.

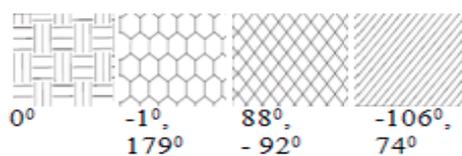


Рис. 3. Штриховка фаз единичных элементов

В нашем случае  $n = 3$ ;  $k = 1$  и  $2$ . Из вышеописанного следует, что количество комбинаций изменения фаз коэффициентов ЭМ, дающих АМФОС в комплексном виде

$$T = C_3^1 + C_3^2 = 6. \quad (6)$$

Тогда формула (3) примет вид:

$$K = N D T, \quad (7)$$

где  $T$  – количество возможных комбинаций изменения фаз коэффициентов ЭМ. Общее число АМФОС равно

$$K = 4 \cdot 360 \cdot 6 = 8640. \quad (8)$$

При данном подходе возможно получение сигналов  $S_j$ , которые по сути являются инверсными по отношению к  $\bar{S}_i$ . Предположим, что они тождественны друг другу, поскольку имеют одинаковую структуру, а разница заключается в начальной фазе.

Таким образом, чтобы рассчитать количество уникальных АМФОС, необходимо:

- определить количество фаз, при которых появляются ансамбли инверсных многофазных ортогональных сигналов (АИМФОС) – один сигнал является противоположным по отношению к другому;

- рассчитать общее число АИМФОС.

Для решения первой задачи используем формулы:

$$\theta = \pi - \varphi; \quad (9)$$

$$\theta = 2\pi - \varphi, \quad (10)$$

где  $\theta$  – значение фазы в градусах, при которой появляется АИМФОС;  $\pi$  – соответствует  $180^\circ$  на тригонометрической окружности;  $\varphi$  – значение фазы коэффициента  $A_{1,2}$  ЭМ в градусах.

Из (9)-(10) следует, что количество фаз, при которых появляются АИМФОС, равно  $C = 270$ . Расчет общего количества АИМФОС выполним по формуле

$$W = C N T, \quad (11)$$

где  $W$  – общее количество АИМФОС. Результаты расчета:

$$W = 270 \cdot 4 \cdot 6 = 6480. \quad (12)$$

Количество уникальных АМФОС

$$Q = K - W = 2160. \quad (13)$$

Аналогичным образом можно рассчитать число уникальных АМФОС для ЭМ более высоких порядков. В таблице 2 представлены результаты расчетов для матриц порядков  $N = 8; 16; 32; 64$ .

Таблица 2. Результаты расчетов числа уникальных АМФОС

Порядок матрицы, $N$	Число уникальных АМФОС, $Q$
4	$2,16 \cdot 10^3$
8	$9,072 \cdot 10^4$
16	$4,718 \cdot 10^7$
32	$6,185 \cdot 10^{12}$
64	$2,125 \cdot 10^{22}$

Сравним полученную оценку АМФОС с оценкой объема ансамбля  $L$  псевдослучайных хаотических последовательностей – 3 (ПСХП-3) из [7]. Как известно из [7], при  $N = 64$  объем ансамбля сигналов ПСХП-3 не превышает 118 последовательностей, а для предложенных АМФОС –  $2,078 \cdot 10^{22}$ . Расчет «выигрыша» предложенного способа генерации уникальных АМФОС выполним по формуле

$$\Delta = Q - L, \quad (15)$$

где  $\Delta$  – преимущество в количестве уникальных АМФОС;  $Q$  – число уникальных АМФОС, предложенных авторами;  $L$  – число уникальных ПСХП-3.

Подставив вышеуказанные значения, получим:  $\Delta = 2,124 \cdot 10^{22}$ .

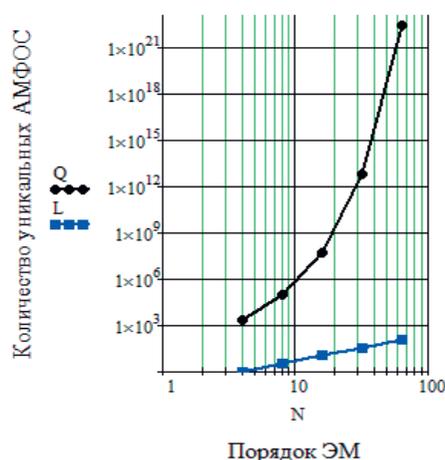


Рис. 4. Зависимость числа уникальных АМФОС  $Q$  и ПСХП-3  $L$  от порядка ЭМ  $N$

На рис. 4 изображена зависимость числа уникальных АМФОС  $Q$  и ПСХП-3  $L$  от порядка ЭМ  $N$ .

Таким образом, сравнительный анализ полученных и представленных в [7] результатов показал, что общее число уникальных АМФОС  $Q$  при одинаковом значении  $N$  в предложенном способе генерации АМФОС больше, чем в [7], что свидетельствует о возможности их стохастического применения.

### Заключение

Получены формулы для оценки количества вариантов АМФОС, описываемых СВ bidiagonalных ЭМ разных порядков. Определена графическая зависимость количества уникальных АМФОС от порядка ЭМ. Поскольку количество сигналов, которое можно получить, используя

данный подход, достаточно большое, то можно сделать вывод о возможности их стохастического использования для передачи информации в радио- и оптическом каналах с целью повышения защищенности информации в них. В результате сравнительного анализа количества АМФОС и ПСХП-3 выявлен «выигрыш» предложенных сигналов  $\Delta = 2,124 \cdot 10^{22}$ .

### Литература

1. Кукушкин С.С., Филатов В.И., Моисеев В.Ф. и др. Применение сложных сигналов в системах радиосвязи и управления. // Современные тенденции развития науки и технологий. №2-2, 2015. – С. 94-96.
2. Бабков В.Ю., Вознюк М.А., Никитин А.Н. Системы связи с кодовым разделением каналов. СПб.: Изд. СПбГУТ, 1999. – 120 с.
3. Никитин Г.И. Применение функций Уолша в сотовых системах связи с кодовым разделением каналов. СПб.: Изд. СПбГУАП, 2003. – 86 с.
4. Осмоловский С.А. Стохастические методы защиты информации. М.: «Радио и связь», 2003. – 320 с.
5. Пашинцев В.П., Малофей О.П., Жук А.П. Развитие теории синтеза и методов формирования ансамблей дискретных сигналов для перспективных систем радиосвязи различных диапазонов радиоволн. М.: Физматлит, 2010. – 195 с.
6. Жук А.П., Голубь Ю.С., Иванов А.С. Методика стохастического формирования ансамблей дискретных ортогональных многоуровневых сигналов. // Информационное противодействие угрозам терроризма. №6, 2011. – С. 109-113.
7. Сухарев Е.М. Общесистемные вопросы защиты информации. Кн. 1. М.: Радиотехника, 2003. – 296 с.
8. Людоговский Д.А., Филатов В.В. Проект «Световой канал передачи информации на основе сложных сигнально-кодовых конструкций» / URL: <http://nttm2016.ru/?p=17&pr=704> (д.о. 10.01.17).
9. Андерсон Дж.А. Дискретная математика и комбинаторика. Пер. с англ. М.: ИД «Вильямс», 2004. – 960 с.
10. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: ИД «Вильямс», 2003. – 1104 с.
11. Залогин Н.Н., Кислов В.В. Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах. М.: Радиотехника, 2006. – 208 с.
12. Короленко П.В., Рьжикова Ю.В. Моделирование и обработка случайных сигналов и конструкций. М.: МГУ, 2012. – 69 с.
13. Вохник О.М., Зотов А.М., Короленко П.В. Моделирование и обработка стохастических сигналов и структур. М.: Университетская книга, 2013. – 125 с.
14. Столингс В. Беспроводные линии связи и сети. М.: ИД «Вильямс», 2003. – 213 с.
15. Жук А.П., Черняк З.В., Сазонов В.В. О целесообразности использования ортогональных ансамблей сигналов с изменяющейся размерностью в системе CDMA // ИКТ. Т.6, №4, 2008. – С. 16-19.

*Получено 03.04. 2017*

**Жук Александр Павлович**, к.т.н., профессор Кафедры организации и технологий защиты информации (ОТЗИ) Северо-Кавказского федерального университета (СКФУ). Тел. (8-918) 884-14-81. E-mail: [alekszhuk@mail.ru](mailto:alekszhuk@mail.ru)

**Белан Надежда Викторовна**, магистрант кафедры ОТЗИ СКФУ. Тел.: (8-918) 864-83-04. E-mail: [nadya\\_belan@mail.ru](mailto:nadya_belan@mail.ru)

**Карасев Иван Валентинович**, студент кафедры ОТЗИ СКФУ. Тел.: (8-961) 481-54-14. E-mail: [tusky-mon@yandex.ru](mailto:tusky-mon@yandex.ru)

**Луганская Людмила Алексеевна**, специалист Управления науки и технологий СКФУ. Тел.: (8-918) 742-83-64. E-mail: [lyuda\\_st87@mail.ru](mailto:lyuda_st87@mail.ru)

## EVALUATION OF NEW MULTIPHASE ORTHOGONAL SIGNAL ENSEMBLE QUANTITY

*Zhuk A.P., Belan N.V., Karasev I.V., Luganskaya L.A.  
North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation  
E-mail.: alekszhuk@mail.ru*

This work describes deficiency of orthogonal signal ensemble quantity for stochastic application. We present developed method for estimation of multiphase orthogonal signal ensemble quantity during computing of bidiagonal Hermitian matrix eigenvectors. Proposed method is focused on definition of maximal number of signals. These ensembles are able to be utilized for both radio- and optical channels. Device can transmit M-ary symbol under photo-cell emission intensity pseudo-random reconstruction. We computed the quantity of new multiphase orthogonal signal ensembles for various order Hermitian matrices, represent models of them over 3D-space and some derived formulas for unique signal quantity evaluation. We have obtained graphic relation between unique ensemble quantity of multiphase orthogonal signals and pseudo-random chaotic sequences from Hermitian matrix order, while comparative analysis of mentioned above signals revealed the advantages of the first ones.

**Keywords:** quantity of multiphase orthogonal signal ensembles, composite noise-type signals, code division multiplexing, eigenvectors of Hermitian matrix

**DOI:** 10.18469/ikt.2017.15.2.02

**Zhuk Alexander Pavlovich**, North-Caucasus Federal University, 1 Pushkin str., Stavropol, 355009, Russian Federation; Professor of the Department of Organization and Technologies of Information Protection; PhD in Technical Science, Professor. Tel.: +79188841481. E-mail: alekszhuk@mail.ru

**Belan Nadezhda Viktorovna**, North-Caucasus Federal University, 1 Pushkin str., Stavropol, 355009, Russian Federation; Master student of the Department of Organization and Technologies of Information Protection. Tel.: +79188648304. E-mail: nadya\_belan@mail.ru

**Karasev Ivan Valentinovich**, North-Caucasus Federal University, 1 Pushkin str., Stavropol, 355009, Russian Federation; student of the Department of Organization and Technologies of Information Protection. Tel.: +79614815414. E-mail: tuskymon@yandex.ru.

**Luganskaya Lyudmila Alekseevna**, North-Caucasus Federal University, 1 Pushkin str., Stavropol, 355009, Russian Federation; expert of the Department of Science and Technology. Tel.: +79187428364. E-mail: lyuda\_st87@mail.ru.

### References

1. Kukushkin S.S., Filatov V.I., Moiseev V.F., Lyudogovskiy D.A. *Primenenie slozhnykh signalov v sistemakh radiosvyazi i upravleniya* [Application of complex signals in systems of communication and management]. *Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologii*, 2015, no. 2, pp. 94-96.
2. Babkov V.Yu., Voznyuk M.A., Nikitin A.N. *Sistemy svyazi s kodovym razdeleniem kanalov* [Systems of communication with code division]. Saint Petersburg, SPbGUT Publ., 1999. 120 p.
3. Nikitin G.I. *Primenenie funktsiy Uolsha v sotovykh sistemakh svyazi s kodovym razdeleniem kanalov: Uchebnoe posobie* [Application of Walsh functions in cellular communication systems with code division]. Saint Petersburg, SPbGUT Publ., 2003. 86 p.
4. Osmolovskiy S.A. *Stokhasticheskie metody zashity informacii* [Stochastic methods of information protection]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 2003. 320 p.
5. Pashincev V.P., Malofey O.P., Zhuk A.P. *Razvitie teorii sinteza i metodov formirovaniya ansambley diskretnykh signalov dlya perspektivnykh system radiosvyazi razlichnykh diapazonov radiovoln* [Development of the theory of synthesis and methods for the formation of ensembles of discrete signals for promising radio communication systems of various radio wave bands]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010. 195 p.
6. Zhuk A.P., Golub' Yu. S., Ivanov A.S. *Metodika stokhasticheskogo formirovaniya ansambley diskretnykh ortogonalnykh mnogourovnevnykh signalov* [The method of stochastic formation of ensembles of discrete orthogonal multilevel signals]. *Informacionnoe protivodeystvie ugrozam terrorizma*, 2011, no. 6, pp. 109-113.

7. Sukharev E.M. *Obshestvennye voprosy zashity informatsii: Kollektivnaya monografiya. Kniga 1* [System-wide issues of information security: Collective monograph. Part 1]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2003. 296 p.
8. Lyudogovskiy D.A., Filatov V.V. *Proekt "Svetovoy kanal peredachi informatsii na osnove slozhnykh signalno-kodovykh konstruksiy"* [Project "Light channel of information transfer based on complex signal-code structures"]. Available at: <http://nttm2016.ru/?p=17&pr=704>. (accessed: 10.01.17).
9. Anderson, Dzheymys A. *Diskretnaya matematika i kombinatorika* [Discrete mathematics and combinatorics]. Moscow, Vil'yams Publ., 2004. 960 p.
10. Sklyar B. *Tsifrovaya svyaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye* [Digital communication. Theoretical bases and practical application]. Moscow, Vil'yams Publ., 2003. 1104 p.
11. Zalogin N.N., Kislov V.V. *Shirokopolosnye khaoticheskie signaly v radiotekhnicheskikh i informatsionnykh sistemakh* [Broadband chaotic signals in radio engineering and information systems]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2006. 208 p.
12. Korolenko P.V., Ryzhikova U.V. *Modelirovaniye i obrabotka sluchaynykh signalov i konstruksiy* [Modeling and processing of random signals and structures]. Moscow, MGU Publ., 2012. 69 p.
13. Vokhnik O.M., Zotov A.M., Korolenko P.V. *Modelirovaniye i obrabotka stokhasticheskikh signalov i struktur: Uchebnoye posobie* [Modeling and processing of stochastic signals and structures: Textbook]. Moscow, Universitetskaya kniga, 2013. 125 p.
14. Stolings B. *Besprovodnye linii svyazi i seti* [Wireless links and networks]. Moscow, Vil'yams Publ., 2003. 213 p.
15. Zhuk A.P., Chernyak Z.V., Sazonov V.V. O tselesoobraznosti ispol'zovaniya ortogonal'nykh ansambley signalov s izmenyayushchey razmernost'yu v sistme CDMA [On the advisability of using orthogonal ensembles of signals with varying dimensions in a CDMA system]. *Infokommunikatsionnye tekhnologii*, 2008. no 4, pp. 16-19.

Received 03.04.2017

## ТЕХНОЛОГИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 621.3.095

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МОДОВОГО СОСТАВА ИЗЛУЧЕНИЯ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ С ОСЕСИММЕТРИЧНЫМ ПРОФИЛЕМ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Былина М.С.<sup>1</sup>, Глаголев С.Ф.<sup>1</sup>, Дашков М.В.<sup>2</sup>, Дюбов А.С.<sup>1</sup>, Хричков В.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, РФ

<sup>2</sup>Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ  
E-mail: [BylinaMaria@mail.ru](mailto:BylinaMaria@mail.ru)

В работе предложена методика анализа модового состава видимого и ближнего инфракрасного излучения, распространяющегося по слабо направляющим оптическим волокнам круглого поперечного сечения с осесимметричным профилем показателя преломления. В основе методики лежит принцип представления реального слабо направляющего оптического волокна структурой из концентрических слоев, в которой каждый слой имеет постоянный показатель преломления и характеризуется своим радиусом. Приведены результаты моделирования для оптических волокон, соответствующих рекомендациям МСЭ-Т G.652 и G.657, для рабочих длин волн 650 и 850 нм. Определен модовый состав и основные параметры распространяющихся мод, а также приведены результаты расчетов хроматической дисперсии. Результаты работы могут быть использованы при проектировании локальных сетей, работающих в видимой и ближней инфракрасной областях, организации дополнительных оптических каналов в существующих сетях небольшой протяженности, разработке оптических рефлектометров для измерений на локальных сетях, а также на абонентских участках пассивных оптических сетей.

**Ключевые слова:** оптическое волокно, одномодовое оптическое волокно, направляемая мода, скалярное волновое уравнение, хроматическая дисперсия