

УДК 629.7.05, 621.398

© Кузнецов В.И., Кукушкин С.С.
Kuznetsov V., Kukushkin S.СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ
СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ С ЗАДАНЫМИ СВОЙСТВАМИSYNTHESIS OF OPTIMAL PROBLEM-ORIENTED
COMPLEX SIGNALS WITH DESIRED PROPERTIES

Аннотация. Статья посвящена синтезу оптимальных проблемно-ориентированных сложных сигналов с заданными свойствами. Показана возможность значительного повышения помехоустойчивости систем синхронизации данных при передаче информации в автоматизированных информационно-управляющих и телекоммуникационных системах при использовании новой технологии синтеза сложных шумоподобных сигналов (СШПС), состоящих из составных частей с малой разрядностью представления символами двоичного кода. Показано, что такой подход обладает рядом дополнительных преимуществ, относящихся к увеличению скрытности передачи информации и повышению ее имитостойкости.

В статье представлены результаты исследований, полученные при выполнении плановых НИОКР, исполнителем которых является ОАО «ВИКОР».

Annotation. Article deals with the synthesis of optimal problem-oriented complex signals with desired properties. The possibility of a significant increase in noise immunity systems synchronize data transmission in automated information control and telecommunication systems using new technology synthesis of complex noise-like signals (SSHPS) consisting of components with a low bit depth binary symbols. It is shown that this approach has a number of additional benefits related to an increase in secrecy of information transfer and increase its imitoprotection.

The paper presents research results obtained during the implementation of planned R & D executed by the JSC "Vikor".

Ключевые слова. Измерение, модуль сравнения, нормальное распределение, образ-остаток, помехоустойчивое кодирование, статистические данные, теорема об остатках, характеристическая функция.

Key words. Measurement, comparison module, the normal distribution, the image-residue noiseless coding, statistics, Remainder Theorem, the characteristic function.

Актуальность исследований

Шумоподобные сигналы (ШПС) находят все большее применение в системах радиотехнических измерений и передачи информации. При этом расширяется и их функциональное предназначение. Ранее это были сигналы синхронизации (СС) и дальномерные коды (ДК), используемые в системах передачи данных, радиолокационных и навигационных системах. В настоящее время ШПС используются в качестве несущей, которая промодулирована более низкочастотным импульсным информационным сигналом. Такая технология известна также как технология CDMA [1].

При этом к ШПС предъявляются различные требования. Например, они должны обладать хорошими ав-

токорреляционными и взаимно корреляционными свойствами [1–4].

Такие свойства придают радиотехническим системам (РТС), использующим сложные сигналы, такие характеристики, как высокая помехозащищенность и точность измерений, устойчивость системы синхронизации передаваемых данных. Кроме того, их использование обеспечивает подавление замираний в каналах связи с многолучевостью, обеспечение многостанционно-го доступа при одновременной работе нескольких РТС в одном и том же диапазоне частот, обеспечение электромагнитной совместимости с узкополосными системами передачи информации [2].

Особую актуальность синтез ШПС приобрел в свя-

Кузнецов Валерий Иванович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник, ОАО «Военно-инженерная корпорация», тел. 8 (495) 399-98-19;

Кукушкин Сергей Сергеевич – доктор технических наук, профессор, начальник отдела, ОАО «Военно-инженерная корпорация».

Kuznetsov Valery – doctor of engineering, the senior research associate, the leading researcher, JSC Military and Engineering Corporation, tel. (495) 399-98-19;

Kukushkin Sergey – doctor of engineering, the professor, the head of department, JSC Military and Engineering Corporation.

зи с проблемой защиты при передаче информации систем синхронизации принимаемых данных.

Воздействие естественных и преднамеренных помех на существующие системы приема информации может привести к срыву синхронизации и последующей потере передаваемых данных. Для повышения устойчивости процесса передачи информации в условиях помех требуются меры по защите систем синхронизации от мешающих воздействий различного рода. Одним из путей достижения этой цели является адаптация свойств и параметров синхронизирующих сигналов, используемых в системах передачи данных, к заданной помеховой обстановке, что наиболее эффективно достигается путем изменения синхронизирующих кодовых последовательностей (СКП), представляющих собой особую разновидность ШПС.

При этом данные о параметрах действующих помех, используемых при синтезе оптимальной СКП, предполагается получать в результате работы систем радиомониторинга.

Во многих случаях перестройку синхронизирующего сигнала удобнее производить, не подвергая изменения всю СКП, а только ее часть.

Методы синтеза СКП можно разделить на математические (аналитические) (ансамбли Голда, Кассами, Вейла) и компьютерные (численные) (генетический алгоритм синтеза случайных кодов, метод, разработанный для системы Galileo, метод покоординатного спуска и др.) [2].

Математические методы синтеза

Математические методы синтеза среди других методов исследований отличаются тем, что используют фундаментальные положения, применение которых позволяет точно определить направление приложения усилий для разрешения множества противоречий, которые имеют место в прикладных задачах.

Быстрое развитие методы синтеза псевдослучайных последовательностей получили благодаря успехам в области аналитической теории чисел и совершенствованию математической теории конечных полей. Притягательная сила аналитической теории чисел, основу развития которой составили теоремы Ферма, Эйлера и других выдающихся ученых более 300 лет не оставляла в покое мировое математическое сообщество. В XIX веке без вклада в развитие теории чисел нельзя было рассчитывать на признание заслуг в области математики. Долгое время этого добивался Гаусс. Благодаря этому стремлению основное достижение Гаусса в области «квадратичных вычетов» оказалось настолько значительным, что носит название «золотой теоремы». Квадратичные выче-

ты a , представляющие собой образы-остатки $x^2 \equiv a \pmod{m}$, нашли применение при синтезе сложных сигналов с заданными свойствами [2]. Квадратичные образы-остатки и символы Якоби или Лежандра составляют основу формирования сложных сигналов с двузначной автокорреляционной функцией [1]. Таким образом, у истоков науки, которая посвящена только направлению синтеза сложных сигналов, стояли великие математики Гаусс, Якоби и Лежандр. При этом особая роль в развитии этой области знаний принадлежит теории конечных полей Галуа, позволившая рассмотреть двоичные кодовые конструкции шумоподобных сигналов (ШПС) с позиций наличия у них групповых свойств. В их числе инвариантность ШПС по отношению к сдвигу разрядов двоичного кода. Еще более значительные возможности для совершенствования теории синтеза ШПС предоставила конструктивная теория конечных полей [1]. Она позволила разработать основополагающие обобщенные понятия, необходимые для синтеза проблемно-ориентированных сложных сигналов.

Успехи в области прикладной математики, посвященной синтезу интеллектуальных сигналов, с одной стороны, и расширяющееся практическое использование цифровых технологий в системах связи, с другой – способствовали становлению и развитию нетрадиционного направления исследований.

При этом объектом исследований стали не только свойства чисел в различных их представлениях в двоичной и десятичной системах счисления, но и новые их характеристики, например, корреляционные свойства при приеме и обработке различных кодовых комбинаций. К их числу принадлежат свойства автокорреляционных функций (АКФ) при приеме отраженных и переизлученных сигналов, что имеет место в радиолокационных комплексах, а также взаимно корреляционных функций (ВКФ), в том случае, когда в приемном устройстве хранится копия информационного ШПС. В этом случае весь поток принимаемых символов сравнивают на основе корреляционной обработки последовательностей бит с копией сигнала, который требуется идентифицировать в условиях помех.

Модель синтеза сложных сигналов с двузначной корреляционной функцией, основанной на квадратичных образах-остатках

Основу синтеза кодов с заданными свойствами (например, с двузначной автокорреляционной функцией) на основе символов Якоби составляет формирование последовательности символов по следующему правилу [1–3]:

$$a_i = \begin{cases} \left[\frac{1}{n} \right] & \text{при } (i, n) = 1; \\ 1 & \text{при } i = 0 \pmod{p} \text{ и } i = 0 \pmod{p+2}; \\ -1 & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Пусть, например, $n=15=3 \times 5$, где $m_1=p=3$ и $m_2=p+2=5$ – модули сравнения.

Символы Якоби в соответствии с их определением равны

$$\left(\frac{\alpha}{15} \right) = \left(\frac{\alpha}{3} \right) \cdot \left(\frac{\alpha}{5} \right),$$

где α – квадратный остаток, иначе называемый «квадратичный вычет».

Особенность представления данных квадратичными образами-остатками проявляется в цикличности их повторения:

- для $m_1=3$ – образы-остатки $a_1 \{0,1,1\}, \{0,1,1\}, \dots$ (длительность цикла $\delta_1=3$);
- для $m_2=5$ – образы-остатки $a_2 \{0,1,4,4,1\}, \{0,1,4,4,1\}, \dots$ (длительность цикла $\delta_2=5$).

Модель синтеза сложных сигналов с двузначной автокорреляционной функцией, основанная на квадратичных образах-остатках, предполагает использование символов Якоби

$$\left(\frac{\alpha}{15} \right) = \left(\frac{\alpha_1}{3} \right) \cdot \left(\frac{\alpha_2}{5} \right)$$

Вычисление символов Якоби:

$$1) \left(\frac{1}{15} \right) = \left(\frac{1}{3} \right) \cdot \left(\frac{1}{5} \right) \text{ («1», так как квадратичный остаток 1 по модулям 3 и 5 есть (см. таблицу);}$$

2) $\left(\frac{2}{15} \right) = \left(\frac{2}{3} \right) \cdot \left(\frac{2}{5} \right) = (-1) \cdot (-1) = 1;$

$$3) \left(\frac{3}{15} \right) = \left(\frac{3}{3} \right) \cdot \left(\frac{3}{5} \right) = 1 \cdot (-1) = -1 \text{ («1» по mod 3, так как квадратичный остаток 0 есть и «-1» по mod 5, так как остатка 3 по mod 5 не существует, см. таблицу);}$$

4) $\left(\frac{4}{15} \right) = \left(\frac{1}{3} \right) \cdot \left(\frac{4}{5} \right) = 1 \cdot 1 = 1;$

$$5) \left(\frac{10}{15} \right) = \left(\frac{5}{15} \right) = \left(\frac{0}{5} \right) = 1;$$

$$\text{-----}$$

продолжая, далее получим

$$14) \left(\frac{14}{15} \right) = \left(\frac{2}{3} \right) \cdot \left(\frac{4}{5} \right) = (-1) \cdot 1 = -1.$$

Квадратичные образы-остатки и цикличность их повторения

$x^2 \equiv$	0	1	4	9	16	25	36	49	64	81	100
$\alpha \pmod{3}$	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1
$\alpha \pmod{5}$	0	1	4	4	1	0	1	4	4	1	0

Тогда на основе символов Якоби может быть сформирована следующая последовательность элементов кодовой последовательности:

$$a_1 = a_2 = a_4 = a_8 = 1;$$

$$a_7 = a_{11} = a_{13} = a_{14} = -1.$$

Числа 0, 5 и 10 сравнимы с 0 по модулю 5. Следовательно, $a_0 = a_5 = a_{10} = 1$. Кроме того, символы с индексами $i = 3, 6, 9, 12$ имеют общий делитель с n , равный 3. Это значит, что в соответствии с приведенным выше правилом кодирования символы принимают значение «-1»:

$$a_3 = a_6 = a_9 = a_{12} = -1.$$

В результате будет сформирована следующая последовательность символов:

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}
1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1

Рассмотренный алгоритм определяет способ построения последовательностей символов с заданными свойствами и периодом N , равным произведению p и $p+2$ $N=p(p+2)$.

Таким образом, квадратичные образы-остатки составляют основу синтеза кодов и сложных сигналов с заданными свойствами. В результате обеспечивается общая методическая взаимосвязь передачи информации и синтеза сложных сигналов.

Новое занятие, связанное с синтезом сложных проблемно-ориентированных псевдослучайных кодовых последовательностей, оказалось не менее увлекательным по сравнению с традиционными пристрастиями математиков, которые были связаны с доказательствами теорем, относящимися к области теории чисел: доказательства простоты больших чисел и разложением чисел большой разрядности на сомножители. Здесь также был свой Ферма-Баркер.

Им были приведены примеры идеальных кодовых конструкций длины (N)

$$N_1 = 5 - \langle 00010 \rangle_2; N_2 = 7 - \langle 1110010 \rangle_2;$$

$$N_3 = 11 - \langle 11100010010 \rangle_2,$$

которые при корреляционной обработке обеспечивали наилучшее проблемно-ориентированное решение минимаксной задачи, заключающейся в обеспечении минимума значений боковых лепестков сложных сигналов при их корреляционной обработке при максимальном уров-

не основного пика автокорреляционной функции.

В последующем синтез двоичных псевдослучайных последовательностей (ПСП) с наилучшими корреляционными характеристиками, который вначале представлялся как своеобразная игра с кодовыми конструкциями различной длины N , которая имела, в том числе и ярко выраженную познавательную направленность.

Например, была найдена кодовая конструкция длины $N=13$ – $\langle 1111100110101 \rangle_2$, которая также обладала свойствами идеальных кодов Баркера (см. рис 1,б).

Других кодовых конструкций, обладающих такими же свойствами, не было найдено. Также известно [1], что особыми свойствами обладает следующая кодовая конструкция (КК): $KK_0 = \langle 110 \rangle_2$, автокорреляционная функция которой представлена значениями $\{-1, 0, 3\}$ (у нее максимальный пик равен 3, а боковые лепестки R_k – это -1 и 0).

Особенности проявления корреляционных свойств кодовых последовательностей, относящихся к классу «идеальных», представлены на рис. 1,а и рис. 1,б.

исследования. По сути, теория и моделирование дополняют друг друга. В этом также заключено принципиальное отличие предлагаемого подхода от аналогичных решений, известных ранее [2, 3]. При проведении теоретических исследований также используются новые приемы и технологии. Статья посвящена основам новой прикладной теории синтеза сложных составных ПСП (СПСП), которые отличаются от известных тем, что составлены не из одной, а из нескольких кодовых конструкций ($KK_i, i = 1, 2, \dots, k$).

Модели построения сложных широкополосных составных сигналов для повышения скрытности и помехоустойчивости системы синхронизации символов и сообщений при передаче и приеме информации

Модель №1 (синтез оптимальных СПСП сверхмаксимальной длительности)

Внешний код $\langle 110 \rangle_2$,
внутренний код $\langle 1110010 \rangle_2$.

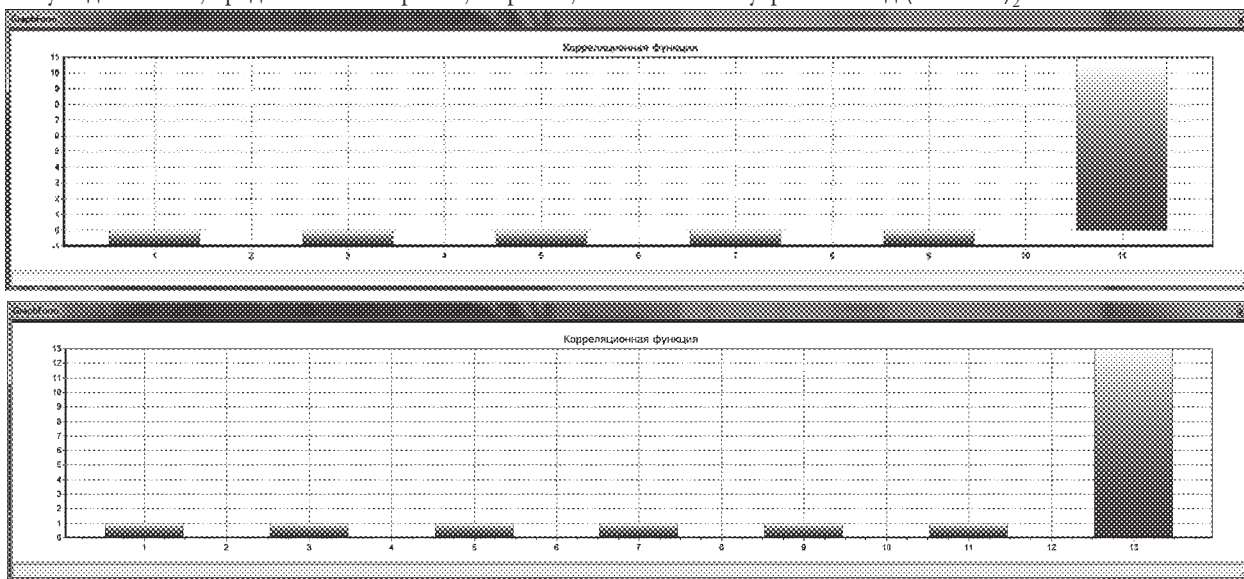


Рис. 1. Иллюстрация особенностей проявления корреляционных свойств, присущих коду Баркера: а – $\langle 11100010010 \rangle$, $N=11(\max R_k=1)$; б – $\langle 1111100110101 \rangle$, $N=13(\max R_k=1)$

При этом сложные ПСП используются для решения различных задач:

- 1) синхронизации данных;
- 2) повышения помехоустойчивости передачи информации;
- 3) для разрешения неоднозначности полученных результатов измерений в ГНСС ГЛОНАСС/GPS;
- 4) в качестве несущих при расширении спектра, которые модулируются низкочастотными информационными символами.

При синтезе ПСП с заданными свойствами определяющее значение имеют проведенные теоретические

Синтез составного ШПС

$$\begin{aligned} &|+++---+|+++---+|---++--+| \quad (1) \\ &|\leftarrow KK1 \rightarrow||\leftarrow KK2 \rightarrow||\leftarrow KK3 \rightarrow|, \end{aligned}$$

где $KK1$ и $KK2$ – внутренний код Баркера с $N=7$ в прямом и инверсном виде, для которого закон изменения полярности задан символами «110» внешнего кода (при этом в представленной модели двоичный символ «1» представлен знаком «+», а символ «0» – знаком «-»).

Модель №2 (синтез сигналов синхронизации (СС))

$$0000 \ 11100100 \ 1111 \quad (2)$$

$$|\leftarrow KK1 \rightarrow||\leftarrow KK2 \rightarrow||\leftarrow KK3 \rightarrow|,$$

где в качестве примера $KK2$ – это ПСП (код Баркера с

$N=7$, дополненный символом «0»), а $KK1$ и $KK3$ – кодовые конструкции, обеспечивающие дополнительную его защиту от имитации информационными символами.

Научная и практическая значимость нового подхода заключается в следующем:

1) передача частей KK_i составной псевдослучайной последовательности (СПСП) может быть осуществ-

на следующей последовательностью двоичных символов:

```
111000100101110001001011100010010000111011
01000111011011110001001000011101101111000100101
110001001011100010010000111011010001110110111100
01001000011101101000111011010001110110100011101
10111100010010111000100100001110110111100010010.
```

Ее ВКФ приведена на рис 2.

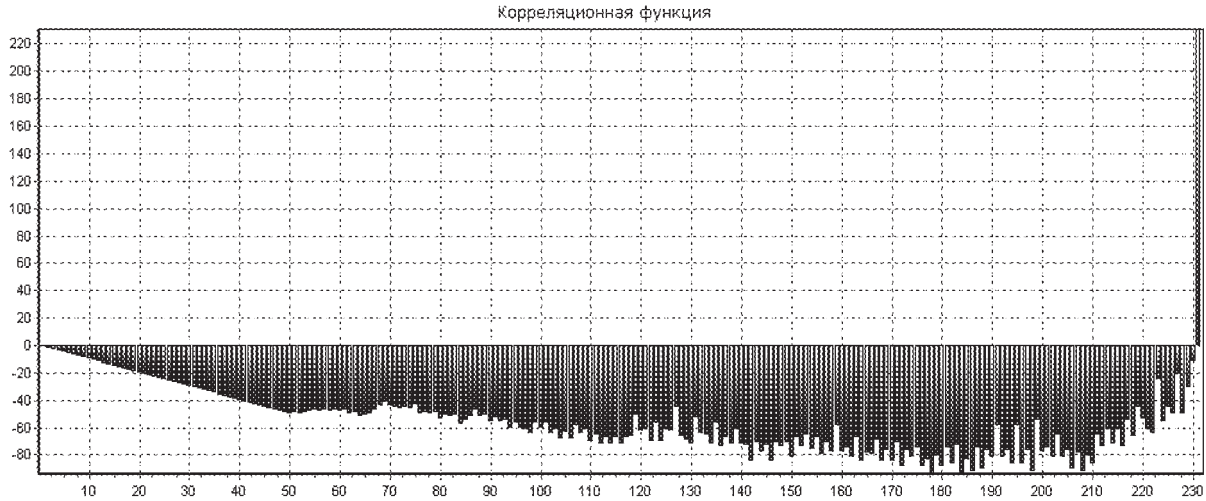


Рис. 2. Результаты корреляционной обработки синтезированного составного сложного псевдослучайного сигнала

влена по параллельным каналам связи и на различных частотно-временных позициях, при этом при несанкционированном приеме не может быть обеспечена их свертка;

2) возможны различные варианты проблемно-ориентированного синтеза оптимальных составных СПСП, при этом выделены два основных направления синтеза, определяемые соответственно моделями №1 и №2;

3) разработана основа предлагаемого синтеза – проблемно-ориентированные методы конструктивной теории конечных полей.

Первый вариант синтеза (модель №1) связан с определением внутреннего и внешнего кодирования фазоманипулированных шумоподобных сигналов (ШПС). Область применения: новые структурно-кодовые конструкции (СтКК) перспективной ГНСС «ГЛОНАСС» и сигналы радиолокационных станций (РЛС).

Второй вариант синтеза (модель №2) ориентирован на сигналы синхронизации современных систем передачи данных (СПД).

Модель составляет основу формирования «интеллектуальных» сложных шумоподобных сигналов с заданными свойствами взаимно корреляционной функции (АКФ).

Так, например, на ее основе синтезирована СПСП длины $N=231$, которая не имеет положительных боковых лепестков на фоне основного пика. Она представле-

нута по параллельным каналам связи и на различных частотно-временных позициях, при этом при несанкционированном приеме не может быть обеспечена их свертка;

Другая постановка задачи синтеза СПСП предполагает обеспечение минимума боковых лепестков различных полярностей. Одно из ее решений – это следующая кодовая последовательность длины $N = 1001$:

```
111000100101110001001011100010010000111011010001
110110111100010010000111011011110001001011100010
010111000100100001110110100011101101111000100100
001110110111100010010111000100101110001001000011
101101000111011011110001001000011101101111000100
101110001001011100010010000111011010001110110111
100010010000111011011110001001011100010010111000
100100001110110100011101101111000100100001110110
100011101101000111011010001110110111100010010111
000100100001110110111100010010000111011010001110
110100011101101111000100101110001001000011101101
111000100101110001001011100010010111000100100001
110110100011101101111000100100001110110111100010
010111000100101110001001000011101101000111011011
110001001000011101101000111011010001110110100011
101101111000100101110001001000011101101111000100
101110001001011100010010111000100100001110110100
011101101111000100100001110110100011101101000111
011010001110110111100010010111000100100001110110
111100010010111000100101110001001011100010010000
11101101000111011011110001001000011101101.
```

Ее взаимно корреляционная функция представлена на рис. 3.

Для сравнения ВКФ одной из известных ПСП, имеющей ту же длину $N=1001$, приведена на рис. 4.

Из представленных иллюстраций следует, что синтезированная СПСП характеризуется минимумом боковых лепестков. Более того, их наибольшие значения следуют со строгой периодичностью, что позволяет использовать это свойство при суммировании частей СПСП, задержанных на время, равное периоду повторения боковых лепестков (БЛ).

Кроме того, для синтеза сложных СПСП используется модернизированный морфологический анализ (ММА) [1], который позволяет сформулировать основополагающие системные принципы синтеза сигналов. Один из них ориентирован на использование свойства симметрии при синтезе сложных СПСП. Иллюстрация, поясняющая используемые при синтезе основополагающие принципы симметрии, приведена на рис. 4. Из нее следует, что общая СПСП, составленная из трех ее частей, обладает лучшими автокорреляционными свойствами среди других последовательностей той же длины.

На рис. 5 представлена взаимная корреляционная функция (ВКФ) синтезированного в соответствии с моделью №2 составного синхросигнала (СС), который представляет собой 15-разрядную кодовую кон-

струкцию цикловой синхронизации $KK1+KK2+KK3$: **001110001001101**.

В то же время может быть организована параллельная корреляционная обработка для определения ВКФ составных частей. Их вид приведен на рис. 6.

Сравнительный анализ свидетельствует о том, что рассмотренные синтезированные кодовые последовательности удовлетворяют многим требованиям, которые, например, предъявляются к сигналам синхронизации в создаваемых адаптивных системах телеизмерений.

При суммировании ВКФ составных частей получают сверхидеальный код $\langle + - + - | +15 \rangle - + - + \rangle$ - у него боковые лепестки такие же, как и у идеального кода Баркера, а основной пик в три раза больше.

Во-первых, помимо последовательного приема



Рис. 3. Взаимно корреляционная функция для синтезированной СПСП длины $N = 1001$



Рис.4. Взаимно корреляционная функция ПСП длины $N=1001$, которая используется при передаче информации



Рис. 5. Взаимная корреляционная функция (ВКФ) составного СС, принимаемого в целом без деления на части

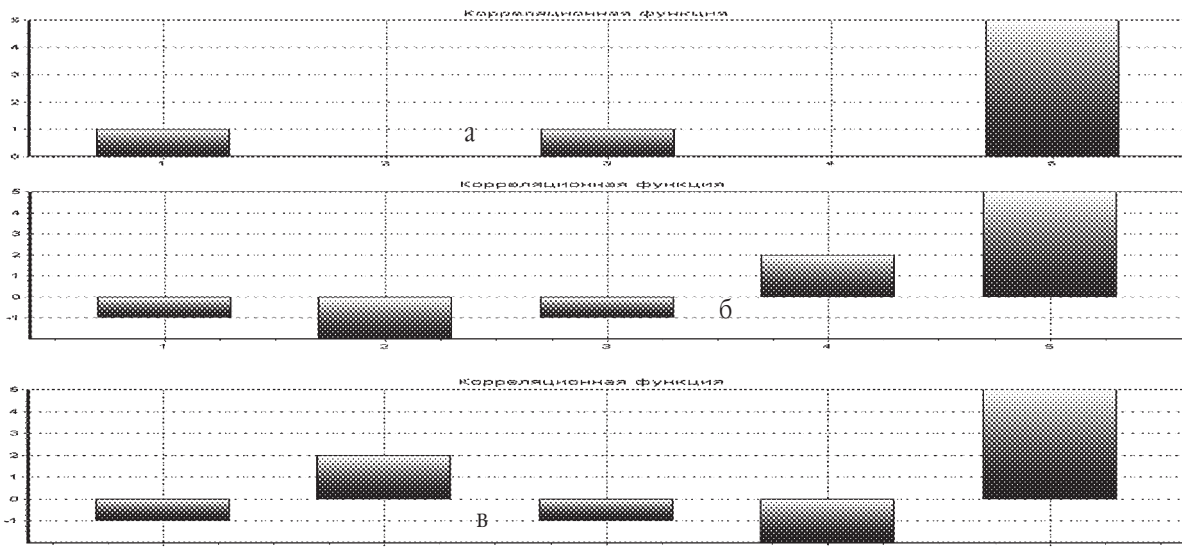


Рис. 6. Иллюстрация особенностей формирования и совместной корреляционной обработки трех составных частей $KK1+KK2+KK3$ 15-разрядного сигнала цикловой синхронизации: 001110001001101:
 а) – идеальная кодовая конструкция $KK2$ (код Баркера 00010 с числом символов $N_2 = 5$); б) первая кодовая конструкция $KK1$ (код 00111 с числом символов $N_1 = 5$); в) третья кодовая конструкция $KK3$ (код 01101 с числом символов $N_1 = 5$)

и обработки она приводит к возможности организации процесса параллельного приема и обработки отдельных составных ее частей.

Эффект, получаемый при суммировании рассмотренных трех составных частей, имеющих одну и ту же разрядность, можно рассматривать, как уменьшение (сжатие) длины СКП, которое обеспечивает для получаемой пятиразрядной кодовой комбинации увеличение в 3 раза энергетического потенциала основного лепестка (при этом боковые лепестки не превышают значения $R \leq |1|$).

Во-вторых, крайние последовательности могут меняться местами, а центральная часть СКП, представляющая собой 5-разрядный код Баркера $\langle 00010 \rangle_2$, может

быть заменена на его аналоги: $\langle 01000 \rangle_2, \langle 11101 \rangle_2, \langle 10111 \rangle_2$.

Благодаря этому СКП может достаточно просто изменяться в условиях воздействия помех. Производимая при этом замена не изменяет спектрально-энергетические характеристики СКП и может производиться в соответствии с определенным кодом, выполняющим функции ключа. В результате этого расширяются возможности идентификации, упрощается процедура различения истинного сигнала от его ретранслированной копии.

Новый теоретический результат заключается в том, что при использовании предлагаемой структуры СШПС и распараллеленной процедуры его обработки корреляционные и взаимно корреляционные свойства

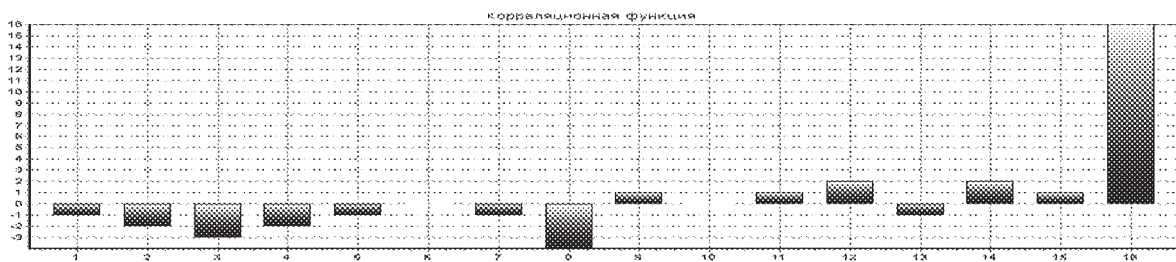


Рис. 7. ВКФ квазиоптимального 16-разрядного сигнала синхронизации, включенного в стандарт США

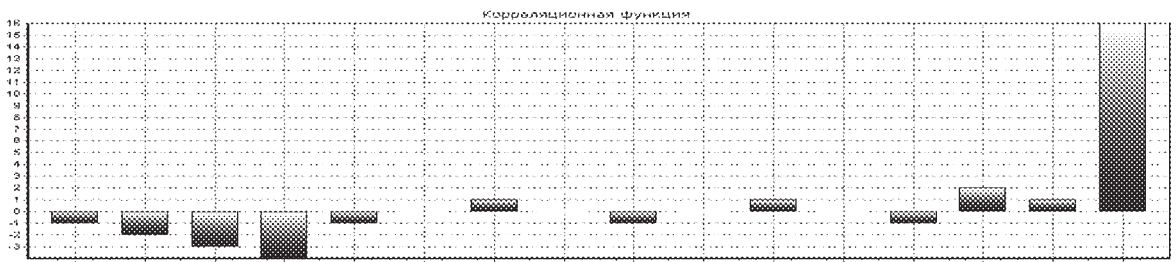


Рис. 8. ВКФ синтезированного составного 16-разрядного сигнала синхронизации

оказываются в три раза более предпочтительными по критерию максимума основного пика корреляционной функции при уровне боковых лепестков, соответствующему значениям идеального кода Баркера.

Более предпочтительными являются и другие синтезированные проблемно-ориентированные конструкции СС, о чем свидетельствует сравнение их ВКФ и ВКФ известных СКП, которые используются в существующей практике [5, 6] (рис.7, рис.8).

Для подтверждения данного вывода на рис.7 приведена ВКФ квазиоптимального 16-разрядного сигнала синхронизации, включенного в стандарт США в качестве кандидата для использования в системах передачи информации. При этом на рис.8 пред-

ставлена ВКФ другого синтезированного проблемно-ориентированного 16-разрядного сигнала синхронизации 0000**10101100**1111, составленного из трех частей: 1) $KK1 = \langle 0000 \rangle_2$; 2) идеального кода Баркера с $N=7$, дополненного символом «0», $KK2 = \langle 10101100 \rangle_2$; 3) $KK3 = \langle 1111 \rangle_2$.

Из сопоставления следует, что синтезированные составные ПСП по эффективности противостояния помехам не хуже лучших известных их аналогов, но они имеют возможность деления на части, что позволяет распараллелить процедуру их обработки в приемном устройстве.

Литература

1. Кукушкин С.С. Теория конечных полей и информатика: т.1 «Методы и алгоритмы, классические и нетрадиционные, основанные на использовании конструктивной теоремы об остатках», - М.: МО РФ, 2003 – 284с.
2. Гантмахер В.Е., Быстров Н.Е., Чеботарев Д.В. Шумоподобные сигналы. Анализ, синтез, обработка. - СПб.: Наука и техника, 2005, 400 с.
3. Свердлик М.Б. Оптимальные дискретные сигналы. - М.: Сов. радио, 1975, 200 с.
4. Лидл Р., Нидеррайтер Г. Конечные поля. В 2-х томах. Пер с англ. - М.: Мир, 1988. - 882с.
5. Былински П., Ингрэм Д. Цифровые системы передачи //Перевод с англ., под ред. А.А. Венцеля/, М.: «Связь», 1980. – 360с.
6. «Современная телеметрия в теории и на практике / Учебный курс», СПб.: Наука и Техника, 2007. – 672с.

Материал поступил в редакцию 19. 03. 2014 г.