

УДК 621.396:621.391.26

## БИНАРНЫЕ R2-КОДЫ, ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПРИМЕНЕНИЕ

Ю. В. Чепруков<sup>а</sup>, канд. техн. наукМ. А. Соколов<sup>б</sup>, доктор техн. наук, профессор<sup>а</sup>Российский государственный университет туризма и сервиса, филиал, Сочи, РФ<sup>б</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** проведенный обзор показал, что сейчас в различных системах используются в основном давно предложенные и подробно изученные сигналы. Повышение эффективности возможно при использовании более совершенных бинарных кодов и основанных на них сигналов. Среди известных  $N$ -элементных бинарных кодов, применяемых в системах связи, радиолокации и управления, отсутствуют такие, которые при изменении  $N$  в широких пределах позволяют получать достаточно низкий уровень боковых пиков автокорреляционной функции. Цель работы — синтез бинарных кодов с уровнем  $R$  боковых пиков автокорреляционной функции. Задача синтеза представлена в виде системы неравенств, указаны особенности задачи, обоснован выбор метода решения. **Результаты:** приведены результаты синтеза кодов с  $R=2$ ,  $N \leq 28$ , названных R2-кодами. Они эффективнее лучших кодов Баркера по относительному уровню боковых пиков в 14/13 раза, позволяют получить разнообразные коэффициенты сжатия (22 варианта), и количество их достаточно велико (480). Составлена таблица R2-кодов. Обосновано предположение, что  $N=28$  соответствует максимальному порядку R2-кодов. Имеется большое количество пар кодов, при сложении автокорреляционных функций которых осуществляется компенсация боковых пиков. Получены дополнительные последовательности с полной компенсацией боковых пиков, в частности для  $N=8$  установлено наличие восьми пар. Представлены различные по численности и корреляционным характеристикам ансамбли. **Практическая значимость:** внедрение R2-кодов в системы связи позволит повысить эффективность систем. В радиолокационных станциях, оснащенных системой селекции движущихся целей, можно повысить эффективность обнаружения сигналов на фоне пассивных помех при использовании пар R2-кодов с компенсацией боковых пиков. R2-коды могут применяться в системах управления и контроля при создании алфавитов передачи данных. Например, для систем управления мобильными роботами в условиях наличия помех, в системах контроля расхода взвесей твердых веществ, жидкостей, газов или плазмы технологических или производственных установок.

**Ключевые слова** — фазоманипулированные сигналы, бинарные коды, автокорреляционная функция, уровень боковых пиков, корреляционная функция, оптимизация.

### Введение

В современных системах управления, связи и радиолокации широко используются шумоподобные сигналы (ШПС). Разновидностью ШПС являются фазоманипулированные сигналы (ФМС) [1], которые состоят из последовательности  $N$  радиоимпульсов с одинаковой частотой и амплитудой. Очередность следования радиоимпульсов с различными начальными фазами характеризуется бинарной кодовой последовательностью или просто кодом ФМС. Назовем ФМС, автокорреляционная функция (АКФ) которых в области боковых пиков может изменяться в пределах  $\pm R$  ( $0 \leq R \leq N-1$ ,  $R$  — целое), сигналами  $R$ -го рода (ФМС- $R$ ), а соответствующие им коды  $G_{R,N}$  —  $R$ -кодами. Наибольшую известность получили коды Баркера (КБ) [2], для них  $R=1$ . Обозначим для  $N$ -элементных КБ  $B_1 = 1/N$  — относительный уровень боковых пиков (УБП) АКФ;  $K_c = N$  — коэффициент сжатия;  $N_{\max 1} = 13$  — максимальное значение  $N$ ;  $N1 = 7$  — общее количество КБ [2].

Проведем краткий обзор литературы, в которой рассмотрены системы с ФМС, разновидности сигналов и используемых кодов, а также задачи их синтеза и обработки.

Широкое применение нашли  $M$ -последовательности с УБП  $B_2 \approx 1/\sqrt{N}$  [1]. Они сравнительно просто реализуются схемотехнически, количество кодов  $N^2$  велико, но уровень  $B_2$  недостаточно мал.

Фазоманипулированные сигналы применяются в современных системах мобильной связи. В сотовых системах стандарта CDMA (Code Division Multiple Access — системы с кодовым разделением каналов) [3, 4] для повышения помехоустойчивости в кодах используют ортогональные коды Уолша. Здесь главным условием применимости указанной системы сигналов является ортогональность кодов [3]. Вместе с тем применяются бинарные коды Голда и Касами [3], опирающиеся на  $M$ -последовательности. В системах с кодовым разделением, где сигналы передаются на уровне шумов, актуальна задача применения более совершенных кодов, имеющих лучшие корреляционные характеристики.

Цифровое кодирование дискретной информации, например Манчестерский код, применяется в технологиях Ethernet и Token Ring [5]. Используется перепад потенциала («1» — перепад от низкого уровня сигнала к высокому, а «0» — наоборот). Этот код не содержит постоянной составляющей тока, что важно при построении

нии сетей, в которых компьютеры связаны линиями передачи.

Дополнительные последовательности в виде бинарных кодов с равным числом  $N$  символов [1] представляют собой такие пары, у которых при сложении их АКФ главные пики удваиваются, а боковые пики полностью компенсируются, так что УБП суммарной АКФ равен нулю. В работах [1, 6] приведены примеры кодов с  $N=4, 8, 10$  при  $R=3$ . Даны варианты создания из дополнительных последовательностей разнообразных композиций. Это позволило ввести так называемые  $E$ - и  $D$ -коды, составляющие коды Велти и четвертичные коды [1]. Заметим, что требования к УБП АКФ отдельных последовательностей не рассматривались, а ключевым свойством сигналов является компенсация пиков суммарной АКФ.

В работе [7] указаны возможности построения ФМС, в которых отдельные дискреты сложного сигнала представляются частотно-модулированными сигналами. Рассмотрено применение ортогональных кодирующих последовательностей на основе  $E$ -кодов. Приведены варианты внутридискретной модуляции сигналов (линейной, квадратичной или кубической), причем бинарными кодами всего сигнала являются  $E$ -коды. Исследованные сигналы предложено использовать в обзорных радиолокаторах, содержащих систему селекции движущихся целей, где при накоплении сигналов пачки осуществляется выделение полезных сигналов на фоне пассивных помех. Однако в работе отсутствуют рекомендации по выбору дополнительных последовательностей, используемых при построении  $E$ -кодов.

В работе [8] обращено внимание на необходимость проведения исследований по возможной интеграции сверхширокополосных систем с другими технологиями и системами, в частности, с теми, в которых используются ФМС и сигналы с линейной частотной модуляцией. Это может позволить снизить влияние межсимвольной интерференции при передаче данных. Следовательно, наличие систем кодов актуально для сверхширокополосных систем.

Совершенствование бинарных кодов для построения ФМС насущно для сверхширокополосных радиолокационных систем [9]. Здесь при обзоре пространства узким лучом антенны в каждом угловом направлении излучается конечное число импульсов, составляющих пачку. Обработка пачки позволяет увеличить выходное отношение сигнал/шум, реализовать доплеровские методы обнаружения движущихся целей на фоне пассивных помех. Для сверхширокополосных систем актуально использование излучения пачек из ШПС, например дополнительных последовательностей, что позволяет улучшить функционирование системы селекции движущихся

целей, повысить качество выделения сигналов на фоне помех.

Краткий анализ показывает актуальность вопроса получения новых бинарных кодов для создания более совершенных одиночных ФМС и ансамблей. По-видимому, за последнее время не появилось новых кодов и ансамблей, которые позволили бы повысить эффективность систем с ФМС.

Особо подчеркнем работу авторов [10], где сформулирована задача, предложен метод решения, представлены результаты синтеза некоторых кодов с  $R=2, 3; N \leq 25$ . Показаны существенные преимущества синтезированных кодов по сравнению с  $M$ -последовательностями.

В представленной работе получены все возможные коды с  $R=2, N \leq 28$ , выполнен анализ их корреляционных характеристик, даны предложения по применению полученных результатов. Эти коды ( $R2$ -коды) позволяют оптимизировать выбор ФМС для систем управления, связи и радиолокации. Показано, что  $R2$ -коды составляют замкнутое множество со специфическими свойствами.

#### Задача и методика синтеза, особенности решения

Рассмотрим последовательность  $N$  радиоимпульсов одинаковой длительности  $T$ , начальная фаза которых равна 0 или  $\pi$  и которые составляют ФМС. Обозначим  $\{G_{R,N}\} = \{P_j, j = \overline{1, N}\}$ ,  $P_j = \pm 1$  бинарные последовательности условных значений начальных фаз импульсов ФМС, которые соответствуют  $R$ -кодам. Пусть  $B_3 = R/N$  — относительный УБП АКФ этих  $R$ -кодов, а  $g_{R,N}$  — их количество [10].

Пусть  $S(t)$  определяет модуль АКФ бинарных кодовых последовательностей ФМС. В моменты  $t_k = kT$ , отсчитываемые от начала АКФ,  $S(t_k)$  принимает экстремальные или нулевые значения, причем  $S(t_N) = N$ .

Задача синтеза заключается в определении коэффициентов  $P_j$ , для которых выполняются неравенства вида [10]

$$S(t_k) = \left| \sum_{j=1}^k P_j \cdot P_{N+j-k} \right| \leq R_k, \quad k = \overline{1, N-1}, \quad (*)$$

где  $R_k$  — заданные по условию синтеза значения АКФ в моменты времени  $t_k$ , в частном случае можно для всех  $t_k$  в области боковых пиков задать одинаковое максимальное значение АКФ, равное  $R$ . Универсальность методики состоит в возможности задания различных, неравных значений  $R_k$ . Однако целесообразно сначала найти решения для случая равенства всех этих величин, а потом ввести дополнительные условия в виде различия некоторых из них. Введем некоторые опре-





учтены симметричные и асимметричные коды как самостоятельные.

Для  $N=22, 23, 24, 26, 27$   $R2$ -кодов не существует. Представленные коды имеют в  $q=(B_2/B_3) \approx 0,5\sqrt{N}$  раз более низкий УБП АКФ, чем  $M$ -последовательности. Для систем CDMA рассмотрены [18] возможности синтеза множества бинарных кодов Голда и Касами, относящихся к производным ансамблям [1]. В качестве производного сигнала используются  $M$ -последовательности. Благодаря большей эффективности  $R2$ -коды потенциально превосходят указанные ансамбли.

3. Найденные  $R2$ -коды с  $N=28$  эффективнее лучших КБ с  $N=13$  по относительному УБП в 14/13 раза, так как для КБ минимальное значение этого уровня  $B_1=1/13$ , а для  $R2$ -кодов  $B_3=(1/14) < B_1$ . То же справедливо и для следующих по убыванию  $R2$ -кодов с  $N=25$  и КБ с  $N=11$ . То есть  $B_1=1/11$ ,  $B_3=(2/25) < B_1$ , следовательно, отношение равно 25/22. Это соотношение относится и к другим  $R2$ -кодам и КБ.

4. Установлено, что среди полученных кодов можно выделить множество таких пар, для которых при сложении их корреляционных функций происходит частичная компенсация боковых пиков.

Например, для  $N=25$  выберем первый код из таблицы, а второй — (1,1,-1,-1,-1,1,1,1,1,1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,1,-1,1). Их индивидуальные АКФ — (1,0,-1,-2,-1,2,-1,-2,1,-2,-1,0,-1,0,-1,2,-1,2,-1,-2,1,0,25; 1,0,-1,2,-1,-2,-1,2,1,2,1,2,-1,0,-1,0,-1,-2,-1,-2,-1,2,1,0,25). Видно, что полусумма АКФ кодов равна (1,0,-1,0,-1,0,-1,0,1,0,1,0,-1,0,-1,0,-1,0,-1,0,-1,0,1,0,25). Обозначим  $B_4$  УБП суммарной АКФ, тогда  $B_4=1/N=1/25$ . Это в 2 раза меньше, чем у АКФ этих кодов в отдельности. Всего имеется 4 пары с такими свойствами.

Пусть для  $N=21$  первый код выбран из таблицы, а второй — (1,1,-1,-1,-1,-1,-1,1,1,-1,1,1,1,-1,1,-1,1). Половинки АКФ обоих кодов — (1,0,-1,-2,-1,2,-1,0,1,-2,-1,0,1,2,-1,2,-1,2,1,0,21; 1,0,-1,2,-1,-2,-1,0,1,2,-1,0,1,-2,-1,-2,-1,-2,1,0,21), тогда суммарная функция — (1,0,-1,0,-1,0,-1,0,1,0,-1,0,1,0,-1,0,-1,0,-1,0,1,0,21). Здесь  $B_4=1/21$ , существуют 36 пар таких кодов, причем некоторые суммарные характеристики имеют протяженные последовательности из нулей в окрестности главного пика.

Для  $N=19$  выберем первый код из таблицы, а второй — (1,1,1,-1,-1,-1,1,-1,-1,-1,-1,-1,1,-1,-1,1), их частные АКФ — (1,0,1,2,-1,2,1,2,1,2,1,2,1,0,1,-2,-1,2,19; 1,0,1,-2,-1,-2,1,-2,1,-2,1,-2,1,0,1,2,-1,-2,19). Тогда очевидно, что полусумма АКФ равна (1,0,1,0,-1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,-1,0,19). Следовательно,  $B_4=1/19$  и имеется 4 пары с такими свойствами.

Когда  $N=28, 20, 18$ , то пар  $R2$ -кодов со свойством компенсации пиков не существует, и для суммарной АКФ величина УБП такая, как для одиночных кодов.

Для всех  $N < 18$  существуют пары кодов с указанными свойствами, их количество различно (32—528). Близкие к идеалу суммарные АКФ можно получить для множества пар с  $N=12$ . У них в середине области боковых пиков одно значение равно -1, а все другие значения в этой области равны нулю. Кода с такой же характеристикой, но со значением +1 в середине области боковых пиков для  $N=12$  не существует, однако можно рассмотреть задачу поиска четверок кодов, для которых во всей области боковых пиков значения суммарной АКФ равны нулю.

Ранее упоминалось о существовании дополнительных последовательностей [1]. В настоящей работе установлено наличие таковых среди всех  $R2$ -кодов при  $N=8$ . Найденны 8 пар  $R2$ -кодов, при сложении АКФ которых боковые пики полностью компенсируются. Например, пусть (1,-1,-1,-1,1,1,-1,1) и (1,-1,-1,-1,-1,-1,1,-1) —  $R2$ -коды; (1,-2,1,0,-1,-2,-1,8) и (-1,2,-1,0,1,2,1,8) — индивидуальные АКФ, тогда (0,0,0,0,0,0,0,8) — суммарная АКФ. Кроме того, существует 8 пар  $R2$ -кодов, у которых результирующая АКФ имеет лишь одно ненулевое значение в области боковых пиков, например (0,0,0,1,0,0,0,8).

Для всех  $N < 8$  также существует множество  $R2$ -кодов со свойствами компенсации боковых пиков. Причем при  $N=4, 6$  имеется 4 и 12 кодов соответственно с одним ненулевым значением в области боковых пиков, а при  $N=3, 4$  имеются коды с полной компенсацией пиков.

Таким образом, установлено наличие пар  $R2$ -кодов, для которых имеется полная компенсация боковых пиков АКФ, найдены все дополнительные последовательности среди  $R2$ -кодов.

5. Полученные коды можно использовать для составления различных по численности и корреляционным характеристикам ансамблей. Для кодов ансамбля важна взаимная корреляционная функция (ВКФ). Обозначим  $V_{\max}, V_{\min}$  — абсолютные значения максимума и минимума модуля ВКФ двух кодов;  $B_5=V_{\max}/N$  — максимальное значение ВКФ относительно максимума АКФ;  $H(N, r)$  — количество ансамблей, состоящих из  $r$   $R2$ -кодов каждый.

Например, при  $N=28$   $V_{\min}=8, V_{\max}=27$  (это означает, что коды различаются одним символом). Можно составить  $H(28,2)=6$  ансамблей по два кода с  $V_{\min}$ ,  $B_5=8/28$ : (1,2), (1,6), (3,4), (4,5), (5,7), (6,8), где цифры в скобках — номера кодов из  $\{G_{2,28}\}$ .

Для разных пар при  $N=25$  значение ВКФ изменяется от  $V_{\min}=7$  до  $V_{\max}=11$ . Из множества кодов с  $N=25$  можно составить  $H(25,2)=6$  ансамблей по

два кода в каждом с  $V_{\max}$ ,  $B_5=11/25$ : (1,2), (1,3), (1,4), (2,3), (2,4), (3,4), где цифры в скобках — номера кодов из третьей колонки таблицы и строки для  $N=25$ .

Аналогично для троек с  $V_{\max}$  и  $H(25,3)=4$ : (1,2,3), (1,2,4), (1,3,4), (2,3,4). Имеется одна четверка, составленная из всех кодов с  $V_{\max}$ . Наименьшие значения  $V_{\min}=7$ ,  $B_5=7/25$  можно получить для пар кодов (1,3), (2,4). Чем ниже задается уровень ВКФ, тем меньшее значение  $H(N, r)$  получается. Для  $N=16$  значения  $V_{\min}=5$ ,  $V_{\max}=15$ . Имеется  $H(16,2)=8$  ансамблей по два кода с  $V_{\min}$ ,  $B_5=5/16$ .

В качестве примера ансамблей с малыми значениями  $N$  рассмотрим  $R2$ -коды с  $N=8$ , для которых  $V_{\min}=3$  и  $V_{\max}=7$ . Если задать значение  $V_{\min}$ ,  $B_5=3/8$ , то можно составить  $H(8,2)=40$  ансамблей по два кода. В их число попали и все 8 дополнительных последовательностей, указанных ранее в п. 4. Пример типичной характеристики: (-1,2, -1,0, -1,2,3,0,1, -2, -3,0,1, -2,1) — ВКФ двух указанных ранее дополнительных последовательностей.

Количество  $R2$ -кодов максимально при  $N=12$ . При  $N=8...16$  значения  $g_{2,N}$  сравнительно велики и можно составить ансамбли, состоящие из десятков кодов. Некоррелированность кодов таких ансамблей невелика. Задача синтеза таких ансамблей может быть решена, но в данной работе не рассмотрена. Итак, имеются обширные возможности построения ансамблей  $R2$ -кодов.

## Применение

Укажем некоторые варианты использования  $R2$ -кодов.

1. Для систем связи, в которых применяется временное и частотное разделение сигналов, а кодовое отсутствует (например, Global System for Mobile communication (GSM) — глобальная система мобильной связи). Существует принципиальная возможность создать параллельно с существующими каналами также каналы с ШПС, реализовав кодовое разделение абонентов. Количество каналов может быть сравнительно малым, они могут предоставляться эксклюзивным пользователям для скрытной связи. Общая пропускная способность возрастет. Телефонные аппараты пользователей должны быть доработаны для приема и передачи ШПС.

2. В системах связи с кодовым разделением. Внедрение более совершенных кодов позволит повысить эффективность. Например, с учетом сказанного ранее относительно кодов Уолша, Касами и Голда целесообразно попытаться использовать  $R2$ -коды для синтеза подобных по применению последовательностей.

3. Для радиолокационных станций, оснащенных системой селекции движущихся целей.

Использование в пачке множества пар  $R2$ -кодов с  $B_3=2/N$ , обладающих свойством компенсации боковых пиков суммарной АКФ, позволит повысить эффективность обнаружения сигналов на фоне пассивных помех.

4. В обзорных радиолокационных станциях. В них в качестве зондирующих сигналов возможно применение ФМС с различными кодами, например, содержащими данные о координатах станции. Летательные аппараты, принимая эти зондирующие сигналы от радиолокационных станций, в зоне которых они находятся, могут получать дополнительную информацию для решения своих навигационных задач. То же относится и к пеленгационным средствам, но уже применительно к летательным аппаратам.

5. Для систем управления и контроля.  $R2$ -коды могут иметь приложение при создании алфавитов передачи данных. Например, для систем управления мобильными роботами в условиях наличия помех [19], в системах контроля расхода взвесей твердых веществ, жидкостей, газов или плазмы технологических или производственных установок [20].

Для формирования и согласованной фильтрации возможно использование устройств на поверхностных акустических волнах, широко применяемых в системах мобильной связи [3, 4]. Согласованные фильтры для синтезированных сигналов могут быть построены также на микроэлектронных элементах [21]. Для всех  $R$ -кодов возможно существенное снижение УБП АКФ путем использования весовой обработки посредством соответствующих фильтров [22].

## Заключение

Проведен обзор некоторых современных систем и применяемых в них сигналов. Показано, что сейчас используются в основном давно предложенные и подробно изученные сигналы. Вместе с тем повышение эффективности систем возможно лишь при использовании более совершенных бинарных кодов и основанных на них сигналов. Сформулирована задача синтеза бинарных  $R$ -кодов и соответствующих им ФМС- $R$  с заданным характером изменения боковых пиков АКФ. Указаны особенности задачи, обосновано использование метода упорядоченного перебора. Приведены результаты синтеза  $R2$ -кодов. Аргументировано предположение, что  $N_{\max 2}=28$  соответствует максимальному порядку  $R2$ -кодов, приведены доводы необходимости и возможности строгого доказательства этого утверждения. Общее количество  $R2$ -кодов равно 480 (без инверсных), а параметр  $K_c$  может принимать 22 различных значения, что предоставляет широкие возможности выбора. Лучшие из

$R2$ -кодов эффективнее лучших КБ в 14/13 раза по относительному УБП. Установлено, что множество кодов, найденных для каждого значения  $N$ , является совокупностью прямых, зеркальных или зеркально-инверсных прямых кодов, а также симметричных и асимметричных кодов. Исследованы ВКФ различных  $R2$ -кодов, что позволило составить множество разнообразных ансамблей. Среди  $R2$ -кодов имеется большое количество пар кодов, при сложении АКФ которых осуществляется частичная компенсация боковых

пиков АКФ. Получены дополнительные последовательности с полной компенсацией боковых пиков, в частности для  $N=8$  установлено наличие восьми пар. Анализ показывает перспективность развития методов синтеза бинарных  $R$ -кодов для их применения в системах управления (при построении алфавитов кодирования для передачи данных), связи (применение более совершенных кодов), в радиолокации (для улучшения характеристик обнаружения целей на фоне пассивных помех и одновременной передачи данных).

## Литература

1. **Варакин Л. Е.** Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
2. **Michael J. Mossinghoff.** Wieferich pairs and Barker sequences // *Designs, Codes and Cryptography*. 2009. Vol. 53. N 3. P. 149–163.
3. **Ипатов В. П.** и др. Системы мобильной связи: учеб. пособие для вузов / под ред. В. П. Ипатова. – М.: Горячая линия-Телеком, 2003. – 272 с.
4. **Карташевский В. Г., Семенов С. Н., Фирстова Т. В.** Сети подвижной связи. – М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2001. – 302 с.
5. **Олифер В. Г., Олифер Н. А.** Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. – СПб.: Питер, 2002. – 672 с.
6. **Complementary sequences** // Wikipedia. [http://en.wikipedia.org/wiki/Complementary\\_sequences](http://en.wikipedia.org/wiki/Complementary_sequences). (дата обращения: 23.11.2013).
7. **Литюк Л. В.** Синтез, анализ и обработка систем радиолокационных фазоманипулированных сигналов с внутридискретной частотной модуляцией с заданными свойствами суммарной функции неопределенности: дис. ... канд. техн. наук / ТГРУ. – Таганрог, 2000. – 235 с.
8. **Сперанский В. С., Фролов А. А.** Анализ характеристик многочастотных сверхширокополосных систем связи: материалы Междунар. науч.-техн. конф. INTERMATIC-2011, Москва, 14–17 ноября 2011 г. Ч. 3. С. 64–67.
9. **Чапурский В. В.** Избранные задачи теории сверхширокополосных радиолокационных систем. – М.: Изд-во МГТУ им. Э. Н. Баумана, 2012. – 279 с.
10. **Чепруков Ю. В., Соколов М. А.** Синтез фазоманипулированных сигналов с требуемым уровнем боковых пиков АКФ // *Радиотехника*. 1991. № 5. С. 68–70.
11. **Башмакова И. Г.** Диофант и диофантовы уравнения. – М.: ЛКИ, 2007. – 72 с.
12. **Решение уравнений в целых числах.** <http://diofant.na.by/reshenie.htm> (дата обращения: 23.11.2013).
13. **Диофантовы уравнения.** <http://bars-minsk.narod.ru/teachers/diofant.html> (дата обращения: 03.05.2013).
14. **Теория чисел. Диофантовы уравнения.** <http://www.lomonosov-fund.ru/enc/ru/encyclopedia:0156:article> (дата обращения: 03.05.2013).
15. **Диофантовы приближения.** <http://gatchina3000.ru/great-soviet-encyclopedia/bse/028/552.htm> (дата обращения: 03.05.2013).
16. **Пелехатый М. И., Голубев Е. А.** Автокорреляционные свойства некоторых типов двоичных последовательностей // *Проблемы передачи информации*. 1972. Т. VIII. Вып. 1. С. 92–99.
17. **Графоаналитический метод оценки максимальных порядков кодов Баркера** / Ю. В. Чепруков, М. А. Соколов: сб. рефератов депонированных рукописей / ВИМИ. – М., 1991. Вып. № 2. – 18 с. – Деп. в НИИЭИР № 3-8826.
18. **Ipatov V. P.** Spread Spectrum and CDMA. Principles and Applications. – N. Y., John Wiley and Sons Ltd., 2004. – 373 p.
19. **Карпов В. Э., Платонова М. В.** Система навигации мобильного робота // *Информационные средства и технологии: тр. 18-й Междунар. науч.-техн. конф. Москва, 19–21 октября 2010 г. Т. 2. С. 56–63.*
20. **Мелик-Шахназаров А. М., Маркатун М. Г.** Цифровые измерительные системы корреляционного типа. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 128 с.
21. **А. с. 1709498 СССР, МКИЗ Н 03 Н 15/02, 17/00.** Согласованный фильтр / Ю. В. Чепруков, М. А. Соколов (СССР). – № 1709498; заявл. 06.12.1989; опубл. 30.01.92, Бюл. № 4. – 4 с.
22. **Чепруков Ю. В., Соколов М. А.** Метод оптимизации весовых фильтров сжатия фазоманипулированных сигналов // *Изв. вузов. Радиоэлектроника*. 1991. № 4. С. 31–37.

UDC 621.396:621.391.26

## Binary R2-Codes, Their Features and Application

Cheprukov Yu. V.<sup>a</sup>, PhD, Tech., chuv52@mail.ruSocolov M. A.<sup>b</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, guap22@mail.ru<sup>a</sup>Sochi Russian State University of Tourism and Service, 24/a, Kirpichnaia St., 354340, Sochi, Russian Federation<sup>b</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya, 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Purpose:** The implemented survey has shown that today a variety of communication systems mainly applies signals introduced long ago and well studied. In order to enhance efficiency one should use more advanced binary codes and signals based on them. The well-known N-element binary codes which are widely used in systems of communication, radiolocation and control do not allow achieving a low enough level of side peaks of the autocorrelation function in case of N changing in wide limits. The goal of this research is to synthesize binary codes with R level of side peaks of the autocorrelation function. The problem of synthesis has been presented in a form of a system of inequalities; the choice of a solution method has been substantiated. **Results:** There have been demonstrated the results of synthesis of codes with R=2, which are called R2-codes. These codes have proven to be 14/13 times more effective than the best Barker codes according to the relative level of side peaks; they help to get different coefficients of compressibility (22 variants); moreover, there is quite a large amount of such codes (480). The table of R2-codes has been compiled. The assumption that N=28 corresponds to maximum order of R2-codes has been substantiated. There are quite many pairs of the codes where by adding the autocorrelation functions one gets compensation of side peaks. There have been received additional sequences with complete compensation of side peaks, in particular, 8 pairs have been found for N=8. There have given groups different in number and correlation characteristics. **Practical relevance:** Introduction of R2-codes in communication systems provides enhancement of efficiency of these systems. In a radar station equipped with a system of moving targets selection it is possible to enhance efficiency of detecting signals in the background of passive noises using pairs of R2-codes with side peak compensation. R2-codes can also be applied in control systems for creating alphabets for data transmission. For example, they can be used in systems of operating mobile robots in conditions of noises, in control systems supervising expenditure of suspensions of hard materials, liquids, gases or plasma, or technological equipment.

**Keywords** — Phase-Shift Signals, Binary Codes, Autocorrelation function, Side Peak Level, Correlation function, Optimization.

## References

- Varakin L. E. *Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami* [Communication Systems with Noise Signals]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1985. 384 p. (In Russian).
- Michael J. Mossinghoff. Wieferich Pairs and Barker Sequences. *Designs, Codes and Cryptography*, 2009, vol. 53, no. 3, pp. 149–163.
- Ipatov V. P., Orlov V. K., Samojlov I. M., Smirnov V. N. *Sistemy mobil'noi svyazi* [Mobile Communication Systems]. Ed. V. P. Ipatov. Moscow, Goriachaia liniia-Telekom Publ., 2003. 272 p. (In Russian).
- Kartashevskij V. G., Semenov S. N., Firstova T. V. *Seti podvizhnoi svyazi* [Networks of Mobile Communication]. Moscow, EKO-TRENDZ Publ., 2001. 302 p. (In Russian).
- Olifer V. G., Olifer N. A. *Komp'yuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly* [Principles, Technologies, Reports]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2002. 672 p. (In Russian).
- Complementary sequences*. Available at: [http://en.wikipedia.org/wiki/Complementary\\_sequences](http://en.wikipedia.org/wiki/Complementary_sequences) (accessed 23 November 2013).
- Litjuk L.V. *Sintez, analiz i obrabotka sistem radiolokatsionnykh fazomanipulirovannykh signalov s vnutridiskretnoi chastotnoi moduliatsiei s zadannymi svoistvami summarnoi funktsii neopredelennosti*. Dis. dokt. tekhn. nauk [Synthesis, Analysis and Processing of Radiolocational Phase-manipulated Signal Systems with Innerdiscreted Frequency Modulation with Given Characteristics of Summary Indefinite Function. Dr. techn. sci. diss.]. Taganrog, TGRU Publ., 2000. 235 p. (In Russian).
- Speranskij V. S., Frolov A. A. Characteristic Analysis of Multifrequency Super Wide-Band Communication Systems. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii INTERMATIC-2011* [Proc. Int. Conf. INTERMATIC-2011, November 14–17, 2011]. Moscow, 2011, part 3, pp. 64–67 (In Russian).
- Chapurskij V. V. *Izbrannye zadachi teorii sverkhshirokopolosnykh radiolokatsionnykh sistem* [Selected Problems of Theory of Super Wide-Band Radiolocation Systems]. Moscow, MGTU im. E. N. Bauman Publ., 2012. 279 p. (In Russian).
- Cheprukov Ju. V., Sokolov M. A. Synthesis of Phasemanipulated Signals with Required Level of Side Peaks ACF. *Radiotekhnika*, 1991, no. 5, pp. 68–70 (In Russian).
- Bashmakova I. G. *Diofant i diofantovy uravneniia* [Diophant and Diophant Equations]. Moscow, LKI Publ., 2007. 72 p. (In Russian).
- Reshenie uravnenii v tselykh chislakh* [Solution of Equations in Whole Numbers]. Available at: <http://diofant.na.by/reshenie.htm> (accessed 23 November 2013).
- Diofantovy uravneniia* [Diophant Equations]. Available at: <http://bars-minsk.narod.ru/teachers/diofant.html> (accessed 3 May 2013).
- Teoriia chisel. Diofantovy uravneniia* [Theory of Numbers. Diophant Equations]. Available at: <http://www.lomonosovfund.ru/enc/ru/encyclopedia:0156:article> (accessed 3 May 2013).
- Diofantovy priblizheniia* [Diophant Approximations]. Available at: <http://gatchina3000.ru/great-soviet-encyclopedia/bse/028/552.htm> (accessed 3 May 2013).
- Pelehatyj M. I., Golubev E. A. Autocorrelation Characteristics of Some Types of Double Sequences. *Problemy peredachi informatsii*, 1972, vol. VIII, no. 1, pp. 92–99 (In Russian).
- Cheprukov Ju. V., Sokolov M. A. Graphoanalytical Method of Evaluation of Maximum Orders of Barker Codes. *Sbornik referatov deponirovannykh rukopisei*, Moscow, VIMI Publ., 1991, vol. 2 no. 3-8826, pp. 1–18 (In Russian).
- Ipatov V. P. *Spread Spectrum and CDMA. Principles and Applications*. New York, John Wiley and Sons Ltd., 2004. 373 p.
- Karpov V. Je., Platonova M. V. System of Mobile Robot Navigation. *Trudy XVIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Informatsionnye sredstva i tekhnologii"* [Proc. XVIII Int. Conf. "Informational Facilities and Technologies"]. Moscow, Izdatel'skii dom MJEI Publ., 2010, vol. 2, pp. 56–63 (In Russian).
- Melik-Shahnazarov A. M., Markatun M. G. *Tsifrovye izmeritel'nye sistemy korrelyatsionnogo tipa* [Figure Measuring Systems of Correlation Type]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 128 p. (In Russian).
- Cheprukov Ju. V., Sokolov M. A. *Soglasovannyi fil'tr* [Matched Filter]. Patent USSR, no. 1709498, 1992.
- Cheprukov Ju. V., Sokolov M. A. Method of Optimization of Weight Compression Filters of Phasemanipulated Signals. *Izvestiia vuzov. Radioelektronika*, 1991, no. 4, pp. 31–37 (In Russian).