

На правах рукописи

ШУВАЛОВ Андрей Сергеевич

**СИНТЕЗ И АНАЛИЗ МНОГОФАЗНЫХ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ БАРКЕРА**

**Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы
и устройства телевидения**

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2013

Работа выполнена на кафедре информационной безопасности
Поволжского государственного технологического университета

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Леухин Анатолий Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Ипатов Валерий Павлович, профессор
кафедры радиотехнических систем
Санкт-Петербургского государственного
электротехнического университета «ЛЭ-
ТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина)

кандидат технических наук, доцент
Кревецкий Александр Владимирович,
заведующий кафедрой информатики
Поволжского государственного
технологического университета

Ведущее предприятие: ФГБОУ ВПО «Новгородский государст-
венный университет имени Ярослава
Мудрого» (г. Великий Новгород)

Защита состоится «25» декабря 2013 г. в 14-00 часов, ауд. _____
на заседании диссертационного совета Д 212.238.03 при Санкт-
Петербургском государственном электротехническом университете
«ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-
Петербург, ул. Профессора Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-
Петербургского государственного электротехнического университета
«ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина).

Автореферат разослан «___» _____ 2013 г.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций
доктор технических наук, доцент



С.А. Баруздин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена решению актуальной научной задачи, связанной с синтезом многофазных последовательностей с оптимальными по минимаксному критерию корреляционными свойствами импульсной автокорреляционной функции (в том числе коды Баркера).

Актуальность работы. Одной из классических проблем синтеза последовательностей с хорошими корреляционными свойствами, возникшей в начале 1950-х годов и до сих пор считающейся не решенной, является проблема построения последовательностей Баркера с уровнем боковых лепестков ненормируемой импульсной автокорреляционной функции, не превышающим единицу. Такие последовательности являются оптимальными с позиции достижения минимально возможного уровня боковых лепестков импульсной автокорреляционной функции, что делает их потенциально наилучшими при решении ряда важнейших практических задач. Несмотря на острую потребность в последовательностях Баркера и привлечение к решению задачи синтеза многофазных последовательностей Баркера огромного множества специалистов в соответствующих областях знаний, до сих пор не получен ответ на принципиальный вопрос о существовании кодов Баркера для произвольной длины.

Работы в области построения последовательностей Баркера, начавшиеся с 1953 года, не прекращаются по сей день. С позиций помехоустойчивости фазоманипулированные последовательности с наименьшим числом градаций фаз являются предпочтительными. К сожалению, бинарных последовательностей Баркера (с двумя значениями фаз) длин, больших $N=13$, не найдено. Причем в работе Турина в 1963 году аналитически было доказано, что бинарных последовательностей Баркера нечетных длин $N > 13$ не существует.

Следующим шагом в развитии подходов к построению кодов Баркера явилась идея использовать алфавит с большим объемом по сравнению с бинарным. В 1956 году de Long построил трехфазные последовательности Баркера, а затем Carley и Welti в 1960 году – четырехфазные последовательности Баркера. Предложение увеличения объема алфавита для построения последовательностей Баркера представили в 1965 году Golomb и Scholtz. Они ввели понятие обобщенных кодов Баркера, определяемых в виде многофазной последовательности, где значение фазы на каждом кодовом интервале определяется из диапазона $\varphi_n \in [0, 2\pi]$. Расширение объема алфавита позволяет увеличить длину последовательностей Баркера, в частности, для четырехфазных последовательностей Баркера максимальная возможная длина $N = 15$. В 1989

году Golomb и Zhang построили 60-фазные последовательности Баркера до длины $N = 19$. Дальнейшие усилия в поиске последовательностей Баркера привели к следующим результатам:

- в 1994 году список последовательностей Баркера был расширен до длины $N = 31$;
- в 1996 году были найдены многофазные коды Баркера до длины $N = 36$;
- в 1998 году построены многофазные коды Баркера до длины $N = 45$;
- в 2005 году построены многофазные коды Баркера до длины $N = 64$;
- в 2007 году построены многофазные последовательности длины $N = 65$.

Многофазные последовательности Баркера с наибольшими на сегодняшний день длинами получили Nunn и Coxson в 2009 году ($65 \leq N \leq 70$, $N = 72$, $N = 76$, $N = 77$).

Определяющий вклад в развитие теории построения многофазных последовательностей внесли R.H. Barker, R. Turyn, M.J. Mossinghoff, D.F. Jr de Long, S.W. Golomb, R.A. Scholtz, N. Zhang, P. Borwein, R. Ferguson, M. Friese, H. Zottmann, C.J. Nunn, G.E. Coxson, L. Ein-Dor, I. Kanter, W. Kinzel.

Цель и задачи работы. Цель диссертационной работы заключается в разработке аналитических и численных методов построения многофазных последовательностей Баркера, а также в синтезе и анализе последовательностей.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

1. Разрабатываются аналитические методы построения многофазных последовательностей Баркера на основе решения системы тригонометрических и системы алгебраических уравнений.
2. Осуществляется поиск многофазных последовательностей Баркера с равномерной импульсной автокорреляционной функцией с использованием аналитических выражений.
3. Разрабатываются численные градиентные методы построения многофазных последовательностей Баркера на основе решения систем нелинейных уравнений с начальными условиями, определяемыми аналитически.
4. Осуществляется поиск многофазных последовательностей Баркера с использованием разработанных численных методов построения.

5. Проводится анализ устойчивости свойств импульсной автокорреляционной функции синтезированных многофазных последовательностей Баркера к влиянию частоты Доплера и разрядности квантования сигнала.

6. Проводится анализ свойств импульсных взаимнокорреляционных функций синтезированных многофазных последовательностей Баркера и формируются ансамбли импульсных многофазных последовательностей Баркера с фиксированным уровнем максимального взаимно корреляционного пика по ансамблю.

Методы исследований. Для решения поставленных в диссертационной работе задач были использованы методы теории сигналов, численные методы решения нелинейных систем уравнений, алгебраические методы решения нелинейных систем уравнений, методы математического моделирования.

Достоверность результатов исследований. Обоснованность и достоверность положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректным использованием методов решения систем нелинейных уравнений, а также соответствием теоретических результатов результатам математического моделирования.

Научная новизна работы заключается в теоретических положениях, совокупность которых обосновывает предлагаемые в работе методы построения многофазных последовательностей Баркера. В частности, новыми являются следующие теоретические результаты:

1. Получены системы уравнений в тригонометрической и алгебраической формах для решения задачи синтеза многофазных последовательностей Баркера и разработан аналитический метод решения полученной системы уравнений. Показано, что преобразования эквивалентности многофазных последовательностей Баркера, не меняющие свойства импульсной автокорреляционной функции, определяются корнями системы нелинейных уравнений.

2. Для демонстрации развитого аналитического метода решения системы приводится полное решение задачи построения многофазных последовательностей Баркера с равномерной импульсной автокорреляционной функцией в диапазоне длин $N = [2, 10]$.

3. Построены многофазные последовательности Баркера с равномерной импульсной автокорреляционной функцией в диапазоне длин $N = [11, 34]$.

4. Разработан численный метод решения задачи синтеза многофазных последовательностей Баркера в диапазоне длин $N = [30, 52]$. Для задания начальных условий в разработанном методе синтеза использу-

ются аналитические соотношения между значениями фаз кодовых интервалов многофазных последовательностей.

5. Экспериментально доказано, что количество новых построенных неэквивалентных многофазных последовательностей значительно превышает известное число многофазных последовательностей Баркера в диапазоне длин $N = [11, 52]$.

6. Проведён анализ эффективности синтезированных многофазных последовательностей Баркера с позиций устойчивости к влиянию частоты Доплера и разрядности квантования фазы.

Экспериментально показано, что при квантовании фазы многофазных последовательностей с числом уровней $k > 2N$, где N – длина последовательности, значения модулей отсчетов ИАКФ имеют абсолютную величину отклонения $\varepsilon < 0,01$.

Экспериментально показано, что максимальный уровень боковых лепестков ИАКФ синтезированных многофазных последовательностей Баркера во всей плоскости "временная задержка – частота Доплера" не превышает значения $|\chi_{\max}(\tau, \phi)| \leq 2\sqrt{N}$.

7. Синтезированы новые ансамбли на основе многофазных последовательностей Баркера с заданным максимальным уровнем боковых лепестков импульсной взаимно-корреляционной функции (ИВКФ).

Практическая ценность работы. Практическое значение результатов работы определяется тем, что синтезированные многофазные последовательности Баркера обладают минимально возможным уровнем боковых лепестков импульсной автокорреляционной функции. Поэтому такие последовательности имеют принципиальное значение при построении радиолокационных систем с возможностью обнаружения целей с малой эффективной площадью рассеяния (ЭПР) на фоне целей с большой ЭПР. Большое количество найденных последовательностей Баркера на одной длине позволяет использовать в радиолокационных станциях режим излучения нового сигнала в каждом новом периоде, что обеспечивает низкую вероятность распознавания закона модуляций излучаемого сигнала.

Разработанные в рамках диссертационной работы алгоритмы синтеза многофазных последовательностей Баркера приводят к снижению вычислительных затрат и могут быть использованы при создании программно-обеспечения по цифровой обработке и анализу сигналов.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Метод синтеза многофазных последовательностей Баркера с равномерной импульсной автокорреляционной функцией, основанный на

аналитическом решении системы тригонометрических и системы алгебраических уравнений.

2. Синтезированные многофазные последовательности Баркера с равномерной импульсной автокорреляционной функцией.

3. Метод синтеза многофазных последовательностей Баркера, основанный на численном решении систем тригонометрических и алгебраических уравнений с определением начальных условий на основе аналитических зависимостей.

4. Синтезированные многофазные последовательности Баркера с квазиравномерной импульсной автокорреляционной функцией.

5. Результаты исследования эффективности синтезированных многофазных последовательностей Баркера при влиянии частоты Доплера, разрядности квантования фазы и ограничении полосы энергетического спектра.

Личный творческий вклад. Автором получены следующие результаты:

- разработано необходимое программное обеспечение по синтезу и анализу многофазных последовательностей Баркера;

- проведен сравнительный анализ корреляционных свойств синтезированных многофазных последовательностей Баркера к изменению формы последовательностей вследствие влияния частоты Доплера и разрядности квантования фазы;

- синтезированы ансамбли на основе многофазных последовательностей Баркера с уровнем максимального бокового лепестка по всему ансамблю, близким к значению \sqrt{N} .

Внедрение результатов работы. Теоретические и практические результаты диссертационной работы использованы в НИР, выполняемых по следующим грантам и научным федеральным целевым программам (подтверждено актами о внедрении):

1. НИОКР «Аппаратно-программный комплекс генерации и обработки фазокодированных широкополосных сигналов с исключительными свойствами автокорреляционных функций», грант Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе «У.М.Н.И.К.», ГК № 9628р/14235, 2010-2012 (руководитель);

2. Грант РФФИ 09-07-00072-а «Теория синтеза ортогональных и квазиортогональных алфавитов сигналов на базе дискретных фазокодированных последовательностей», 2009-2011 (исполнитель);

3. Государственный контракт № П 783 в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 го-

ды», мероприятие 1.2.1 «Проведение научных исследований под руководством докторов наук» по теме «Разработка и реализация регулярных алгоритмов построения оптимальных по минимаксному критерию импульсных последовательностей», 2010-2012 (исполнитель);

4. Государственный контракт № 8112р/12783 по теме «Разработка и изготовление программного обеспечения и модулей цифрового синтеза и цифровой обработки широкополосных фазокодированных сигналов и ансамблей на их основе для информационно-телекоммуникационных систем», 2010-2012 (исполнитель);

5. Договор № 02.120.11.5418-МД по гранту Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых МД-5418.2010.9, «Аналитическая теория синтеза фазокодированных последовательностей с одноуровневой импульсной автокорреляционной функцией», 2010-2011 (исполнитель);

6. Аналитическая ведомственная целевая программа «Развитие научного потенциала высшей школы», мероприятие 1 «Проведение фундаментальных исследований в рамках тематических планов», по заданию Минобрнауки РФ, тема «Развитие теории построения унимодулярных дельтакоррелированных последовательностей» НИР №1.01.11, 2011 (исполнитель);

7. Аналитическая ведомственная целевая программа «Развитие научного потенциала высшей школы», мероприятие 1 «Проведение фундаментальных исследований в рамках тематических планов» Минобрнауки РФ №1.07.2012 по заданию Минобрнауки РФ, тема «Разработка и реализация метода построения многофазных последовательностей Баркера», 2012-2013 (исполнитель).

Теоретические и практические результаты диссертационной работы реализованы в технических проектах ОКР «Волга МП» и «Самолет-М» и в эскизно-техническом проекте ОКР «ВЗГ Комплекс», разработанных ОАО «РТИ» (подтверждено актом о внедрении), а также внедрены в учебный процесс при изучении дисциплин «Сети и системы передачи информации» (специальность 090303.65 «Информационная безопасность автоматизированных систем»), «Основы радиотехники» (направление 090900.68 «Информационная безопасность» (магистратура)), в курсовое и дипломное проектирование, выполняемое студентами специальности 090303.65 «Информационная безопасность автоматизированных систем».

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на 3-ей Всероссийской научной конференции «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике: Всероссийские ра-

диофизические научные чтения-конференции памяти Н.А. Арманда» (Муром, 2010); на 9-ой международной конференции «Опτικο-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации» (Курск, 2010), на 66-ой Всероссийской конференции с международным участием «Научная сессия, посвященная Дню Радио – RDC-2011» (Москва, 2011); на 68-ой Международной конференции “Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий RES-2013”, серия «Научные конференции, посвященные Дню Радио (Выпуск 68)» (Москва, 2013); на 13-ой и 15-ой Международных конференциях Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2011(Москва, 2011) и DSPA-2013 (Москва, 2013); на 12-ой и 13-ой Всероссийских школах-семинарах «Волновые явления в неоднородных средах» (Москва, 2011, 2013); на Всероссийских научно-практических конференциях «Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе» (Йошкар-Ола, 2010, 2011, 2012); на ежегодных научных конференциях по итогам НИР ПГТУ и научных семинарах кафедры информационной безопасности (2010-2013).

Публикации. Всего по теме диссертации опубликовано 17 работ, из них 3 работы – в рецензируемых научных журналах, рекомендованных перечнем ВАК, 5 работ – в сборниках трудов (DSPA-2011, RDC-2011, DSPA-2013, RES-2013), засчитываемых ВАК, 8 работ – в сборниках материалов научных конференций; получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. При участии автора написаны промежуточные и итоговые отчеты по 6 НИР и 2 НИОКР.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов и приложений, содержит 24 рисунка и 22 таблицы. Список литературы включает 122 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В первой главе диссертации произведен обзор состояния проблемы построения унимодулярных последовательностей с хорошими свойствами ИАКФ. Особое внимание уделено:

- методам построения бинарных последовательностей оптимальных по минимаксному критерию и критерию минимума энергии боковых лепестков, основанных на процедурах глобального и стохастического локального компьютерного поиска:

$$PSL(C) = \max_{1 \leq \tau \leq N-1} |C_\tau|, \quad (1)$$

$$MF(C) = \frac{N^2}{2 \sum_{\tau=1}^{N-1} |C_{\tau}|^2}; \quad (2)$$

- известным численным методам построения многофазных последовательностей Баркера, основанных на оптимизационных стратегиях поиска экстремальных решений;

- численным методам построения унимодулярных последовательностей с хорошими свойствами ИАКФ.

Унимодулярные последовательности образуют классы эквивалентности по импульсным и периодическим свойствам автокорреляционных функций. Класс эквивалентности унимодулярных последовательностей по свойствам ИАКФ образуется с помощью следующих четырех преобразований:

а) поворот всей последовательности на угол $\Delta\varphi$

$$u_n^{(eqv)} = u_n \cdot \exp(i\Delta\varphi), \quad \varphi_n^{eqv} = \varphi_n + \Delta\varphi, \quad n = 0, \dots, N-1; \quad (3)$$

б) сопряжение

$$u_n^{(eqv)} = u_n^* = \frac{1}{u_n}, \quad \varphi_n^{(eqv)} = -\varphi_n, \quad n = 0, \dots, N-1; \quad (4)$$

в) зеркальное отражение

$$u_n^{(eqv)} = u_{N-1-n}, \quad n = 0, \dots, N-1; \quad (5)$$

г) набег фазы на угол $\Delta\varphi$

$$u_n^{(eqv)} = u_n \cdot \exp(i \cdot n \cdot \Delta\varphi), \quad \varphi_n^{eqv} = \varphi_n + n \cdot \Delta\varphi, \quad n = 0, \dots, N-1. \quad (6)$$

С учетом преобразований (3) и (6) импульсную унимодулярную последовательность, формирующую класс эквивалентности, принято искать в нормированном виде

$$\Psi = [\varphi_0 = 0 \ \varphi_1 = 0 \ \varphi_2 \dots \varphi_{N-1}], \quad (7)$$

где значения двух первых фаз принимаются равными нулю $\varphi_0 = \varphi_1 = 0$.

Во второй главе диссертации разработан аналитический метод построения многофазных последовательностей Баркера с равномерной ИАКФ на основе решения системы нелинейных уравнений. Первый метод основан на решении системы тригонометрических уравнений:

$$2 \sum_{k1=0}^{N-2-\tau} \sum_{k2=k1+1}^{N-1-\tau} \cos(\varphi_{\tau+k1} - \varphi_{k1} - \varphi_{\tau+k2} + \varphi_{k2}) = a^2 + \tau - N, \quad (8)$$

где $\tau = 1, \dots, N-2$;

второй метод основан на решении системы алгебраических уравнений:

$$\sum_{k1=0}^{N-2-\tau} \sum_{k2=k1+1}^{N-1-\tau} \frac{u_{n+\tau} u_k}{u_n u_{\tau+k}} = 1 + \tau - N, \quad (9)$$

где $u_n = \exp(i\varphi_n) = \cos(\varphi_n) + i \sin(\varphi_n)$.

В рамках разработанных подходов производится построение всех неэквивалентных многофазных последовательностей Баркера с равномерной ИАКФ в диапазоне «малых» длин ($N \leq 10$).

Показано формирование аналитических зависимостей между кодовыми элементами многофазных последовательностей Баркера:

- на основе системы тригонометрических уравнений:

$$\varphi_{N-2} = \varphi_{N-1} \pm \frac{2\pi}{3}. \quad (10)$$

а) φ_2 – любое, $\varphi_{N-2} = \varphi_{N-1} \pm \frac{2\pi}{3}$, $\varphi_{N-3} = \varphi_{N-2} + \pi = \varphi_{N-1} - \varphi_2 + \pi$;

б) φ_2 – любое, $\varphi_{N-2} = \varphi_{N-1} \pm \frac{2\pi}{3}$, $\varphi_{N-3} = \varphi_{N-1} - \varphi_2 + \pi$; (11)

в) $\varphi_2 = \pm \frac{\pi}{3}$, $\varphi_{N-2} = \varphi_{N-1} \pm \frac{2\pi}{3}$, φ_{N-3} – любое;

- на основе системы алгебраических уравнений:

$$u_{N-2} = u_{N-1} \cdot \exp\left(\pm i \frac{2\pi}{3}\right). \quad (12)$$

а) $u_2 = \exp(i\varphi_2)$, $u_{N-2} = u_{N-1} \cdot \exp\left(\pm i \frac{2\pi}{3}\right)$, $u_{N-3} = u_{N-1} \cdot \exp\left(\mp i \frac{\pi}{3}\right)$;

б) $u_2 = \exp(i\varphi_2)$, $u_{N-2} = u_{N-1} \cdot \exp\left(\pm i \frac{2\pi}{3}\right)$, $u_{N-3} = -\frac{u_{N-1}}{u_2}$; (13)

в) $u_2 = \exp\left(\pm i \frac{\pi}{3}\right)$, $u_{N-2} = u_{N-1} \cdot \exp\left(\pm i \frac{2\pi}{3}\right)$, $u_{N-3} = \exp(i\varphi_{N-3})$.

В качестве примеров приведены аналитические выражения для построения последовательностей с произвольным уровнем бокового лепестка ИАКФ.

В третьей главе диссертации разрабатываются численные методы построения многофазных последовательностей Баркера с равномерной и неравномерной ИАКФ. При этом начальные условия предлагается формировать на основе аналитических зависимостей между элементами

последовательности (10)-(13). Приводятся примеры построения многофазных последовательностей Баркера с использованием разработанных градиентных методов поиска: с равномерной ИАКФ в диапазоне длин [2, 34], с неравномерной ИАКФ в диапазоне длин [30, 52].

Таблица 1. Число нормализованных неэквивалентных равномерных многофазных последовательностей Баркера длин [2, 34]

Длина	Число решений	Длина	Число решений	Длина	Число решений
3	1	14	164	25	404
4	2	15	368	26	64
5	6	16	220	27	64
6	1	17	140	28	50
7	18	18	114	29	78
8	36	19	112	30	98
9	40	20	176	31	76
10	120	21	188	32	8
11	132	22	140	33	4
12	84	23	408	34	8
13	402	24	108		

Таблица 2. Число нормализованных неэквивалентных неравномерных многофазных последовательностей Баркера длин [31, 52]

Длина	Число решений	Длина	Число решений	Длина	Число решений
31	3015	39	1203	47	121
32	2180	40	1087	48	113
33	1337	41	1258	49	102
34	2015	42	994	50	140
35	1356	43	816	51	108
36	1287	44	230	52	111
37	1105	45	241		
38	1749	46	135		

Показано, что количество построенных нормализованных неэквивалентных многофазных последовательностей Баркера во много раз превышает число известных последовательностей в указанном диапазоне длин.

В четвертой главе диссертации проведен анализ эффективности синтезированных многофазных последовательностей Баркера с точки зрения устойчивости максимального уровня корреляции к влиянию час-

тоты Доплера во всей плоскости "временная задержка – частота Доплера":

$$\chi_{\tau, \phi} = \left| \sum_{n=0}^{N-1-\tau} u_{n+\tau} \cdot u_n^* \cdot \exp\left(i \cdot \frac{\pi}{F} \cdot \phi \cdot n\right) \right|, \quad (14)$$

где $\tau = -N+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, N-1$; $\phi = -F, \dots, -1, 0, 1, \dots, F$.

Максимальные значения боковых лепестков функции неопределенности последовательности длины $N=40$ показаны на рисунке 1.

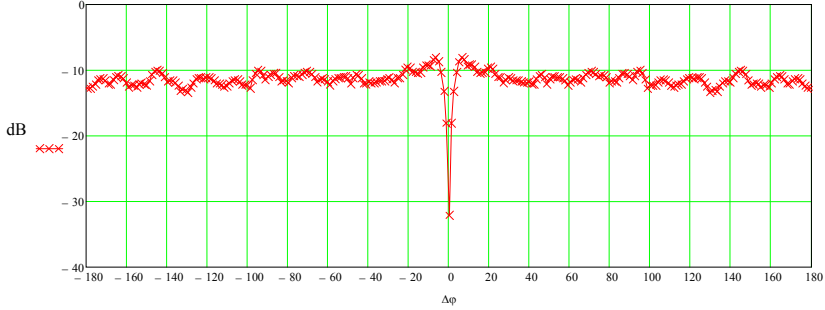


Рисунок 1. Максимальные значения БЛ ФН последовательности длины $N=40$

Также рассматриваются вопросы влияния числа уровней квантования фазы на значение пикового бокового лепестка ИАКФ:

$$\Phi(\Psi, k) = \frac{2\pi}{k} \cdot \text{round}\left(\frac{\Psi \cdot k}{2\pi}\right), \quad (15)$$

Показано, что при объеме квантованного равномерного фазового алфавита, превышающего удвоенную длину, квантование приводит к незначительному росту максимального бокового лепестка.

Исследуются взаимно-корреляционные свойства по всему множеству построенных многофазных последовательностей Баркера заданной длины:

$$C_{\tau}^{\mathbf{U}, \mathbf{S}} = \begin{cases} \sum_{n=0}^{N-1-\tau} u_{n+\tau} \cdot s_n^*, & \tau = 0, 1, \dots, N-1; \\ \sum_{n=-\tau}^{N-1} u_{n+\tau} \cdot s_n^*, & \tau = -N+1, -N+2, \dots, -1; \\ 0, & |\tau| \geq N. \end{cases} \quad (16)$$

Для каждой длины формируются ансамбли из четырех последовательностей с минимальной ИВКФ. Показано применение ансамблей

многофазных последовательностей Баркера в ММО радарх для решения задач обнаружения неподвижных объектов.

Таблица 3. Максимальный уровень БЛ ИВКФ

N	$c_{\max}^{U,S}$	N	$c_{\max}^{U,S}$	N	$c_{\max}^{U,S}$
31	-11.91db	37	-12.48db	43	-12.73db
32	-11.85db	38	-11.85db	44	-12.73db
33	-11.98db	39	-12.71db	45	-13.42db
34	-12.31db	40	-12.82db	46	-12.72db
35	-12.24db	41	-13.12db	47	-12.62db
36	-12.36db	42	-12.83db	48	-12.81db

ВЫВОДЫ

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Получены две системы нелинейных уравнений в тригонометрической и алгебраической формах, решения которых образуют многофазные последовательности с заданными свойствами импульсной автокорреляционной функции. Полученные системы могут быть использованы для построения многофазных последовательностей Баркера.

2. Разработаны аналитические методы решения синтезированной системы тригонометрических уравнений и системы алгебраических уравнений.

3. Разработанные методы применены для построения всех многофазных последовательностей Баркера с равномерной импульсной автокорреляционной функцией в диапазоне длин $N = [2, 10]$.

4. Разработаны численные методы решения синтезированной системы тригонометрических уравнений и системы алгебраических уравнений на основе модификации градиентных методов с заданием специальных начальных условий. Для формирования вектора начальных условий используются аналитические зависимости между элементами задаваемого вектора.

5. Разработанные методы применены для построения многофазных последовательностей Баркера с равномерной импульсной автокорреляционной функцией в диапазоне длин $N = [11, 34]$ и многофазных последовательностей Баркера с неравномерной импульсной автокорреляционной функцией в диапазоне длин $N = [31, 52]$. Количество синтезированных многофазных последовательностей Баркера во много раз превышает количество известных.

6. Проведен сравнительный анализ устойчивости пикового значения бокового лепестка функций неопределённости к влиянию частоты

Доплера во всей плоскости «временная задержка – частота Доплера». Экспериментально показано, что максимальный уровень боковых лепестков ИАКФ синтезированных многофазных последовательностей Баркера во всей плоскости «временная задержка – частота Доплера» не превышает значения $|\chi_{\max}(\tau, \varphi)| \leq 2\sqrt{N}$.

7. Проведен анализ устойчивости пикового значения бокового лепестка импульсной автокорреляционной функции к квантованию фазы синтезированных многофазных последовательностей Баркера. Показано, что при квантовании фазы многофазных последовательностей с числом уровней $k > 2N$, где N – длина последовательности значения модулей отсчетов ИАКФ, имеют абсолютную величину отклонения $\varepsilon < 0,01$.

8. Синтезированы ансамбли на основе многофазных последовательностей Баркера с заданным уровнем пикового отсчета бокового лепестка взаимно-корреляционных функций по всему объему синтезированных последовательностей.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

в научных журналах, входящих в перечень ВАК:

1. Леухин, А.Н. Многофазные импульсные последовательности с одноуровневой автокорреляцией / А.Н. Леухин, А.С. Шувалов, А.С. Петухов // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия «Радиотехнические и инфокоммуникационные системы». – 2010. – № 2. – С. 77-90.

2. Оптимальные импульсные последовательности / А.Н. Леухин, А.С. Шувалов, Е.Н. Потехин, А.В. Харитонов // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия «Радиотехнические и инфокоммуникационные системы». – 2012. – № 1. – С. 37-46.

3. Шувалов, А.С. Новый алгоритм поиска многофазных последовательностей Баркера / А.С. Шувалов, А.Н. Леухин, Д.В. Гайворонский // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия «Радиотехнические и инфокоммуникационные системы». – 2012. – № 2 (16). – С. 19-23.

в научных сборниках трудов, входящих в перечень ВАК:

4. Леухин, А.Н. Многофазные последовательности Баркера / А.Н. Леухин, А.С. Шувалов, В.О. Виноградов // Ученые записки физического факультета МГУ: труды 13-й Всероссийской школы-семинара

«Волновые явления в неоднородных средах». Секция 10: Нелинейная динамика. – 2013. – № 1. – С. 24-25.

5. Леухин, А.Н. Новые фазокодированные импульсные и периодические последовательности с равномерными боковыми лепестками автокорреляционной функции / А.Н. Леухин, Н.В. Парсаев, А.С. Шувалов // Доклады 66-й Всероссийской конференции с международным участием «Научная сессия, посвященная Дню Радио – RDC-2011». – М.: РНТОРЭС им. А.С. Попова, 2011. – С. 168-171.

6. Аналитическая теория построения периодических импульсных унимодулярных последовательностей с одноуровневой автокорреляцией / А.Н. Леухин, Н.В. Парсаев, А.С. Шувалов, А.С. Петухов // Доклады 13-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2011». – М., 2011. – Т. 1. – С. 42-45.

7. Шувалов, А.С. Многофазные последовательности Баркера длин [3,52] / А.С. Шувалов, А.Н. Леухин, В.О. Виноградов // Доклады 15-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2013». – М., 2013. – С. 33-37.

8. Синтез фазоманипулированных последовательностей с идеальной периодической автокорреляционной функцией и малым числом фаз / А.Н. Леухин, Н.В. Парсаев, Е.Н. Потехин, А.С. Шувалов // Доклады Международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий RES-2013». Серия «Научные конференции, посвященные Дню Радио (Выпуск 68)». – М.: РНТОРЭС им. А.С. Попова, 2013. – С. 370-374.

в других рецензируемых изданиях:

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011610941 «Like-noise signals» / А.Н. Леухин, А.С. Шувалов, А.С. Петухов, Е.Н. Потехин, А.В. Харитонов.

10. Леухин, А.Н. Ансамбли симплексных последовательностей больших периодов / А.Н. Леухин, Н.В. Парсаев, А.С. Шувалов // Труды 12-й школы-семинара "Волны-2010". Секция 10: Дальнее распространение волн, передача информации [Электронный ресурс]. – М.: МГУ, 2010. – С. 8-11.

11. Леухин, А.Н. Аналитический подход к решению задачи синтеза импульсных последовательностей / А.Н. Леухин, А.С. Шувалов // Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике [Электронный ресурс]: Всероссийские радиофизические научные чтения-конференции памяти Н.А. Арманда: сб. докладов III Всероссийской научной конференции (Муром, 28 июня – 1 июля 2010 г.). – Муром: Изд.-полиграф. центр МИ ВлГУ, 2010. – С. 30-35.

12. Леухин, А.Н. Синтез циклических симплексных последовательностей / А.Н. Леухин, А.С. Шувалов // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации: сб. материалов IX междунар. науч. конф. – Курск: Курск. гос. техн. ун-т, 2010. – С. 17-19.

13. Леухин, А.Н. Периодические, импульсные последовательности и ансамбли широкополосных сигнатур / А.Н. Леухин, А.С. Шувалов, А.В. Харитонов // Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе: сб. материалов всерос. науч. конф. с междунар. участием: в 2 ч. Ч.2. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2010. – С. 76-80.

14. Шувалов, А.С. Разработка тематического сайта по фазокодированным последовательностям и их применению / А.С. Шувалов, А.Н. Леухин // Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе: сб. материалов всерос. науч. конф. с междунар. участием: в 2 ч. Ч.2. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2010. – С. 199-201.

15. Леухин, А.Н. Многофазные последовательности Баркера / А.Н. Леухин, А.С. Шувалов, В.О. Виноградов // Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе: сб. материалов всерос. науч. конф. с междунар. участием: в 2 ч. Ч.2. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2012. – С. 155-158.

16. Решение систем нелинейных уравнений с использованием графических процессоров NVIDIA с поддержкой CUDA / А.С. Шувалов, В.М. Суетина, А.С. Петухов, М.А. Шабалина // Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе: сб. материалов всерос. науч. конф. с междунар. участием: в 2 ч. Ч.1. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2012. – С. 141-143.

17. Шувалов, А.С. Проектирование высокопроизводительной grid сети на базе МарГТУ / А.С. Шувалов, В.М. Суетина, М.А. Шабалина // Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе: сб. материалов всерос. науч. конф. с междунар. участием: в 2 ч. Ч.1. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2012. – С. 196-198.