

*На правах рукописи*



**Корниенко Алексей Викторович**

**АЛГОРИТМЫ СИНТЕЗА И ОБРАБОТКИ КОРОТКОИМПУЛЬСНЫХ  
СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ В РАДИОСИСТЕМАХ  
ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ С УЧЕТОМ МЕШАЮЩИХ ФАКТОРОВ**

Специальность: 05.12.04 -  
«Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Рязань, 2008

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

- Научный руководитель - заслуженный работник ВШ РФ,  
доктор технических наук, профессор  
Кириллов Сергей Николаевич
- Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор  
Лутин Эмиль Аркадьевич  
- кандидат технических наук, доцент  
Бурнашев Рустам Умидович
- Ведущая организация - ФГУП ОКБ "Спектр", г. Рязань.

Защита состоится « 26 » июня 2008 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.04 в ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Автореферат разослан « 20 » мая 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук



А.Г. Борисов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Использование сверхширокополосных (СШП) сигналов в радиосистемах передачи информации (РСПИ) вызывает активный интерес в последние десятилетия. Под СШП сигналами понимаются сигналы с шириной спектра  $\Delta f = f_g - f_n$ , определяемой как разность верхней  $f_g$  и нижней  $f_n$  частот спектра, сопоставимой с его средней частотой  $f_0 = (f_g + f_n)/2$  так, что показатель широкополосности  $\mu_0 = \Delta f / f_0 \geq 0,25$ . Одной из разновидностей СШП сигналов являются короткоимпульсные сигналы, отличающиеся короткой во времени формой без явного заполнения синусоидальным колебанием. Использование короткоимпульсных СШП (КСШП) сигналов с длительностью порядка 0,1...10 нс., обладающих широкой полосой спектра, значительной проникающей способностью и скрытностью, позволяет получить высокие значения показателей качества РСПИ. Весомый вклад в этой области внесли как российские ученые – Ширман Я.Д., Астанин Л.Ю., Бахрах Л.Д., Урядников Ю.Ф., Иммореев И.Я., Осипов М.Л. и др., так и зарубежные – Тейлор Дж. Д., Хармут Х.Ф., Вон Намгуг и др. Использование КСШП сигналов позволяет повысить один из основных показателей качества РСПИ – скорость передачи информации за счет большой ширины спектра. Кроме того, применение КСШП сигналов обеспечивает высокую скрытность из-за малого значения удельной спектральной плотности мощности (СПМ), что затрудняет обнаружение таких сигналов. С другой стороны, по сравнению с узкополосными сигналами влияние естественных или искусственно созданных помех приводит к меньшим потерям при обработке, т.к. в этом случае часть спектра КСШП сигнала, пораженная помехой, имеет меньшее относительное значение.

Однако КСШП сигналы обладают существенным недостатком – поскольку ширина полосы частот такого сигнала большая, очень трудно подобрать подходящую по характеристикам антенну и рассчитать искажения, возникающие при передаче. Кроме того, на КСШП сигнал сильно воздействуют искажения при распространении в пространстве из-за неравномерного затухания по частоте.

Важной характеристикой КСШП сигнала, влияющей на многие показатели качества РСПИ, является его форма, поэтому синтез оптимальной по тому или иному критерию формы КСШП сигнала становится приоритетной задачей в данном направлении. Однако формирование требуемого КСШП сигнала затруднено его практической реализуемостью. Современные формирователи позволяют генерировать ограниченный набор форм КСШП сигналов, поэтому при синтезе необходимо учитывать практическую реализуемость полученного сигнала.

Обработку КСШП сигнала на приемной стороне необходимо проводить оптимальным образом, для чего требуется проанализировать известные алгоритмы обработки с целью определения их характеристик при наличии различных искажений сигнала при формировании и распространении в среде. В устройстве обработки также возникают трудности с генерацией эталонной формы КСШП сигнала на входе системы для обеспечения согласованной фильтрации.

Для увеличения энергетической эффективности обработки КСШП сигналов в РСПИ часто используют накопление пачки импульсов. Важными характеристиками пачки КСШП сигналов являются тип модуляции и конфигурация используемой кодовой последовательности. Поэтому актуальной задачей является выбор и обоснование типа модуляции, её параметров, а также кодовой последовательности.

Кроме того, все перечисленные аспекты построения КСШП РСПИ требуют экспериментальной проверки в практической реализации. Это затрагивает решение сопутствующих вопросов обеспечения синхронизации приемника и передатчика, а также реализации формировавателя КСШП сигналов на современной элементной базе.

Таким образом, актуальными являются задачи синтеза кодовой последовательности и формы КСШП сигналов с учетом влияния искажений при формировании, излучении и распространении в пространстве, а также разработки алгоритмов обработки КСШП сигналов.

**Цель работы.** Целью данной работы является синтез форм и кодовой последовательности, а также разработка алгоритмов обработки КСШП сигналов в интересах повышения показателей качества РСПИ.

Поставленная в работе цель достигается решением следующих задач:

1. Обоснование показателей качества и синтез формы КСШП сигнала с учетом практической реализуемости.
2. Определение формы КСШП сигнала возбуждения антенны с учетом искажений для получения требуемой формы сигнала в дальней зоне.
3. Анализ видов модуляции последовательности КСШП сигналов и синтез кодовой последовательности для формирования сложного КСШП сигнала, обеспечивающей высокую помехоустойчивость передачи.
4. Анализ искажений, вносимых в КСШП сигнал при распространении в пространстве, и разработка алгоритма обработки искаженного сигнала.
5. Анализ потерь в отношении сигнал-шум (ОСШ) в различных алгоритмах обработки КСШП сигналов.
6. Определение устойчивости КСШП сигналов в РСПИ, использующих различные алгоритмы обработки к узкополосным и импульсным помехам.
7. Анализ практической реализации РСПИ с КСШП сигналами при учете синхронизации передающей и приемной частей.

**Методы исследования.** В работе использовались методы статистической радиотехники и математической статистики; регуляризации решений; вариационного, матричного исчисления и вычислительной математики. Данные теоретические методы сочетались с экспериментальными исследованиями на основе имитационного моделирования и проведения практических экспериментов.

**Научная новизна.** В рамках данной диссертационной работы получены следующие новые научные результаты:

1. Синтезирован КСШП сигнал симметричной формы по критерию качества, обеспечивающего минимум ширины энергетической диаграммы направленности антенны. Проведено сравнение синтезированного КСШП сигнала с общеизвестными и показано его преимущество по заданному критерию качества и по энтропийному критерию скрытности.
2. Определена форма сигнала возбуждения антенны с искажениями для получения требуемой формы КСШП сигнала в дальней зоне, а также проведена регуляризация полученного решения для уменьшения влияния искажений КСШП сигнала в антенне.
3. Разработана модификация алгоритма покоординатного спуска (ПС) для синтеза дискретных кодовых последовательностей КСШП сигналов, обеспечивающего более низкий уровень боковых лепестков (УБЛ) автокорреляционной функции (АКФ) по сравнению с известным методом ПС.

4. Показаны преимущества одновременной модуляции полярности и позиции для предложенного КСШП сигнала и синтезирована дискретная кодовая последовательность (ДКП), дающая выигрыш по энтропийному критерию скрытности по сравнению с кодами Хаффмана.

5. Обоснованы алгоритмы обработки КСШП сигнала, обеспечивающие минимальные потери при обработке в ОСШ по сравнению с общеизвестными в случае искажений сигнала в среде распространения, а также действия узкополосной и импульсной помех.

6. Исследована помехоустойчивость предложенного алгоритма по сравнению с общеизвестными и показан выигрыш на 2...11 дБ в требуемом ОСШ при одинаковой вероятности правильного обнаружения при воздействии узкополосной помехи и белого шума. При воздействии импульсной помехи наилучшим является алгоритм на основе вейвлет-анализа.

**Достоверность.** Достоверность результатов и выводов, полученных в диссертационной работе, обеспечивается качественным и количественным сопоставлением результатов имитационного моделирования с известными положениями теории обработки сигналов.

**Практическая ценность работы.** Полученные в работе формы КСШП сигналов и алгоритмы их обработки могут успешно применяться в РСПИ различного назначения. Разработанная в работе КСШП РСПИ показывает возможность практической реализации канала передачи данных в сложных условиях распространения. Результаты работы внедрены в разрабатываемые радиолинии управления и телеметрии космических аппаратов в ФГУП «Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения», в устройствах тече-трассопоиска ООО «Техно-АС», а также используются в системах беспроводного управления сложными механизированными системами в ООО «АВБ Лабс», что подтверждено соответствующими актами о внедрении.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Синтезированный КСШП сигнал симметричной формы, обеспечивающий на 7...10 % более высокие характеристики по критерию минимума ширины энергетической диаграммы направленности по сравнению с ранее известными.

2. Высокоэффективная модификация алгоритма ПС, позволяющая получить выигрыш в уменьшении УБЛ АКФ ДКП от 1,5 до 2,8 дБ при длине последовательности до 500 символов.

3. Алгоритм обработки КСШП сигналов в случае искажений при распространении в пространстве на основе метода регуляризации, позволяющий на 4...7 дБ снизить потери в ОСШ при обработке и на 3...8 дБ получить выигрыш в ОСШ в характеристиках обнаружения при воздействии белого гауссовского шума и узкополосных помех по сравнению с алгоритмами череспериодной корреляционной обработки (ЧПКО), энергетического обнаружителя и алгоритмом на основе вейвлет-анализа.

**Апробация работы.** Результаты работы были представлены на следующих конференциях:

1. ПХ - XI ВНТК студентов молодых ученых и специалистов "Новые информационные технологии". г. Рязань, 2003 - 2006.

2. 12-15 МНТК "Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникации". г. Рязань, 2003 - 2008.

3. 6-я МНТК "Цифровая обработка сигналов и ее применение". г. Москва, 2004.

4. 10-я МНТК студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика". г. Москва, 2004.

5. 30-я, 31-я ВНИК "Сети и системы связи". г. Рязань, 2006 - 2007.

6. V МНТК "Идентификация систем и задачи управления" SICPRO '06. г. Москва, 2006.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 24 работы, из них 8 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ для кандидатских диссертаций, 3 статьи в межвузовских сборниках трудов, 13 тезисов докладов.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 201 наименований и 3 приложений. Диссертация содержит 146 с., в том числе 121 с. основного текста, 1 таблицу и 56 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы; определены цели и задачи, рассматриваемые в диссертации. Перечислены новые научные результаты, полученные в данной работе; показаны её практическая ценность и апробация; сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены вопросы синтеза формы КСШП сигнала по критерию, минимизирующему ширину диаграммы направленности (ДН) антенной решетки:

$$\varphi_n = \frac{1}{D(0)} \int_{-\pi}^{\pi} D(\varphi) d\varphi, \quad (1)$$

где  $D(\varphi)$  – энергетическая ДН антенной решетки при прохождении КСШП сигналов, определяемая выражением

$$D(\varphi) = \frac{1}{NE} D_{изз}(\varphi) \int_{T_0}^{T_0+T} \left[ \sum_{k=0}^{N-1} s\left(t - k \frac{d}{c} \sin(\varphi)\right) \right]^2 dt, \quad (2)$$

где  $N$  – количество излучателей,  $E$  – энергия сигнала,  $d$  – расстояние между излучателями,  $c$  – скорость света,  $\varphi$  – полярный угол между нормалью решетки и направлением в точку наблюдения,  $D_{изз}(\varphi)$  – ДН одного излучателя,  $T_0$  – область существования сигнала,  $s(t)$  – финитный во времени  $t$  сигнал.

Анализ выражений (1) и (2) показывает, что на ширину ДН существенное влияние оказывает функционал

$$T = \int_{-1}^1 s^2(x) dx, \quad (3)$$

где  $x=2t/T_0$ ,  $T_0$  – область существования сигнала.

При определении формы КСШП сигнала, обеспечивающего минимизацию функционала (3), дополнительно использованы следующие параметры, которые также влияют на форму сигнала:

$$\alpha_n = \int_{-1}^1 x^{2n-1} s(x) dx, \quad (4)$$

где  $n=1,2,3,4$ .

Решена изопериметрическая задача вариационного исчисления минимизации функционала (3) при дополнительных условиях (4). Получено решение уравнения Эйлера-Лагранжа при введенных ранее ограничениях:

$$s(x) = Ax + Bx^3 + Cx^5 + Dx^7, \quad (5)$$

где  $A, B, C, D$  – постоянные коэффициенты. Для определения значений этих коэффициентов используются условия нулевой постоянной составляющей радиосигнала  $\int_{-\infty}^{+\infty} s(t)dt = 0$ , требования физической реализуемости на границах

области существования:  $s(\pm 1) = 0$ ;  $\left. \frac{\partial}{\partial x} s(x) \right|_{x=\pm 1} = 0$ , и дополнительные условия

$s(\pm x_0) = 0$  в пределах  $x_0 \in (0,1)$ . Энергия синтезируемого сигнала была нормирована следующим образом:  $\int s^2(x)dx = 1$ .

Получены оптимальные значения коэффициентов, определяющих форму КСШП сигнала,  $A=4,8622$ ,  $B=-18,8485$ ,  $C=23,1103$ ,  $D=-9,124$ , обеспечивающие минимальную ширину энергетической ДН (1).

Форма и спектр синтезированного КСШП сигнала представлены на рисунке 1.

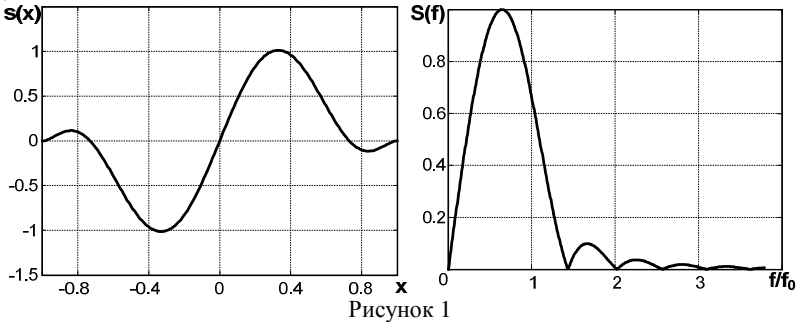


Рисунок 1

Проведено сравнение синтезированного сигнала (5) с такими известными сигналами, как моноцикл Гаусса:

$$s(x) = x \exp(-x^2), \quad (6)$$

и импульс с гармоническим заполнением, имеющим огибающую гауссовской формы:

$$s(x) = A_0 \sin(2\pi f_0 x) \exp(-x^2/2), \quad (7)$$

где  $f_0$  – частота заполнения радиоимпульса,  $A_0$  – амплитуда импульса.

Формы моноцикла Гаусса и сигнала с гармоническим заполнением представлены на рисунке 2.

В качестве сравнения выбраны критерии ширины энергетической диаграммы направленности (1), эффективного использования частотного диапазона:

$$k_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} f^2 |S(f)|^2 df, \quad (8)$$

где  $S(f)$  – амплитудный спектр сигнала; критерий локализации во временной области:

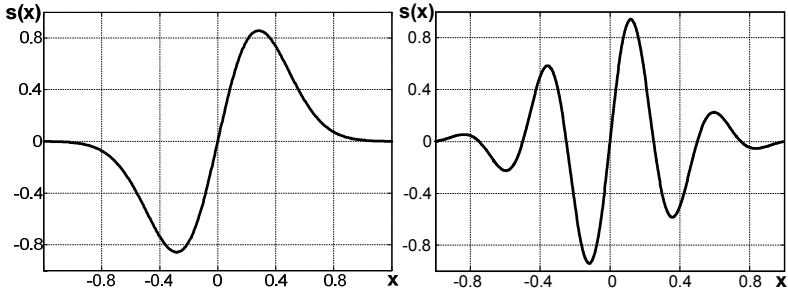


Рисунок 2

$$k_2 = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 s^2(x) dx, \quad (9)$$

и энтропийный критерий скрытности:

$$k_3 = \int_{-\infty}^{+\infty} \ln \left( |S(f)|^2 \right) df. \quad (10)$$

В работе показано превосходство синтезированного сигнала (5) по сравнению с моноциклом гаусса (6) по критериям (1) и (10) соответственно на 7,5 % и 10,7 % при незначительном проигрыше по критериям (8) и (9) соответственно на 1,8 % и 2,6 %. Сигнал (7) проигрывает по всем критериям больше чем на 15 %, что показывает нецелесообразность использования КСШП сигналов с гармоническим заполнением в РСПИ. Преимуществом сигнала (7) является простота формирования, что делает его использование приемлемым в решениях с низкой стоимостью оборудования.

Рассмотрена задача коррекции сигнала возбуждения антенны, в которой возникают искажения формы КСШП сигнала. Для получения требуемой формы КСШП сигнала в дальней зоне антенны методом регуляризации А.Н. Тихонова определена форма импульса возбуждения антенны с искажениями  $x(t)$  в следующем виде:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(j\omega) \frac{H^*(j\omega)}{H^2(j\omega) + \alpha Q(\omega)} \exp(j\omega t) d\omega, \quad (11)$$

где  $Q(\omega)$  – неотрицательный четный стабилизатор решения,  $H(j\omega)$  – частотная характеристика антенны,  $\alpha$  – коэффициент.

В качестве стабилизатора решения в формуле (11) использовано выражение:

$$Q(\omega) = \omega^2 \exp(-\beta \omega^2), \quad (12)$$

где  $\beta$  – постоянный коэффициент.

Проведена оптимизация выражения (11) по критерию среднеквадратической ошибки:

$$\varepsilon = \int_{-1}^1 (s(t) - s^*(t))^2 dt \bigg/ \int_{-1}^1 s^2(t) dt, \quad (13)$$

где  $s^*(t)$  – сигнал в дальней зоне антенны при сигнале возбуждения  $x(t)$ .

Полученная с помощью регуляризации форма КСШП сигнала возбуждения при оптимально подобранном  $\alpha$  имеет в 1,74 раза меньшую среднюю среднеквадратическую погрешность формирования сигнала в дальней зоне



антенны при наличии искажений по сравнению с решением без учета искажений.

Таким образом, получены робастные к рассогласованию формы КСШП сигналов возбуждения АС, обеспечивающие уменьшение искажения в дальней зоне антенны.

Проанализированы способы модуляции последовательности КСШП сигналов в виде: кодово-импульсной модуляции – амплитудной манипуляции (КИМ-АМн), модуляции полярности одиночного импульса (МПИ), модуляции позиции импульса (МПИ) и совместной модуляции полярности и позиции импульса (КИМ-МПИ) и показано преимущество использования сигналов с КИМ-МПИ по комбинированному критерию, включающему в себя уровень боковых лепестков корреляционной функции и скрытности.

$$k_p = \alpha_0 / \gamma + (1 - \alpha_0) \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \ln \left( |S(f)|^2 \right) df, \quad (14)$$

где  $\alpha_0$  – коэффициент, характеризующий влияние того или иного критерия.

Выражение, описывающее модуляцию последовательности импульсов, следующее:

$$s_p(x) = \sum_{i=0}^{N-1} a(i)s(x - iT - d(i)\Delta), \quad (15)$$

где  $a(i)$  – кодовая последовательность, модулирующая полярность каждого импульса,  $T$  – базовый период повторения импульсов,  $d(i)$  – кодовая последовательность, модулирующая относительное местоположение импульса.

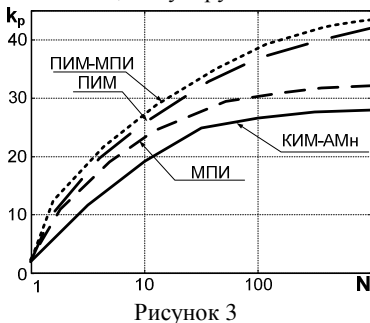


Рисунок 3

Результаты сравнения указанных видов модуляции последовательности КСШП сигналов приведены на рисунке 3.

Как следует из анализа рисунка 3, модуляция КИМ-МПИ дает выигрыш на 10...20 % в комбинированном критерии по сравнению с другими видами модуляции.

Для синтеза дискретной кодовой последовательности предложена моди-

фикация алгоритма покоординатного спуска, использующая одновременное изменение нескольких символов.

Модификация алгоритма для изменения двух знаков кодовой последовательности представлена следующей процедурой:

- 1) генерируется случайная начальная кодовая последовательность  $A_0$ ;
- 2) определяется значение функционала для полученной последовательности  $P_0 = F(A_0)$ ;
- 3) меняется поочередно знак каждого символа  $a_i$  и вычисляются  $P_j = F(A_{i,j})$ , где  $j = (i+1) \dots N$ ,  $A_{i,j}$  – последовательность с измененными  $a_i$  и  $a_j$ ;
- 4) определяется  $P_{\min} = \min \{ P_j \}$ ;
- 5) если  $P_{\min} < P_0$ , то  $P_0 = P_{\min}$ ,  $a_i = -a_i$ ,  $a_j = -a_j$ .

Предложенная модификация сравнивалась с алгоритмом ПС по критерию минимума уровня боковых лепестков автокорреляционной функции. Результаты сравнения представлены на рисунке 4.

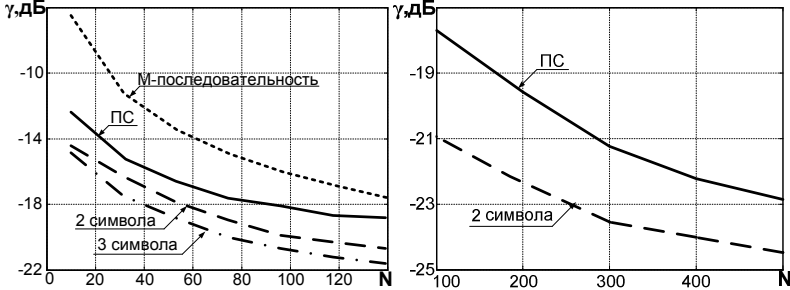


Рисунок 4

Как следует из анализа рисунка 4, использование предложенной модификации позволяет снизить уровень боковых лепестков при синтезе кодовых последовательностей от 1,5 до 2,8 дБ по сравнению с алгоритмом ПС.

С помощью указанной ранее модификации алгоритма ПС синтезированы кодовые последовательности КСПШ сигналов по критерию максимума скрытности спектра, которые выигрывают на 13 % по данному критерию по сравнению с сигналами, использующими последовательности Хаффмана, также обладающими высокой скрытностью.

Таким образом, показана целесообразность использования последовательностей, модулированных как по полярности импульса, так и по положению импульса относительно среднего периода повторения в интересах увеличения энергетической эффективности приема при высоких скрытностных и корреляционных показателях качества.

**Во второй главе** рассмотрены вопросы влияния среды распространения на форму КСШП сигнала, зависящие от основных изотопов среды.

На основе выражений, описывающих комплексный коэффициент передачи среды при усредненных параметрах изотопов, рассчитана искаженная форма КСШП сигнала (5) (см. рисунок 5) при прохождении в атмосфере Земли в зависимости от различных расстояний.

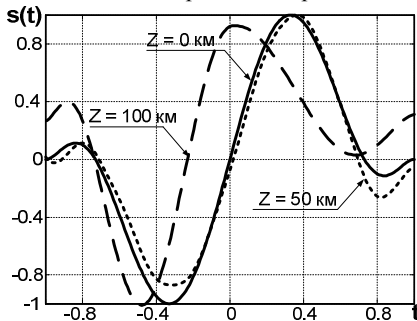


Рисунок 5

Анализ рисунка 5 показывает достаточно сильное искажение формы сигнала при прохождении среды распространения, что неизбежно приведет к потерям в ОСШ при обработке.

По результатам работы предложено в устройстве обработки искаженных КСШП сигналов использовать опорный сигнал в виде суммы исходного сигнала и его производной с весовым коэффициентом  $\mu$ , имеющий следующую характеристику:

$$SF(\omega) = [S_1(\omega) \cdot (1 + \mu \cdot j\omega) \cdot \exp(k_2(\omega) + jk_1(\omega))]^* \quad (16)$$

где знак  $[\bullet]^*$  означает комплексное сопряжение.

Показано, что рассматриваемая задача является некорректно поставленной, так как интеграл свертки, реализуемый в согласованном фильтре, относится к интегралам Фредгольма I-го рода. Предложено для уменьшения значительного разброса решения при незначительном изменении начальных данных использовать метод регуляризации А.Н. Тихонова. Использование этого метода позволяет получить решения, устойчивые к неточному заданию исходных данных. Поэтому предлагается фильтр, полученный методом регуляризации А.Н. Тихонова, характеристика которого имеет следующий вид:

$$SF(\omega) = \frac{K_{cp}^2(\omega) \cdot S_1^*(\omega)}{K_{cp}(\omega) + \alpha_2 Q(\omega)}, \quad (17)$$

где  $Q(\omega)$  – стабилизатор решения,  $\alpha_2$  – коэффициент стабилизации,  $K_{cp}(\omega)$  – усредненный по расстоянию коэффициент передачи атмосферы.

В качестве стабилизатора решения использовалось рекомендованное в работах А.Н. Тихонова выражение:

$$Q(\omega) = \sum_{n=0}^p q_n \omega^{2n}, \quad (18)$$

где  $q_n$  – заданные неотрицательные константы,  $p$  – порядок стабилизатора.

Проведено сравнение предложенного алгоритма с такими известными алгоритмами обработки сигналов, как алгоритм череспериодной корреляционной обработки (ЧПКО), в котором в качестве опорного используется задержанный на величину периода сигнал, при этом выходная характеристика алгоритма определяется следующим выражением:

$$\begin{aligned} U(t) &= \int_0^{\tau} (s(t) + n_1(t))(s(t) + n_2(t)) dt = \\ &= \int_0^{\tau} (s^2(t) + s(t) \cdot (n_1(t) + n_2(t)) + n_1(t) \cdot n_2(t)) dt \end{aligned}, \quad (19)$$

где  $s(t)$  – полезный сигнал,  $n(t)$  – белый гауссовский шум,  $\tau$  – длительность сигнала  $s(t)$ .

Рассмотрен алгоритм энергетического накопления, сигнал на выходе которого описывается следующим выражением:

$$\begin{aligned} U(t) &= \int_0^{\tau} (s(t) + n(t))^2 dt = \int_0^{\tau} (s^2(t) + 2 \cdot s(t) \cdot n(t) + n^2(t)) dt = \\ &= \int_0^{\tau} \left( \sum_n s_0^2(t - nT) + 2 \cdot \sum_n s_0(t - nT) \cdot n(t) + n^2(t) \right) dt \end{aligned}. \quad (20)$$

И алгоритм обработки в базе вейвлет-функций, описывающийся выражением:

$$y_i = \sum_{k=1}^N S'_w(k) \cdot S_w^i(k), \quad (21)$$

где  $S'_w(k)$  – спектр в вейвлет-базисе принятого сигнала;  $S_w^i(k)$  – дискретный спектр в вейвлет-базисе сигнала  $s(k-i)$ , имеющего задержку  $i$ ;  $y_i$  – выходные значения дискретной корреляционной функции.

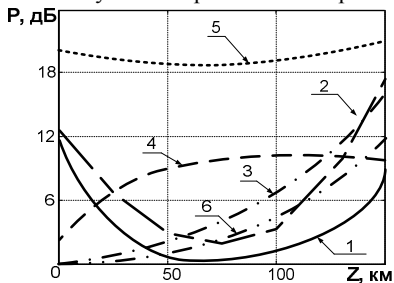
Использование вейвлет-анализа при обработке КСШП сигналов позволяет адаптивно подстраиваться к текущей помеховой обстановке в процессе работы, меняя кодовую последовательность или вейвлет-базис, что обеспечивает более высокие показатели качества РСПИ. Если в процессе исследования помеховой обстановки обнаруживается, что помеха локализована преимущественно в некоторых ветвях разложения, то возможен синтез сигнала с энергией, локализованной в других ветвях с низким уровнем помехи. В данном случае ветви с помехами можно отбросить и не учитывать при обработке, что увеличивает скорость обработки и ОСШ.

Проведено сравнение предложенных алгоритмов (16) и (17) по сравнению с алгоритмами согласованной фильтрации без учета искажений, учитывающих искажения в середине интервала, ЧПКО, энергетического обнаружителя и алгоритма на основе вейвлет-анализа по среднеквадратичному критерию, эквивалентному величине потерь в ОСШ при обработке:

$$P = \int_{\omega_1}^{\omega_2} |SF(\omega) - S_{opt}(\omega)|^2 / |S_{opt}(\omega)|^2 d\omega, \quad (22)$$

где  $S_{opt}(\omega)$  – эталонная частотная характеристика идеального фильтра, согласованного с КСШП сигналом с учетом текущих искажений.

Результаты сравнения алгоритмов представлены на рисунке 6.



- 1 – Алгоритм на основе регуляризации (17)
- 2 – Алгоритм с использованием производной (16)
- 3 – Согласованный фильтр без учета искажений
- 4 – Алгоритм череспериодной корреляционной обработки
- 5 – Энергетический обнаружитель
- 6 – Алгоритм на основе вейвлет-анализа

Рисунок 6

Как следует из анализа рисунка 6, наихудшим по критерию максимума ОСШ является энергетический обнаружитель, поскольку у него наиболее высокие потери на обработку при одних и тех же параметрах за счет отсутствия априорной информации о форме сигнала. Наилучшим при малом уровне искажений КСШП сигнала является метод на основе вейвлет-анализа, при среднем уровне искажений наилучшим является приемник на основе метода регуляризации, при большом уровне искажений наименьшие потери приобретает приемник с ЧПКО, поскольку такой алгоритм учитывает корреляцию сигналов в разных периодах даже с учетом искажений. Квазиоптимальный фильтр с частотной характеристикой (17) обеспечивает в среднем минимальные потери в ОСШ во всем диапазоне значений  $z$  меньше на 0,74 дБ по сравнению с фильтром с учетом производной (16), на 2 дБ по сравнению с усреднением по равномерному закону и на 7 дБ по сравнению с фильтром согласованным с сигналом без искажений. Таким образом, предложенный фильтр (17), полученный методом регуляризации, является высокоэффективным при учете искажений при распространении КСШП сигнала в среде.

Проведен анализ характеристик обнаружения предложенных алгоритмов при воздействии белого шума. Показано, что при высокой вероятности пра-

вильного обнаружения ( $D = 0,95 \dots 0,99$ ) алгоритм на основе согласованного фильтра, синтезированного методом регуляризации, выигрывает на 3...8 дБ в требуемом ОСШ по сравнению с другими методами приема. Алгоритм на основе вейвлет-анализа за счет адаптации к текущей помеховой обстановке позволяет уменьшить требуемое ОСШ для достижения высокой вероятности правильного обнаружения.

Проведен анализ зависимости характеристик правильного обнаружения  $D$  от ОСШ на входе приемника  $q$  при воздействии узкополосной и импульсной помехи и фиксированной вероятности ложной тревоги  $F = 10^{-3}$ . Указанные зависимости приведены на рисунке 7 соответственно слева и справа. Нумерация алгоритмов соответствует рисунку 6.

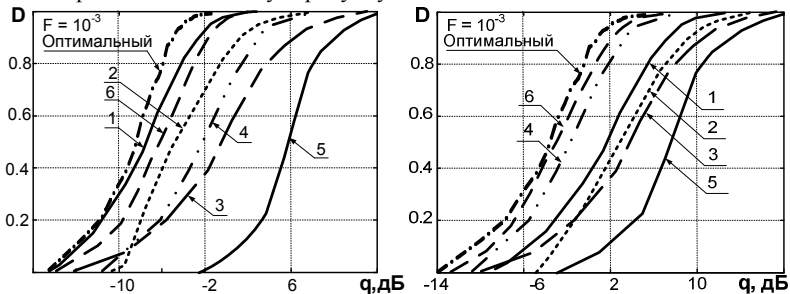


Рисунок 7

Как следует из анализа рисунка 7, при воздействии узкополосной помехи повышается эффективность приемника на основе вейвлет-анализа, поскольку вейвлет-базис данного приемника синтезирован из формы КСШП сигнала и менее восприимчив к синусоидальным помехам. Показана целесообразность использования метода ЧПКО, поскольку в данном случае произведение двух отрезков синусоидального сигнала после интегрирования стремится к нулю. Наиболее эффективным алгоритмом обработки при вероятности правильного обнаружения  $D = 0,95 \dots 0,99$  является метод на основе регуляризации, который выигрывает на 1...12 дБ по сравнению с другими методами. Наименее эффективным методом является энергетический обнаружитель. Показано, что при воздействии импульсной помехи наибольшие выигрыши обеспечивают алгоритмы обработки на основе вейвлет-анализа и ЧПКО. Показано, что при воздействии импульсных помех алгоритм на основе вейвлет-анализа при высокой вероятности правильного обнаружения  $D = 0,95 \dots 0,99$  выигрывает на 2...11 дБ по сравнению с другими алгоритмами обработки.

**В третьей главе** рассмотрены вопросы практической реализации КСШП РСПИ. Обосновано использование диодов с режимом восстановлением запирающих свойств для формирования КСШП сигналов и осуществлена практическая реализация формирователя.

Разработаны структурные схемы приемника и передатчика, обеспечивающих обмен информацией с учетом синхронизации при модуляции последовательности в системе ПИМ-МПИ. Схема передающего устройства приведена на рисунке 8.

КСШП импульс, получаемый в дальней зоне антенны, формируется из двух однополярных импульсов, сдвинутых на небольшое расстояние и подаваемых на разные плечи антенны для получения биполярного импульса, что позволяет преобразовать больше энергии импульсов в излучение. Синхрони-

зация в предложенной системе осуществляется за счет излучения дополнительного синхронизационного импульса, не меняющего своего местоположения. Информационный импульс находится на расстоянии  $T_1$  при передаче "0" и на расстоянии  $T_2$  при передаче "1". Структурная схема приемной части приведена на рисунке 9.

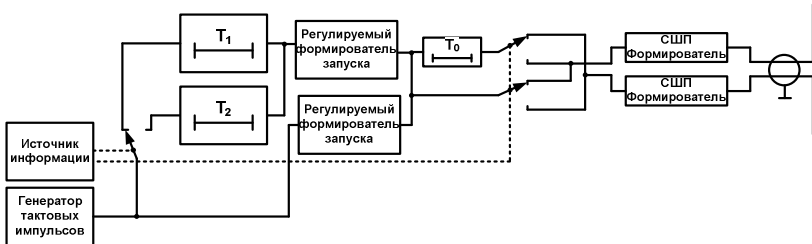


Рисунок 8

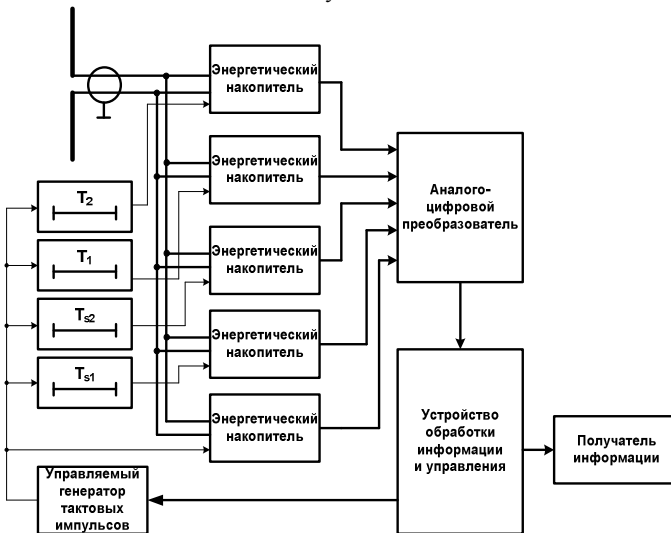


Рисунок 9

На приемной стороне используется пять каналов, настроенных на смещенные друг относительно друга временные интервалы принятия сигнала. Три канала обеспечивают захват и удержание синхронизационного КСШП сигнала, формируя временной дискриминатор. При переходе сигнала из центрального канала в правый или в левый канал происходит подстройка частоты и фазы тактового генератора приемника для компенсации полученного ухода.

Два канала настроены на принятие информационного нуля и единицы и находится на фиксированном расстоянии от синхронизационного канала, равном позициям модуляции информационного КСШП сигнала. В устройстве обработки и управления происходит подстройка тактового генератора по синхронизационным каналам и выдача информационной последовательности бит на основе обработки информационных каналов.

Данная система синхронизации является устойчивой, поскольку синхросигнал излучается непрерывно независимо от передаваемого значения и по-

звolyет вести обработку всех трех синхронизационных энергетических накопителей. Обработку каналов синхронизации можно вести более инерционно, чем информационных каналов для увеличения времени накопления импульсов и повышения устойчивости синхронизации.

Проанализирована работоспособность разработанной радиосистемы передачи информации при использовании антенн типа симметричный вибратор, рамочная антенна, антенна-бабочка и антенна Вивальди. Результаты экспериментальных исследований показали преимущество антенны Вивальди, выражающееся в наименьшем искажении сигнала и большом уровне передаваемой мощности. Поэтому в качестве излучателей использовались две СШП щелевые антенны Вивальди с экспоненциальным профилем щели.

С использованием макета разработанной КСШП РСПИ проведены экспериментальные исследования устойчивости канала передачи данных в зависимости от расстояния при сложных условиях распространения. Передатчик и приемник находились в смежных лабораториях, разделенных кирпичной стеной. В качестве критерия оценки использовалась вероятность ошибки на бит принятой информации. Результаты экспериментальных исследований, подтвержденные имитационным моделированием, приведены на рисунке 10.

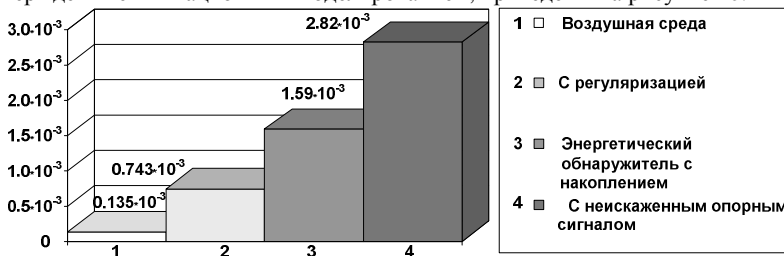


Рисунок 10

Анализ рисунка 10 показывает устойчивую работу разработанной РСПИ и качество синхронизации. Обработка без учета искажений приводит к увеличению потерь в вероятности ошибки на бит почти на порядок. Эксперимент проводился на небольшом расстоянии, что обусловлено низкой мощностью передатчика, использованием малоэффективного алгоритма энергетического накопления в приемнике и в первую очередь сложными условиями распространения при наличии заградительных препятствий.

Таким образом, в результате практического эксперимента была показана состоятельность использования КСШП сигналов в РСПИ с целью повышения скрытности передачи информации и реализации канала передачи данных в сложных условиях распространения.

**В заключении** приведены основные научные и практические результаты диссертационной работы.

1. Синтезирован КСШП сигнал по критерию, учитывающему несколько показателей качества и позволяющему получить выигрыш по сравнению с моноциклом Гаусса в ширине энергетической диаграммы направленности АС на 13 %, в коэффициенте прямоугольности ДН на 7 %, по критерию скрытности на 6 % при проигрыше в компактности во временной области всего лишь на 2,6 %.

2. Решена задача определения сигнала возбуждения АС для получения требуемой формы излученного КСШП сигнала в дальней зоне. Проведена регуляризация полученного решения по методу А.Н. Тихонова и показано пре-

имущество сигнала с учетом регуляризации по сравнению с сигналом, полученным без регуляризации в среднеквадратичной ошибке не менее чем в 2 раза при воздействии синусоидальных искажений частотной характеристики АС с учетом законов распределения искажений.

3. Показано преимущество синтезированных кодовых последовательностей по критерию скрытности, модулированных как по временному положению КСШП импульса, так и по полярности, по сравнению с кодами Хаффмана, которое составляет 13 %.

4. Показано, что применение методов обработки, использующих фильтры, частотные характеристики которых синтезированы исходя из применения информации о производной сигнала, а также метода регуляризации А.Н. Тихонова, возможно получить более низкие и робастные зависимости потерь в ОСШ по сравнению с фильтром, согласованным с неискаженным сигналом. Проигрыш в ОСШ при использовании указанных методов уменьшается на 7 дБ.

5. Алгоритм на основе энергетического обнаружения проигрывает в ОСШ на 8...17 дБ по сравнению с алгоритмом на основе регуляризации, что делает его наименее эффективным при обработке КСШП сигналов, но наиболее простая возможность реализации данного алгоритма и отсутствие необходимости в информации о форме КСШП сигнала и его искажениях делает данный алгоритм привлекательным в приложениях, требующих наименьшую стоимость готового изделия.

6. Алгоритм обработки КСШП сигналов на основе вейвлет-анализа с синтезированным исходя из формы сигнала вейвлет-базисом позволяет существенно уменьшить требуемый уровень ОСШ при малых значениях искажений на 2...10 дБ. Использование данного алгоритма позволяет динамически адаптироваться к текущей помеховой обстановке, что повышает характеристики РСПИ с КСШП сигналами.

7. Сравнение алгоритмов обработки КСШП сигналов при воздействии белого шума, узкополосной и импульсной помехи показывает, что наиболее эффективным при неопределенности информации относительно искажений формы КСШП сигнала являются следующие алгоритмы: при действии белого шума – на основе метода регуляризации (выигрыш на 3...8 дБ), при действии узкополосной помехи – на основе метода регуляризации (выигрыш на 1...12 дБ), при действии импульсной помехи – алгоритма на основе вейвлет-анализа (выигрыш на 2...11 дБ).

8. Обоснована схема формирования КСШП сигнала на основе ДДРВ, обеспечивающая приемлемый уровень мощности при достаточной простоте практической реализации.

9. Разработаны структурные схемы приемника и передатчика КСШП РСПИ на основе сигналов с ПИМ-МПИ, обеспечивающие синхронизацию за счет дополнительного тактового синхронизационного импульса в последовательности. В качестве алгоритма обнаружения выбран энергетический накопитель как наиболее простой в практической реализации. Разработаны электрические принципиальные схемы и печатные платы приемника и передатчика. Собран макетный образец КСШП РСПИ.

10. Проведены практические исследования по передаче данных сквозь препятствие в виде кирпичной стены, получены зависимости вероятности ошибки на бит от дальности линии передачи информации и от типа используемого алгоритма обработки, показывающие получение устойчивой синхро-



низации и низкую вероятность ошибки на бит даже при таких сложных условиях распространения.

Таким образом, полученные результаты диссертационной работы позволят улучшить характеристики устройств формирования и обработки КСШП сигналов при воздействии искажений на сигнал в антенном тракте, а также сложных условиях распространения и, следовательно, повысить показатели качества РСПИ.

## **СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Корниенко А.В. Исследование методов цифровой обработки радиолокационных сигналов // Тез. докл. IX ВНТК НИТ-2003. – Рязань, 2003. – С. 51-52.
2. Корниенко А.В. Модификация алгоритма поординатного спуска для синтеза дискретной кодовой последовательности фазоманипулированных сигналов // Вестник РГРТА. – Рязань, 2003. Вып. 13. – С. 120-122.
3. Дронов А.Н., Корниенко А.В. Алгоритм обобщенной фильтрации фазоманипулированных сигналов на базе вейвлетно-пакетного разложения // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: материалы 12-й МНТК. – Рязань, 2004. – С. 32-33.
4. Корниенко А.В. Алгоритм быстрого вхождения в синхронизм с сигналами спутниковых радионавигационных систем на основе вейвлетно-пакетного разложения // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: материалы 13-й МНТК. – Рязань, 2004. – С. 50-52.
5. Корниенко А.В., Дронов А.Н. Помехоустойчивая согласованная фильтрация сигналов на основе вейвлетно-пакетного разложения // Тез. докл. IX ВНТК студентов молодых ученых и специалистов НИТ-2004. – Рязань, 2004. – С. 113-114.
6. Корниенко А.В., Дронов А.Н. Вейвлетно-пакетная обработка фазоманипулированных сигналов при воздействии узкополосных и структурных помех // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Десятая МНТК студентов и аспирантов: тез. докл. Т.1 – М., 2004. – С. 54.
7. Кириллов С.Н., Корниенко А.В. Робастные к рассогласованию формы сверхширокополосных сигналов возбуждения антенной системы // Методы и устройства формирования и обработки сигналов в информационных системах: межвуз. сб. научн. тр./ Под ред. Ю.Н. Паршина. – Рязань, 2004. – С. 37-40.
8. Корниенко А.В. Синтез модулированной последовательности сверхширокополосных сигналов для увеличения энергетической эффективности обработки // Вестник РГРТА. – Рязань, 2004. Вып. 15. – С. 120-123.
9. Кириллов С.Н., Корниенко А.В., Дронов А.Н. Помехоустойчивый алгоритм обработки предварительно синтезированных фазоманипулированных сигналов в вейвлетно-пакетном базисе // Доклады 6-й МНТК "Цифровая обработка сигналов и ее применение". – М., 2004. – С. 62-63.
10. Корниенко А.В., Буй Л.Н. Анализ показателей качества моделей сверхширокополосных сигналов // Тез. докл. X ВНТК студентов молодых ученых и специалистов НИТ-2005. – Рязань, 2005. – С. 95-96.
11. Кириллов С.Н., Корниенко А.В., Буй Л.Н. Влияние среды распространения на форму сверхширокополосных сигналов в системах передачи ин-

формации // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: материалы 14-й МНТК. – Рязань, 2005. – С. 61-62.

12. Корниенко А.В., Кисляков В.В., Буй Л.Н.. Применение сверхширокополосных сигналов в системах связи. // Сети и системы связи: материалы ВНИПК. – Рязань, 2005. – С. 283-284.

13. Корниенко А.В., Буй Л.Н.. Система передачи информации на основе СШП сигналов // Информационно-измерительная и биомедицинская техника. – Рязань, 2005. – С.145-152.

14. Корниенко А.В., Буй Л.Н. Сравнение моделей сверхширокополосных сигналов по нескольким показателям качества // Вестник РГРТА. – Рязань, 2005. Вып. 16. – С. 43-45.

15. Круглов А.В., Кириллов С.Н., Корниенко А.В., Ватутин В.М. Адаптивный к помеховой обстановке алгоритм совместного синтеза и обработки фазоманипулированных сигналов на основе вейвлет-пакетного разложения // Электромагнитные волны и электронные системы. 2005. Т.10. №10. – С. 33-38.

16. Корниенко А.В. Устройство корреляционной обработки сигналов спутниковых систем связи на основе вейвлетно-пакетного разложения // Научная сессия МИФИ-2005. – М., 2005. Т. 15. – С. 78-79.

17. Корниенко А.В. Синтез кодовых последовательностей сверхширокополосных сигналов при различных видах модуляции. // Материалы 31-й МНПК. – Рязань, 2006. – С. 157-158.

18. Кириллов С.Н., Корниенко А.В. Квазиоптимальный фильтр сверхширокополосного сигнала устойчивый к влиянию среды распространения // Вестник РГРТА – Рязань, 2006. Вып. 18. – С. 129-132.

19. Кириллов С.Н., Корниенко А.В., Дронов А.Н. Идентификация структуры радиолокационных помех на основе вейвлетно-пакетного представления и банков фильтров // Труды V МНТК "Идентификация систем и задачи управления" SICPRO '06. – М., 2006. – С. 2010-2014.

20. Кириллов С.Н., Корниенко А.В. Синтез формы сверхширокополосного сигнала излучения, робастного к искажениям сигнала возбуждения антенны // Антенны, 2006. № 2. – С. 19-22.

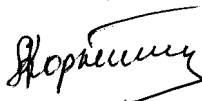
21. Кириллов С.Н., Корниенко А.В., Дронов А.Н. Синтез фазоманипулированных сигналов, устойчивых к воздействию структурных и узкополосных помех при вейвлетно-пакетной обработке. // Радиотехника, 2006. № 2. – С. 8-10.

22. Корниенко А.В., Буй Л.Н. Анализ кодовых последовательностей сверхширокополосных сигналов при различных видах модуляции // Тез. докл. XI ВНТК студентов молодых ученых и специалистов НИТ-2006. – Рязань, 2006. – С. 145-147.

23. Ватутин В.М., Корниенко А.В., Кириллов С.Н., Полтавец Ю.И., Гусаков Н.В. Анализ перспектив использования сверхширокополосных сигналов в информационно-управляющих спутниковых системах. // Информационно-измерительные и управляющие системы, 2007. №7. Т. 5. – С. 66-70.

24. Кириллов С.Н., Корниенко А.В. Система передачи информации на основе сверхширокополосных сигналов // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: материалы 15-й МНТК. – Рязань, 2008. – С. 57-59.

Соискатель



/ А.В. Корниенко /

Корниенко Алексей Викторович

Алгоритмы синтеза и обработки короткоимпульсных  
сверхширокополосных сигналов в радиосистемах передачи  
информации с учетом мешающих факторов

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 16.05.2008.

Формат бумаги 60x84 1/16.

Условных печатных листов 1,1.

Тираж 100 экз. Заказ № 36.

ГНУ ВНИМС,  
390000, Рязань, ул. Щорса, д. 38/11.