

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.391:621.396.2

**СКИБ**  
**Исса Ибрагим**

**ФОРМИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ  
РАДИОСВЯЗИ С ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ  
РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ**

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

по специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства  
телекоммуникаций

Минск 2012

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

**Научный руководитель** **Чердынцев Валерий Аркадьевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехнических систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

**Официальные оппоненты:** **Конопелько Валерий Константинович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сетей и устройств телекоммуникаций учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

**Горшков Сергей Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиолокации и приемопередающих устройств учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь»

**Оппонирующая организация** Учреждение образования «Высший государственный колледж связи»

Защита состоится «28» марта 2013 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.02 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

## **КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ**

Современные телекоммуникационные системы предполагают функционирование в условиях действия непреднамеренных и преднамеренных помех, статистические характеристики которых могут существенно отличаться от гауссовского шума. Для случая действия белого гауссовского шума теория и техника приема и обработки сигналов достаточно хорошо развиты. В случае если помеха имеет отличия от гауссовской, известные алгоритмы приема не в полной мере обеспечивают эффективность функционирования систем радиосвязи. Это относится, в частности, к импульсным и узкополосным (квази-гармоническим) помехам.

В диссертационной работе рассматриваются методы формирования сигнально-кодowych конструкций, устойчивых к действию импульсных и узкополосных помех, способных изменять частотно-временные свойства за счет вариаций группирования кодовых групп и псевдослучайной перестройки рабочей частоты. Алгоритмы и устройства приема и обработки строятся на основе теории оптимального различения сигналов на фоне сосредоточенных по времени и частоте помех.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с крупными научными программами, темами**

Диссертационная работа выполнялась в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в рамках научно-исследовательской госбюджетной темы ГБ 08-3046 «Разработка алгоритмов, структурно-функциональных схем и устройств передачи и приема информации в системах пожарной сигнализации» (2008 – 2009 гг., № ГР 20081282), а также научно-исследовательской госбюджетной темы ГБ 10-2028 «Разработать методы формирования, приема и обработки сигналов в помехозащищенных радиоэлектронных системах» (2010 – 2014 гг. № ГР 20101306).

### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертационной работы является совершенствование сигнально-кодowych конструкций, устройств их формирования и обработки в системах радиосвязи, работающих в условиях действия сосредоточенных по частоте и по времени помех.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработать алгоритмы и устройства формирования сигнально-кодовых конструкций, обеспечивающих потенциальную помехоустойчивость систем радиосвязи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты.

2. Разработать устройство демодуляции и декодирования составных сигналов с амплитудно-кодовым уплотнением.

3. Выполнить исследование и оптимизацию статистических характеристик составных сигналов.

4. Выполнить исследование характеристик помехоустойчивости систем радиосвязи в каналах с сосредоточенными и флуктуационными помехами.

Предметом исследования являются оптимальные по критериям помехозащищенности алгоритмы и устройства формирования и обработки сигналов.

Объектом исследования являются помехозащищенные системы радиосвязи.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Метод построения систем радиосвязи с повышенной помехозащищенностью на основе сложных сигнально-кодовых конструкций с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты и использованием параллельного синтеза сетки частот, позволяющего реализовать когерентную обработку сигналов и повышение скорости переключения частот.

2. Метод формирования и обработки сигнально-кодовых конструкций систем радиосвязи со структурной скрытностью и устойчивых к действию импульсных помех за счет использования составных сигналов с амплитудно-кодовым уплотнением.

3. Метод и устройство демодуляции составных сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты, обеспечивающие квазикогерентную обработку сигналов за счет использования коммутируемых усредняющих устройств, что позволяет в  $N$  раз снизить аппаратные затраты, где  $N$  – число рабочих частот.

4. Оценка помехоустойчивости на основе математического моделирования предложенных устройств обработки сигналов для систем радиосвязи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты при действии флуктуационных и импульсных помех, подтверждающая эффективность предложенных методов и возможность повышения помехоустойчивости систем не менее чем на 3 дБ по сравнению с системами с ЧМ сигналами.

## **Личный вклад соискателя**

Соискателем лично выполнено исследование статистических характеристик составных сигналов и математическое моделирование устройств квадратурной обработки сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты.

Совместно с руководителем, д-м техн. наук, проф. В.А. Чердынцевым соискателем разработаны методы формирования и обработки сигнально-кодовых конструкций для помехозащищенных систем радиосвязи в каналах с сосредоточенными помехами, синтезированы алгоритмы и устройства демодуляции когерентных составных сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты.

Основными соавторами опубликованных работ являются д-р техн. наук В.А. Чердынцев и аспирант БГУИР А.В. Мартинович.

## **Апробация результатов диссертации**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: V, VII и VIII международных молодежных научно-технических конференциях «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» (Севастополь, 2009, 2011, 2012 гг.), XIV, XVI и XVII международных научно-технических конференциях «Современные средства связи» (Минск, 2009, 2011, 2012 гг.), VII и X Белорусско-российских научно-технических конференциях «Технические средства защиты информации» (Минск, 2009, 2012 гг.), 45-й, 46-й, 48-й научных конференциях БГУИР аспирантов, магистрантов и студентов (Минск, 2009, 2010, 2012 гг.).

## **Опубликованность результатов диссертации**

По результатам исследований, изложенных в диссертации, опубликовано 19 работ, в том числе 4 статьи общим объемом 2,14 авторского листа в научных журналах; 12 статей и тезисов докладов в сборниках материалов научно-технических конференций; получены 2 патента на полезную модель и одно положительное решение о выдаче патента на полезную модель.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и трех приложений.

В *первой главе* определены тенденции развития помехозащищенных систем радиосвязи (СРС) с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ). Рассмотрены виды цифровых сигналов, применяемых в СРС, а также техника построения СРС с ППРЧ, включающая методы синтеза сетки рабочих частот, обзор типовых структурных схем СРС с ППРЧ, способ повышения энергетической эффективности систем с ППРЧ. Во *второй главе* рассмотрены сигналы с параллельно-составной структурой и амплитудно-кодовым уплотнением, обеспечивающие помехоустойчивость и скрытность систем радиосвязи, которые работают в условиях действия сосредоточенных по времени (импульсных) помех. Выполнено исследование статистических характеристик составных сигналов. В *третьей главе* выполнен синтез квадратурного квазикогерентного демодулятора составного ППРЧ сигнала с фазовой манипуляцией. В *четвертой главе* представлены результаты математического моделирования устройств формирования и обработки сигналов с ППРЧ на основе рассмотренных и предложенных методов построения СРС с ППРЧ. Приведены характеристики помехоустойчивости устройств обработки сигналов с ППРЧ.

Общий объем диссертационной работы составляет 118 страниц, из них 65 страниц основного текста, 48 иллюстраций на 20 страницах, библиографический список из 63 наименований на 6 страницах, 3 приложения на 27 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, рассмотрены тенденции развития помехозащищенных систем радиосвязи, показана необходимость совершенствования методов и устройств формирования и обработки сигналов в помехозащищенных СРС.

В *первой главе* приведены результаты анализа научно-технической литературы, в которой отражены особенности построения систем радиосвязи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты.

При методе ППРЧ расширение спектра обеспечивается путем скачкообразного изменения несущей частоты в выделенном для работы СРС диапазоне  $W_s$  частот. В общем случае сигналы с ППРЧ представляются в виде последовательности видеоимпульсов, модулированных несущими частотами и перестраиваемыми в диапазоне  $W_s$ . Закон перестройки определяется псевдослучайным кодом, известным на передающей и приемной сторонах и неизвестным постороннему помех. Применение сигналов с ППРЧ не позволяет системе радио-

электронного противодействия (РЭП) эффективно подавлять СРС и вынуждает распределять спектральную плотность передатчика с ограниченной мощностью по отдельным участкам частотного диапазона  $W_s$ .

В настоящее время системы радиосвязи с ППРЧ строятся на основе синтезаторов с косвенным методом синтеза рабочих частот. Типовая структурная схема СРС с ППРЧ приведена на рисунке 1.

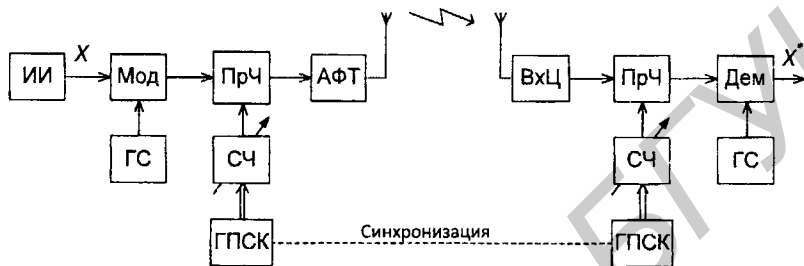


Рисунок 1 – Структурная схема типовой СРС с ППРЧ

На рисунке обозначены: ИИ – источник информации, Мод – модулятор, ГС – генератор сигнала, ПрЧ – преобразователь частоты, СЧ – синтезатор частоты, ГПСК – генератор псевдослучайного кода, АФТ – антенно-фидерный тракт, ВхЦ – входная цепь, Дем – демодулятор. В такой СРС используется, как правило, частотная манипуляция и некогерентная обработка сигнала.

Известно, что наибольшей эффективностью с точки зрения помехоустойчивости обладают системы на основе сигналов с фазовой манипуляцией. Использование синтезаторов на основе параллельного (прямого) синтеза позволяет применять когерентные сигналы с цифровой фазовой модуляцией, что увеличивает потенциальные возможности систем радиосвязи (помехоустойчивость, скрытность, спектральную эффективность и др.).

Предложена структурная схема СРС с ППРЧ (рисунок 2) на основе параллельного синтеза рабочих частот. Наличие  $N$  генераторов частот (ГЧ) позволяет при их коммутации сохранять фазу на каждой из частот принимаемого сигнала, известной на приемной стороне, а формирование сигнала на промежуточной частоте упрощает аппаратную реализацию устройств формирования и обработки ППРЧ сигналов за счет использования одного модулятора и одного демодулятора.

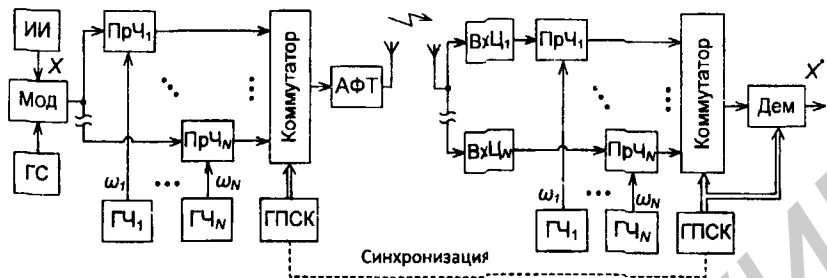


Рисунок 2 – Структура СРС с ППРЧ на основе параллельного синтеза

Во второй главе рассмотрены сигналы с параллельно-составной структурой (ПСС), которые позволяют обеспечить высокую помехозащищенность радиосвязи в каналах с импульсными помехами. В качестве системы ортогональных функций выбраны дискретные функции Уолша, т.к. данные функции обладают необходимыми свойствами для построения ПСС сигналов:

- кодовые последовательности Уолша являются ортогональными;
- функции Уолша обладают свойством мультипликативности;
- функция Уолша периодическая с периодом  $M$ :  $W_i(\theta \pm M) = W_i(\theta)$ ;
- функция Уолша при всех  $i \neq 1$  имеет нулевое среднее значение.

Сигнал с параллельно-составной структурой, или групповой сигнал, описывается выражением

$$s_i(t) = \sum_{i=1}^M b_i(t) \cdot W_i(t), \quad i = \overline{1, M}, \quad (1)$$

где  $W_i(t)$  – функция Уолша с номером  $i$ ;

$b_i(t)$  – расширенный информационный символ длительностью  $MT_b$ ;

$T_b$  – длительность информационного символа;

$M=2^n, n=\{2, 3, \dots\}$ .

Последовательности Уолша имеют нулевое среднее значение, что приводит к появлению нулевых значений составного сигнала и ухудшению его пик-фактора. Поэтому при формировании составного сигнала на информационную последовательность налагаются ограничения:

- группа из  $M$  символов для двоичной информационной последовательности не должна содержать четное количество «0» и «1»;



- группа из  $M$  символов для многоуровневой информационной последовательности не должна иметь среднее значение, равное нулю.

В случае невыполнения указанных условий групповой сигнал будет содержать нулевые амплитуды (перерывы сигнала), или «вырожденные» группы, состоящие из одного символа с амплитудой  $M$  и  $M-1$  нулевых символов. Информационный поток, состоящий из групп символов, с учетом описанных ограничений будем называть «упорядоченным» информационным потоком, а без учета – «неупорядоченным».

Выполнено исследование статистических характеристик составного сигнала с использованием разработанного программного обеспечения на языке С#. Результаты представлены на рисунке 3.

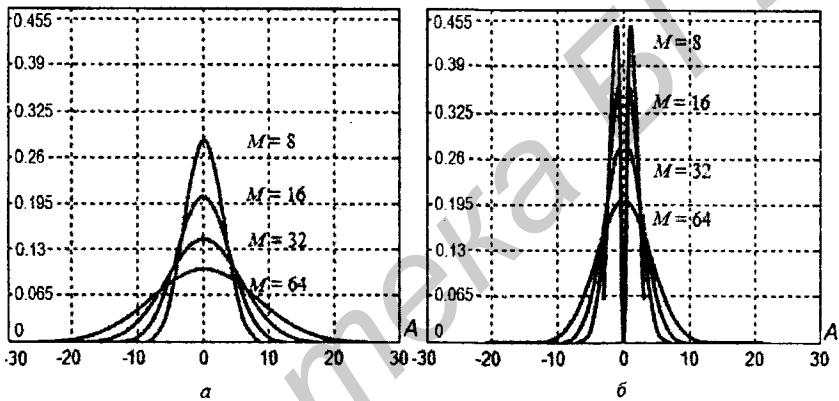


Рисунок 3 – Плотность распределения уровней составного сигнала «неупорядоченного» (а) и «упорядоченного» (б) информационных потоков

Распределение возможных состояний  $A$  составного сигнала получено для  $3 \cdot 10^8$  информационных символов для четырех значений длин  $M$  функции Уолша. С увеличением длины  $M$  наблюдается уменьшение диапазона распределения амплитуд составного сигнала относительно всех возможных значений. Например, при  $M = 32$  наиболее вероятные состояния составляют 95 % и занимают 33 % от всего диапазона значений.

Использование «упорядоченного» информационного потока приводит к сокращению в два раза динамического диапазона возможных значений составного сигнала, что позволяет более эффективно использовать мощностной ресурс передатчика.

Предложен способ повышения структурной скрытности СРС за счет применения сигналов с амплитудно-кодовым уплотнением (АКУ).

Определены условия формирования сигнала с АКУ для  $L$  бинарных потоков. Если для  $L$  бинарных потоков выполняется условие

$$|a_j X_j| > \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^M |a_i X_i|, \quad M \leq L-1, \quad (2)$$

то  $X_j = \text{sign} \left[ \sum_{i=1}^L (a_i X_i) \right]$ ,  $X_{j-1} = \text{sign} \left[ \sum_{i=1}^L (a_i X_i) - a_j X_j \right]$  и т.д.

Таким образом,

$$X_m = \text{sign} \left[ \sum_{i=1}^L (a_i X_i) - \sum_{j=m+1}^L (a_j X_j) \right], \quad m \in [1, L]. \quad (3)$$

Предложена схема формирования сигнала с параллельно-составной структурой и амплитудно-кодовым уплотнением (рисунок 4) с учетом выражений (1) – (3). В схеме используются следующие обозначения: БКК – блок коммутации каналов, ФВК – формирователь весовых коэффициентов, ФГС – формирователь группового сигнала, ГТЧ – генератор тактовой частоты, ГКП – генератор кодовой последовательности, ГПСП – генератор псевдослучайной последовательности, ГФУ – генератор функций Уолша, ФВ – фазовращатель на  $\pi/2$ , ГС – генератор сигнала, КАФМ – квадратурный амплитудно-фазовый модулятор.

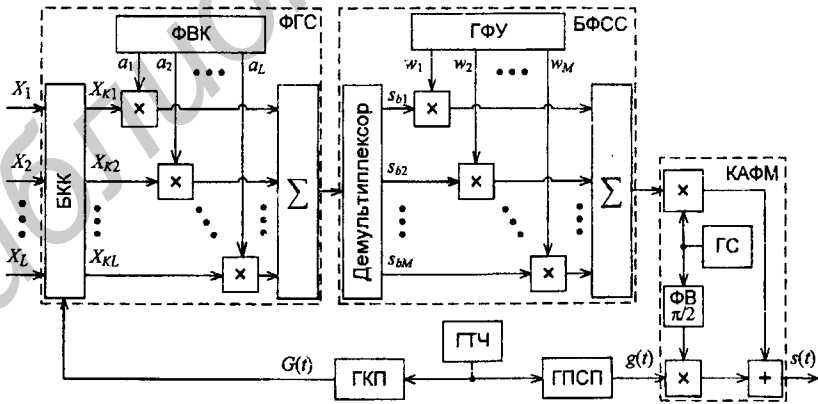


Рисунок 4 – Схема формирования сигнала с ПСС и АКУ

В третьей главе рассмотрены вопросы квазикогерентного приема составных сигналов на фоне аддитивного белого гауссовского шума и узкополосных квазигармонических помех, выполнена оптимизация структуры устройств формирования и обработки составных сигналов с ППРЧ.

Сигнально-кодовые конструкции, используемые в системах радиосвязи, предусматривают обработку с использованием цифровых вычислительных устройств. Квадратурная обработка обеспечивает формирование отсчетов принятой смеси  $r(t)$  радиосигнала и шума в ортогональных каналах без потери информации и не требует подстройки источников опорного колебания. Целью обработки является формирование оценок максимального правдоподобия информационных символов  $X^*$ , которые обеспечивают наибольшую вероятность правильного решения (наименьшую вероятность ошибки  $P_e$ ).

Синтез устройства обработки сложных сигналов с ППРЧ рассмотрен на примере квадратурного ФМ сигнала, несущего информацию о бинарных потоках  $X_1(t)$  и  $X_2(t)$ . Сигнал формируется на выходе модулятора на определенной (промежуточной) частоте  $\omega_n$  и описывается выражением

$$s(t, X, \omega_n, \beta_n, A_0) = A_0 [X_1(t) \cos(\omega_n t + \beta_n) + X_2(t) \sin(\omega_n t + \beta_n)]. \quad (4)$$

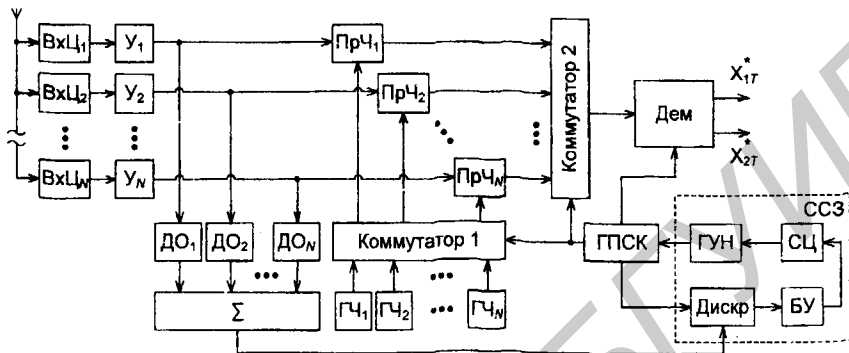
С выхода модулятора сигнал (4) поступает на  $N$  преобразователей частоты, переключаемых коммутатором за счет управления от генератора псевдослучайного кода (см. рисунок 2), формируя квадратурный ФМ сигнал с псевдослучайным переключением частоты  $\omega_j$  и начальной фазы  $\beta_j$ :

$$s(t, X, \omega_j, \beta_j, A_0) = A_0 [X_1(t) \cos(\omega_j t + \beta_j) + X_2(t) \sin(\omega_j t + \beta_j)], j = \overline{1, N}. \quad (5)$$

Алгоритмы приема, преобразования и обработки ФМ сигнала с ППРЧ отражают операции по формированию сигнала (5) на передающей стороне. Последовательность операций на приемной стороне следующая: с выхода антенного устройства сигнал (5) поступает в одну из  $N$  входных цепей ( $Vx\Pi_j$ ,  $j = \overline{1, N}$ ) и усилитель ( $У$ ), настроенный на частоту  $\omega_j$  действующего ФМ сигнала.

Синхронизированный генератор ГПСК обеспечивает с помощью коммутатора 1 подключение соответствующего  $j$ -го преобразователя частоты ( $\Pi\rho\mathcal{C}_j$ ) к генератору частоты  $\Gamma\mathcal{C}_j$ , вырабатывающего опорные колебания для  $\Pi\rho\mathcal{C}_j$ . В результате преобразования на выходе  $\Pi\rho\mathcal{C}_j$  образуется процесс  $r(t)$ , содержащий сумму принятого квадратурного ФМ сигнала и шума  $n(t)$   $j$ -го усилителя. Ком-

мутатор 2 подключает выход ПрЧ<sub>г</sub> к демодулятору (Дем). Структурная схема на рисунке 5 отражает описанные операции.



**Рисунок 5 – Схема переноса сигнала ФМ с ППРЧ на промежуточную частоту**

Схема слежения за задержкой (ССЗ) псевдослучайного кода (ПСК), показанная на рисунке 5, обеспечивает синхронизацию генератора ПСК. Работа дискриминатора (Дискр) осуществляется за счет выделенных элементов ПСК детекторами огибающих (ДО<sub>г</sub>,  $j = \overline{1, N}$ ) и опорной ПСК, вырабатываемой генератором ГПСК. Управление задержкой ПСК осуществляет генератором, управляемым напряжением (ГУН). Сглаживающие цепи (СЦ) обеспечивают требуемую динамику работы ССЗ.

Предложен метод построения и схема демодулятора (на рисунке 5 – Дем).

Наблюдаемый процесс  $r(t)$  на входе демодулятора включает сигнал (5) и шум. Оценке подлежат информационные параметры  $X_1$  и  $X_2$ , амплитуда и фаза  $\beta_{пг}$ . Фаза  $\beta_{пг}$  меняет свое значение при изменении номера  $j$  частоты  $\omega_j$ ,  $j = \overline{1, N}$ . Предполагается, что после завершения периода псевдослучайного кода возвращение на  $j$ -й элемент сопровождается возвращением прежнего значения начальной фазы  $\beta_{пг}$ . Иначе говоря, начальная фаза  $\beta_n$  представляет псевдослучайную многоуровневую (в пределах  $[0, 2\pi]$ ) последовательность.

Задачу оценивания фаз сигнала можно свести к оцениванию амплитудных коэффициентов, т.е. к линейному оцениванию, что упрощает алгоритм, не снижая качества оценок.

Полагая  $A_0 = 1$ , запишем сигнал (4) в виде

$$s(t, X, \omega_n, \beta_n) = X_1(t) (a_{cj} \cos(\omega_n t) - a_{sj} \sin(\omega_n t)) + X_2(t) (a_{cj} \sin(\omega_n t) + a_{sj} \cos(\omega_n t)), \quad (6)$$

где амплитудные коэффициенты  $a_{cj} = \cos(\beta_{nj})$ ,  $a_{sj} = \sin(\beta_{nj})$ ,  $j \approx \overline{1, N}$ .

С учетом (6) достаточной статистикой для оценок параметров наблюдаемого сигнала является корреляционный интеграл  $J(a_{cj}, a_{sj}, X)$ , который на интервале  $[(k-1)\delta, k\delta]$  определяет  $k$ -й отсчет статистических данных. Полагаем, что в течение времени  $T$ , равно продолжительности информационного элемента  $X$ , образуется  $L = T/\delta$  отсчетов  $J_k(a_{cj}, a_{sj}, X)$  сгруппированных наблюдений. Отсчеты оценок  $X_{1k}$  и  $X_{2k}$  должны быть накоплены в сумматоре-накопителе, и в момент окончания накопления принимается решение о знаке  $X_{1T}$  (индекс  $T$  указывает на момент окончания действия информационного элемента).

Выражение для  $J_k(a_{cj}, a_{sj}, X)$  с учетом представления (6) и указанных замечаний имеет вид

$$J_k(a_{cj}, a_{sj}, X) = X_1 [a_{cj} J_{cj} - a_{sj} J_{sj}] + X_2 [a_{cj} J_{sj} + a_{sj} J_{cj}], \quad (7)$$

где  $J_{cj} = \int_{(k-1)\delta}^{k\delta} r(t) \cos(\omega_n t) dt$ ;  $J_{sj} = \int_{(k-1)\delta}^{k\delta} r(t) \sin(\omega_n t) dt$ .

При постоянстве оцениваемых параметров  $a_{cj}$  и  $a_{sj}$  отсчеты оценок  $a_{cj}$ ,  $a_{sj}$  могут усредняться с учетом выборок из периодически повторяющихся (с периодом ПСК  $T_n$ ) фрагментов сигнала с одной и той же начальной фазой  $\beta_{nj}$ . Усредняющие устройства должны отключаться на время действия сигнала с частотой  $\omega_i$ ,  $i \neq j$ . Коммутацию обеспечивают коммутаторы входов и выходов усредняющих устройств. Такими устройствами являются коммутируемые трансверсальные фильтры (КТФ).

На выходах  $j$ -го КТФ образуются усредненные оценки

$$a_{cj}^* = \frac{1}{N} \sum_{k=N}^k a_{cj}^*; \quad a_{sj}^* = \frac{1}{N} \sum_{k=N}^k a_{sj}^*.$$

Оценки максимального правдоподобия определяются следующей системой уравнений правдоподобия:

$$\begin{cases} X_1^* J_{cjk} + X_2^* J_{sjk} \Big|_{a_{cj}} = 0; X_2^* J_{cjk} - X_1^* J_{sjk} \Big|_{a_{sj}} = 0; \\ \sum_{k=1}^n [a_{cjk}^* J_{sjk} + a_{sjk}^* J_{cjk}] \Big|_{X_2^*} = 0; \sum_{k=1}^n [a_{cjk}^* J_{cjk} - a_{sjk}^* J_{sjk}] \Big|_{X_1^*} = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Постоянство значений  $a_{cj}$  и  $a_{sj}$  обеспечивает возможность использовать при формировании их оценок обратную связь по принятому решению (ОСР) о значениях дискретных информационных параметрах  $X_{1T}^*$  и  $X_{2T}^*$ , где индекс  $T$  означает запаздывание выделенного информационного элемента на время  $T$  по отношению к принимаемому. Здесь  $T = n\delta$ , где  $n$  – число выборок.

В соответствии с уравнениями (8) предложена функциональная схема квадратурного квазикогерентного демодулятора ФМ сигнала с ППРЧ (рисунок 6).

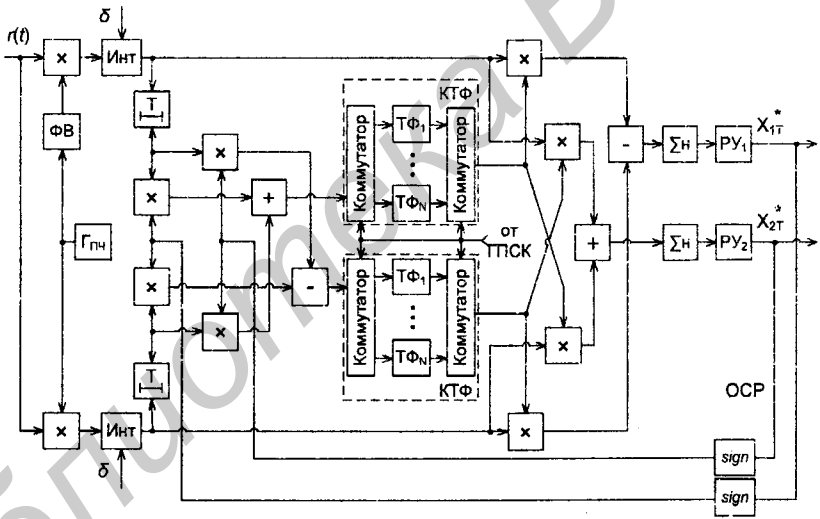


Рисунок 6 – Квадратурный квазикогерентный демодулятор

На рисунке обозначены: ФВ – фазовращатель на  $\pi/2$ , Гпч – генератор промежуточной частоты, Инт – интегратор со сбросом,  $\Sigma_n$  – сумматор-накопитель, РУ – решающее устройство.

Особенность демодулятора состоит в наличии элементов задержки в информационных каналах для согласования с ОСР и коммутируемых трансверсальных фильтров. Наличие КТФ в синфазном и квадратурном каналах приводит к сохранению состояний о фазах принимаемого сигнала с ППРЧ.

Для работы с квадратурными амплитудно-манипулированными сигналами схема устройства квазикогерентной демодуляции ФМ сигналов (рисунок 6) дополняется каналом оценки фазовых коэффициентов  $a_c$  и  $a_s$  принимаемого сигнала.

В четвертой главе приведены результаты математического моделирования в среде Simulink пакета Matlab устройств формирования и обработки составных сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты на основе рассмотренных и предложенных методов построения устройств формирования и обработки ППРЧ сигналов.

Для оценки помехоустойчивости устройств формирования и обработки сигналов СРС в условиях действия помех построены зависимости вероятности ошибки на бит (ВОБ)  $P_e$  информации от заданного отношения сигнал-шум (ОСШ)  $q$ . На рисунке 7 приведены зависимости ВОБ  $P_e$  от ОСШ  $q$  для фазоманипулированных и частотно-манипулированных сигналов с ППРЧ.

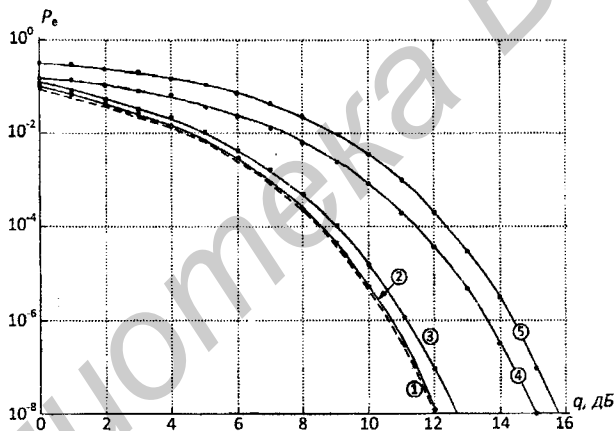


Рисунок 7 – Графики зависимости ВОБ  $P_e$  от ОСШ  $q$  для ФМ и ЧМ сигналов с ППРЧ

Зависимость 1 характеризует потенциальную помехоустойчивость СРС с ППРЧ для фазоманипулированных сигналов. Зависимости 2 и 3 получены для фазоманипулированных сигналов с ППРЧ при наличии и отсутствии учета состояния фазы принимаемого сигнала соответственно. Зависимости 4 и 5 показывают эффективность СРС с ППРЧ при использовании частотно-манипулированных сигналов и их когерентной (график 4) и некогерентной (график 5) обработке.

На рисунке 8 приведены зависимости ВОБ  $P_e$  от ОСШ  $q$  для ФМ сигналов при наличии ошибок тактовой синхронизации на 5 % (кривые 1, 2), 15 % (кривые 3, 4) и 30 % (кривые 5, 6). Зависимости 1, 3, 5 получены при наличии учета фазы принимаемого сигнала за счет применения коммутируемых усредняющих устройств, зависимости 2, 4, 6 – при отсутствии учета фазы принимаемого сигнала.

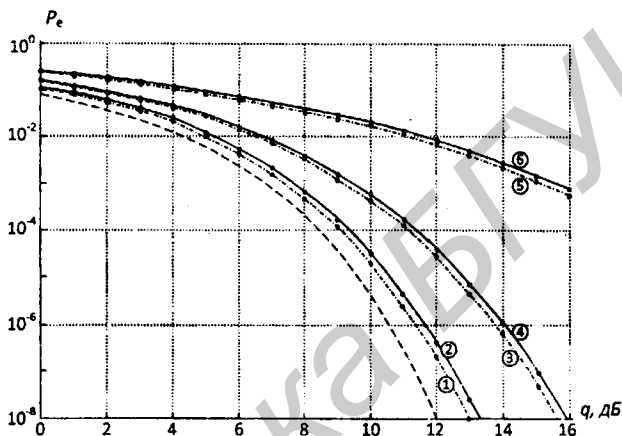


Рисунок 8 – Графики зависимости ВОБ  $P_e$  от ОСШ  $q$  при наличии ошибок синхронизации

На рисунке 9 приведены вероятностные характеристики СРС с ППРЧ для ФМ сигналов при медленном изменении фазы. «Уход» фазы принимаемого сигнала может происходить в результате влияния канала распространения радиосигнала или за счет движения приемного и/или передающего устройств. Зависимости 1 и 2 получены при изменении фазы сигнала за время работы передатчика на других рабочих частотах на величину  $\Delta\beta = 2^\circ$ . Зависимости 3 и 4 получены для  $\Delta\beta = 5^\circ$ . Графики 1 и 3 получены при использовании коммутируемых трансверсальных фильтров, 2 и 4 – без использования.

Выполнено исследование характеристик помехоустойчивости СРС с ППРЧ при действии импульсных помех и аддитивного белого гауссовского шума для различных значений длин  $M$  функций Уолша. На рисунке 10 представлены зависимости ВОБ  $P_e$  от ОСШ  $q$  для составных сигналов с ППРЧ для случая  $M = 32$ . Кривая 1 получена при отсутствии импульсных помех в канале, кривые 2, 3, 4, 5 получены при наличии одной, трех, пяти и семи импульсных помех, воздействующих на группу из  $M$  символов составного сигнала соответственно.



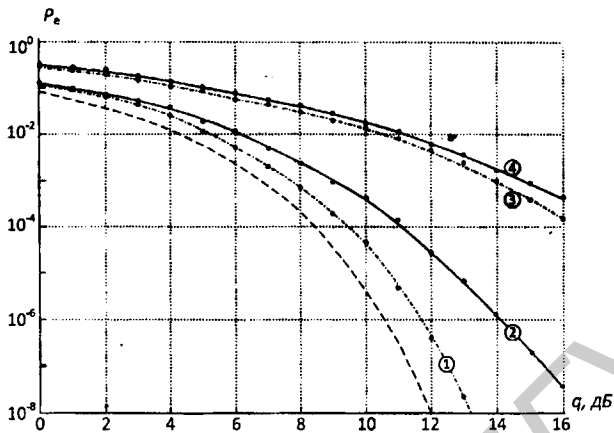


Рисунок 9 – Графики зависимости ВОО  $P_e$  от ОСШ  $q$  для ФМ сигналов с ППРЧ при медленном изменении фазы принимаемого сигнала

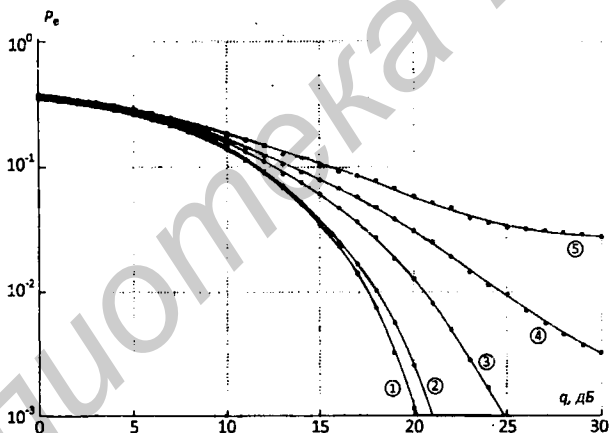


Рисунок 10 – Графики зависимости ВОО  $P_e$  от ОСШ  $q$  для составных сигналов с ППРЧ ( $M = 32$ ) при наличии импульсных помех

В приложениях представлены результаты исследования статистических характеристик сигналов с параллельно-составной структурой, описание simulink-моделей на основе предложенных алгоритмов и устройств обработки сигналов для исследования характеристик помехоустойчивости СРС с ППРЧ, акт о практическом использовании результатов диссертационной работы и акт внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Предложен метод построения СРС с повышенной помехозащищенностью на основе сложных сигнально-кодowych конструкций с ППРЧ и использованием прямого синтеза сетки частот, позволяющий реализовать когерентную обработку ППРЧ сигналов и повышение скорости переключения частот [3-А, 9-А, 11-А, 12-А].

2. Предложен метод формирования и обработки сигналов СРС с повышенной структурной скрытностью и устойчивых к действию импульсных помех за счет использования составных сигналов с амплитудно-кодowym уплотнением [2-А, 5-А, 6-А, 7-А, 8-А, 13-А, 15-А, 17-А].

3. Осуществлен структурный синтез устройства демодуляции составных сигналов с ППРЧ, обеспечивающего квазикогерентную обработку сигналов за счет использования коммутируемых усредняющих устройств, что позволяет в  $N$  раз снизить аппаратные затраты, где  $N$  – число рабочих частот [1-А, 3-А, 9-А, 11-А, 12-А, 14-А, 19-А].

4. Дана количественная оценка эффективности предложенных СРС с ППРЧ. Показано, что при действии флуктуационных помех возможно повышение помехоустойчивости систем не менее чем на 3 дБ по сравнению с системами с ЧМ сигналами [3-А, 4-А, 12-А, 14-А, 19-А].

5. Выполнено исследование статистических характеристик сигналов с параллельно-составной структурой на базе ортогональных функций Уолша. Установлено, что с увеличением длины  $M$  ортогональных функций Уолша сужается динамический диапазон вероятных значений составного сигнала. Использование «упорядоченного» информационного потока для построения составных сигналов позволяет сосредоточить мощность передатчика в наиболее вероятных значениях динамического диапазона, что значительно снижает среднюю и пиковую мощность сигнала [2-А, 10-А, 16-А, 18-А].

### Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Предложенный метод формирования и обработки сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты может быть использован для повышения энергетической эффективности помехозащищенных систем радиосвязи за счет использования фазовой цифровой модуляции сигналов и их когерентной обработки [3-А, 14-А, 19-А].

2. Результаты исследований могут быть использованы при построении систем радиосвязи, устойчивых к действию импульсных помех, в условиях ограниченного частотного диапазона за счет применения сигналов с параллельно-составной структурой [8-А, 9-А, 10-А, 16-А, 17-А].

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в рецензируемых научных журналах

1–А. Скиб, И.И. Фильтрация параметров сигналов, содержащих случайные начальные фазы / В.А. Чердынцев, В.В. Дубровский, С.И. Половения, И.И. Скиб // Доклады БГУИР. – 2009. – № 2 (40). – С. 5–12.

2–А. Скиб, И.И. Формирование и обработка сигналов с амплитудным уплотнением в системах цифровой радиосвязи / В.А. Чердынцев, А.В. Мартинович, И.И. Скиб // Доклады БГУИР. – 2011. – № 4 (58). – С. 12–17.

3–А. Скиб, И.И. Системы радиосвязи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты фазоманипулированных сигналов / А.В. Мартинович, И.И. Скиб, В.А. Чердынцев // Доклады БГУИР. – 2012. – № 1 (63). – С. 10–16.

4–А. Скиб, И.И. Характеристики помехоустойчивости систем передачи информации с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты / И.И. Скиб, А.В. Мартинович, Е.Л. Крейдик, В.А. Чердынцев // Доклады БГУИР. – 2012. – № 6 (68). – С. 36–41.

### Статьи и тезисы докладов в сборниках материалов конференций

5–А. Скиб, И.И. Синхронизация QAM сигналов с параллельной структурой / И.И. Скиб, Е.Л. Крейдик, В.А. Чердынцев // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2009»: материалы 5-й Междунар. молодеж. науч.-техн. конф., Украина, г. Севастополь, 20 – 25 апр. 2009 г. / Севаст. нац. техн. ун-т. – Севастополь, 2009. – С. 79.

6–А. Скиб, И.И. Формирование хаос-сигналов на основе составных отображений / В.А. Чердынцев, С.И. Половения, И.И. Скиб // Технические средства защиты информации: материалы VI Белорус.-российск. науч.-техн. конф., г. Минск, 23 – 24 июня 2009 г. / БГУИР. – Минск, 2009. – С. 74.

7–А. Скиб, И.И. Формирование составных хаос-сигналов / В.А. Чердынцев, С.И. Половения, И.И. Скиб // Технические средства защиты информации: материалы VII Белорус.-российск. науч.-техн. конф., г. Минск, 23 – 24 июня 2009 г. / БГУИР. – Минск, 2009. – С. 74.

8–А. Скиб, И.И. Система передачи информации на основе составных хаос-сигналов / В.А. Чердынцев, С.И. Половения, И.И. Скиб // Современные средства связи: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 29 сент. – 1 окт. 2009 г. / Высш. гос. колледж связи. – Минск, 2009. – С. 38.

9–А. Скиб, И.И. Формирование и обработка составных сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты / И.И. Скиб, Нгуен Тхань Нам, Ха Киенг Чунг, В.А. Чердынцев // Современные средства связи: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 29 сент. – 1 окт. 2009 г. / Выш. гос. колледж связи. – Минск, 2009. – С. 65.

10–А. Скиб, И.И. Применение составных сигналов в системах передачи информации / И.И. Скиб // Материалы секции «Радиотехнические системы» 46-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, г. Минск, 19 – 23 апреля 2010 г. / БГУИР. – Минск, 2010. – С. 27–28.

11–А. Скиб, И.И. Устройство совместной демодуляции и синхронизации сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией / А.В. Мартинович, И.И. Скиб, В.А. Чердынцев // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2011»: материалы 7-й Междунар. молодежн. науч.-техн. конф., Украина, г. Севастополь, 11 – 15 апр. 2011 г. / Севаст. нац. техн. ун-т. – Севастополь, 2011. – С. 98.

12–А. Скиб, И.И. Формирование и обработка шумовых сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты / А.В. Мартинович, И.И. Скиб // Современные средства связи: материалы XVI Междунар. науч.-техн. конф. Минск, 27 – 29 сент. 2011 г. / Выш. гос. колледж связи. – Минск, 2011. – С. 42.

13–А. Скиб, И.И. Формирование и обработка сигналов на основе скрытых периодичностей случайных последовательностей / А.В. Дубровский, А.В. Мартинович, И.И. Скиб // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2012»: материалы 8-й Междунар. молодежн. науч.-техн. конф., Украина, г. Севастополь, 23 – 27 апр. 2012 г. / Севаст. нац. техн. ун-т. – Севастополь, 2012. – С. 96.

14–А. Скиб, И.И. Устройство обработки фазоманипулированных сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты / И.И. Скиб, А.В. Мартинович // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2012»: материалы 8-й Междунар. молодежн. науч.-техн. конф., Украина, г. Севастополь, 23 – 27 апр. 2012 г. / Севаст. нац. техн. ун-т. – Севастополь, 2012. – С. 97.

15–А. Скиб, И.И. Корреляционно-временное уплотнение шумовых сигналов / А.В. Мартинович, И.И. Скиб // Технические средства защиты информации: материалы X Белорус.-рос. науч.-техн. конф., г. Минск, 29 – 30 мая 2012 г. / БГУИР. – Минск, 2012. – С. 14.

16–А. Скиб, И.И. Статистические характеристики сигналов с параллельно-составной структурой / Современные средства связи: материалы XVI Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16 – 18 окт. 2012 г. / Выш. гос. колледж связи. – Минск, 2012. – С. 63.

## Патенты

17–А. Скиб, И.И. Патент на полезную модель РБ № 7489. Система передачи дискретной информации на основе составного динамического хаоса / В.А. Чердынцев, А.В. Мартинович, С.И. Половения, И.И. Скиб; заявитель учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». – № u 20101011; заявл. 03.12.10, опубл. 16.05.11 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлект. уласнасці. – 2011. – № 4 (81). – С. 231.

18–А.Скиб, И.И. Патент на полезную модель РБ № 8736. Система передачи дискретной информации с амплитудно-кодовым уплотнением сигналов / В.А. Чердынцев, А.В. Мартинович, И.И. Скиб; заявитель учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». – № u 20120418; заявл. 18.04.12, опубл. 15.08.12 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлект. уласнасці. – 2012. – № 6 (89). – С. 258.

## Заявки на патент

19–А. Скиб, И.И. Заявка на патент на полезную модель РБ № u 20120648. Устройство приема и обработки фазоманипулированных сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты / В.А. Чердынцев, А.В. Мартинович, Е.Л. Крейдик, И.И. Скиб.



## РЭЗІЮМЭ

Скіб Ісса Ібрагім

### Фарміраванне і апрацоўка сігналаў у сістэмах радыёсувязі з псеўдавыпадковай перабудовай працоўнай частаты

**Ключавыя словы:** памехаабароненасць, псеўдавыпадкова перабудова працоўнай частаты, функцыі Уолша, паралельны сінтэз частот.

**Мэта працы:** удасканаленне сігнальна-кодавых канструкцый, прылад іх фарміравання і апрацоўкі ў сістэмах радыёсувязі, якія працуюць ва ўмовах дзеяння засяроджаных перашкод.

**Метады даследавання і абсталяванне:** даследаванне статыстычных характарыстык сігналаў з паралельна-складовай структурай на базе аргаганальных функцый Уолша праводзіліся з выкарыстаннем распрацаванага праграмнага забеспячэння на мове С#. Даследаванне характарыстык перашкодаўстойлівасць сістэм радыёсувязі ва ўмовах дзеяння засяроджаных перашкод выкананы з дапамогай распрацаваных simulink-мадэляў і графічнай надбудовы BERTool пакета Matlab.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** распрацаваны алгарытм і прылады фарміравання і апрацоўкі складовых сігналаў з псеўдавыпадковай перабудовай працоўнай частаты на аснове паралельнага сінтэзу сеткі працоўных частот і выкарыстаннем фазавай маніпуляцыі, якія павышаюць перашкодаўстойлівасць сістэм не менш чым на 3 дБ у параўнанні з існуючымі сістэмах з частотнай маніпуляцыяй і што дазваляюць знізіць апаратныя выдаткі ў  $N$  раз, дзе  $N$  – колькасць працоўных частот.

**Ступень выкарыстання:** вынікі працы выкарыстаны ў ААТ «АГАТ-СІСТЭМ – кіруючая кампанія холдынгу «Сістэмы сувязі і кіравання» і ў навучальным працэсе ўстанова адукацыі «Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт інфарматыкі і радыёэлектронікі».

**Вобласць ужывання:** памехаабаронення сістэмы радыёсувязі.

## РЕЗЮМЕ

Скиб Исса Ибрагим

### **Формирование и обработка сигналов в системах радиосвязи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты**

**Ключевые слова:** помехозащищенность, псевдослучайная перестройка рабочей частоты, функции Уолша, параллельный синтез частот.

**Цель работы:** совершенствование сигнально-кодовых конструкций, устройств их формирования и обработки в системах радиосвязи, работающих в условиях действия сосредоточенных помех.

**Методы исследования и оборудование:** исследование статистических характеристик сигналов с параллельно-составной структурой на базе ортогональных функций Уолша проводились с использованием разработанного программного обеспечения на языке C#. Исследование характеристик помехоустойчивости систем радиосвязи в условиях действия сосредоточенных помех выполнены с помощью разработанных simulink-моделей и графической надстройки BERTool пакета Matlab.

**Полученные результаты и новизна:** разработаны алгоритм и устройство формирования и обработки составных сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты на основе параллельного синтеза сетки рабочих частот и использованием фазовой манипуляции, повышающие помехоустойчивость систем не менее чем на 3 дБ по сравнению с существующими системам с частотной манипуляцией и позволяющие снизить аппаратные затраты в  $N$  раз, где  $N$  – количество рабочих частот.

**Степень использования:** результаты работы использованы в ОАО «АГАТ-СИСТЕМ – управляющая компания холдинга «Системы связи и управления» и в учебном процессе учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

**Область применения:** помехозащищенные системы радиосвязи.

## SUMMARY

**Skib Issa Ibragim**

### **Generation and processing of signals in channels with concentrated noise**

**Keywords:** immunity, pseudo restructuring operating frequency, the Walsh functions, parallel synthesis of frequencies.

**Aim of the work:** to improve the signal-code structures, devices, their formation and processing in data transmission systems, operating under the action of a noise.

**Research methods and equipment:** study of the statistical characteristics of the signals from the composite structure parallel to the base of orthogonal Walsh functions were performed using software developed in C#. Study of characteristics of noise communication systems under the action of a noise made by developed sim-link-models and graphics add-BERTool package Matlab.

**The results obtained and their novelty:** algorithm and device formation and processing of composite signals with pseudorandom tuning the operating frequency based on parallel synthesis net operating frequencies and the use of PSK, increasing immunity system by at least 3 dB compared to existing systems with FSK and allowing reduce hardware costs  $N$  times, where  $N$  – the number of frequency bands.

**Extent of usage:** results of the work are used in JSC "AGAT-SYSTEM - managing company "Communication and Control" and in the educational process of the educational establishment "Belarusian State University of Informatics and Radio Electronics".

**Field of application:** jam-resistant radio communication systems.



*Научное издание*

**Скиб Исса Ибрагим**

**ФОРМИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ  
РАДИОСВЯЗИ С ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ  
РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ**

Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

**Автореферат**

**диссертации на соискание ученой степени**

**кандидата технических наук**

---

Подписано в печать 20.02.2013.	Формат 60x84 <sup>1</sup> / <sub>16</sub> .	Бумага офсетная
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,3.	Тираж 60 экз.	Заказ 51.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009  
220013, Минск, П. Бровки, 6