

На правах рукописи

СИДОРКИНА ЮЛИЯ АНАТОЛЬЕВНА

**КОМПЛЕКСИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ АНАЛИЗА И
СИНТЕЗА СИСТЕМ СИНХРОНИЗАЦИИ ПРИЕМНИКОВ
ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ**

**05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации
(в технических системах)**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**



Москва – 2016

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана

Научный консультант: **Шахтарин Борис Ильич**, доктор технических наук, профессор кафедры автономных информационных и управляющих систем МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Официальные оппоненты: **Козлов Анатолий Иванович**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры Технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта МГТУ ГА;

Замуруев Сергей Николаевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой Радиолокации и радионавигации Московского технологического университета МИРЭА;

Антипов Владимир Никитович, доктор технических наук, профессор, главный специалист ПАО «Туполев».

Ведущая организация: **АО «Концерн «Созвездие»**, г. Воронеж, ул. Плехановская, д.14.

Защита состоится 19 апреля 2016 года в 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д212.141.02 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана» по адресу: 105005, Москва, Госпитальный пер., д. 10, ауд. 613м.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте www.bmstu.ru и в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан _____ 201_г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
к.т.н., доц.

И.В. Муратов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Большая часть существующих и перспективных систем передачи информации являются беспроводными. Это обусловлено рядом факторов, такими как простота развертывания, относительная дешевизна, способность обслуживать «мобильных» абонентов и т. д. В свою очередь, все больше и больше таких систем строятся на основе методики расширения спектра, которая позволяет избежать ряда проблем, характерных для беспроводных решений, а также отвечает современным требованиям по мощности передаваемого сигнала, помехоустойчивости системы и информационной безопасности. В основе таких систем лежат широкополосные (шумоподобные) сигналы (ШПС).

Системы с ШПС получили широкое распространение. Эти системы позволяют снизить плотность энергии, за счет чего на их основе построены системы спутниковой навигации (GPS) и связи. Высокая разрешающая способность ШПС по времени позволяет применять их в системах точной локации и позиционирования. Устойчивость этих систем к помехам и интерференции позволила применять их для построения современных сетей передачи информации, в том числе с множественным доступом (CDMA, WCDMA, Wi-Fi). Системы с расширенным спектром находят свое применение и в военных областях. Обладая собственными технологиями системы спутниковой навигации (СНС), государство может обезопасить себя в случае военных конфликтов от ограничения применения американской СНС Navstar GPS в зоне конфликта.

Точная и надежная синхронизация является краеугольным камнем работы всех систем с ШПС, а скорость решения этой задачи во многом определяет рабочие характеристики системы. Эффективность процессов синхронизации включает: помехоустойчивость систем синхронизации (СС), быстродействие процессов поиска и захвата; устойчивость процессов слежения; минимизация срывов. Повышение эффективности СС заключается в решении следующих актуальных задач.

Во-первых большой практический интерес последнее время вызывает поведение СС в условиях шумов и помеховых воздействий. К таким помехам можно отнести помехи соседних каналов в системах радиосвязи, помехи космическим навигационным системам GPS, BeiDou, Galileo и ГЛОНАСС, организованные помехи радиолокационным станциям. Учет комбинированного воздействия позволяет ответить на вопрос об эффективности функционирования СС в условиях сосредоточенной по частоте помехи, что становится крайне актуальным, например, в условиях непрерывно расширяющегося числа одновременно работающих радиосредств. При проектировании и создании СС, особое значение имеют проблемы оценки устойчивости при воздействии различного рода помех. При этом статистические моменты фазовой и частотной ошибок слежения не дают полной информации о поведении СС. В ряде случаев, поскольку СС – нелинейная система, необходимо знание ПРВ переменных состояния и срывов.

Основы теории исследования статистических характеристик СС с использованием их марковских моделей заложили Р.Л. Стратонович и В.И. Тихонов. Значительный вклад в теорию синхронизации при наличии шумов внесли Б.И. Шахтарин, В.Н. Кулешов, В.Н. Белых, В.В. Шахгильдян, В. Линдсей, А. Витерби и другие.

Исследованиям СС в условиях даже простейших узкополосных помех посвящено ограниченное число работ, среди которых следует отметить работы Б.И. Шахтарина и его учеников. Отсутствие эффективных методов исследования, а, следовательно, и методик расчета статистических характеристик, особенно в условиях сложных комбинированных воздействий, сдерживает их распространение на практике. С одной стороны, большая практическая потребность в высокоэффективных СС, с другой стороны, отсутствие достаточно полной информации о поведении таких систем в реальной помеховой обстановке, отсутствие информации об их потенциальных возможностях.

Во вторых отдельной задачей является разработка обобщённой много-

мерной модели СС по фазе. Эта система входит в частности в состав оптимальных когерентных демодуляторов ШПС. Практически нет методов, которые позволяли бы синтезировать обобщённые стохастические модели СС, которые учитывали бы все применяемые на практике типы фильтров: интегрирующий (ИФ), пропорционально-интегрирующий (ПИФ) и вырожденный пропорционально-интегрирующий (ВПИФ) и комбинированные помехи (узкополосные и шумовые).

В третьих, учитывая корреляционные свойства ШПС, можно сделать вывод о необходимости точной оценки времени задержки в приёмнике для сужения спектра и выделения информационной составляющей. Для синтеза оптимальных приемников и схем слежения за задержкой (ССЗ) необходимо развитие теории оптимальной нелинейной фильтрации, разработанной Стратоновичем.

В четвертых, современные цифровые процессоры позволяют синтезировать оптимальные приемники и обнаружители, что еще 10-15 лет назад было невозможно, так как созданию приемников, работающих в режиме реального времени препятствовала слабая производительность процессоров и микроконтроллеров, а также существенная стоимость процессоров с модулем для операций с числами с плавающей точкой. Современное развитие цифровых технологий делает возможным увеличение скорости операций при использовании параметрических методов оценки спектра взамен традиционного подхода, основанного на непараметрическом анализе.

В пятых основным критическим компонентом в приеме – передающих устройствах, обеспечивающим шаг, точность настройки и время перестройки по частоте, является синтезатор частот (СЧ). СЧ должны обеспечивать стабильность выходной частоты, быструю перестройку между каналами и минимальную шумовую выходную составляющую, плотность сетки передаваемых частот и минимальное время переключения между частотами. Требования по динамическим параметрам и чистоте спектра к СЧ, как правило, находятся в

противоречии, разрешение которого представляет трудность при создании СЧ.

Основные достижения в области синтеза частот в России представлены в работах В.А. Левина, В.Н. Малиновского, С.К. Романова, Л.А. Белова, Н.М. Тихомирова, Б.И. Шахтарина, А.В. Пестрякова и др. Научные школы Московского энергетического института и Воронежского концерна «Созвездие» добились значительных успехов в области синтеза стабильных частот. За рубежом синтезаторы частот исследовали Р.Е. Бест, В.Ф. Кроуп, Д.С. Кэнди, М.Х. Перрот и др. Несмотря на то, что СЧ посвящено достаточно много публикаций, ощущается настоятельная потребность в разработке методов построения и определения рациональных структур и параметров как самих СЧ, так и входящих в их состав узлов и блоков.

Наконец, в шестых, определенной проблемой в теории синхронизации ШПС, не решенной до сих пор, является применение хаотических сигналов в системах передачи информации.

Лидирующее положение в отечественной науке в области использования хаотических колебаний занимает, прежде всего, школа ИРЭ РАН (Залогин Н.Н., Кислов В.В., Дмитриев А.С., Панас А.И., Старков С.О.), также исследованием динамики хаотических систем занимались: Шахтарин Б.И., Анищенко В.С., Астахов В.В., Безручко Б.П., Шалфеев В.Д., Белых В.Н., Матросов В.В., Шильников Л.П., Кулешов В.Н., Капранов М.В., Удалов Н.Н., Томашевский А.И., Сизых В.В., Тратас Ю.Г., Голубев С.В. и др. За рубежом проблемами практического использования хаотических колебаний занимались: Л. Чуа (L.Chua), Л. Пекора (L.Pesoga) и Т. Кэрролл (T. Carrol), М. Хаслер (M. Hasler), Т. Эндо (T. Endo), М. Кеннеди (M.P. Kennedy), Г. Колумбан (G.Kolumban), А. Оппенгейм (A.Oppenheim), Г. Чен (G.Chen).

Трудами перечисленных ученых была теоретически обоснована и экспериментально подтверждена принципиальная возможность использования хаотических колебаний в объединенных нелинейных динамических системах (системах обработки информации), состоящих из управляющей (задающей или

ведущей) системы и управляемой (исполнительной или ведомой) системы. Тем не менее, остаются не решенными некоторые задачи построения моделей на основе хаоса.

В частности, нет ясности в вопросе о том, какие индикаторы синхронизации наиболее адекватно описывают качество работы взаимодействующих нелинейных динамических систем, какой способ синхронизации менее чувствителен к воздействию различных видов шумов.

Что касается новых приложений, в частности для хаотических систем связи, то здесь наибольший интерес представляет исследование влияния канала, в том числе учет эффекта Доплера, на количественные показатели качества связи. Практически отсутствуют работы, в которых бы исследовались отмеченные вопросы.

Таким образом, диссертация Сидоркиной Ю.А. посвящена решению актуальной научной проблемы – разработке новых методов и алгоритмов анализа и синтеза систем синхронизации (СС), использующих широкополосные (шумоподобные) сигналы (ШПС), функционирующих в условиях воздействия шумов и сложной помеховой обстановки.

Объектом исследования в диссертационной работе являются СС приемников фазоманипулированных (ФМ) ШПС и элементы ее структуры: системы поиска и синхронизации псевдослучайных последовательностей (ПСП), системы фазовой и тактовой синхронизации, широкополосные синтезаторы частот (ШП СЧ).

Предметом исследования в диссертационной работе являются процессы синхронизации в широкополосных системах, в том числе и на хаотической несущей, эффективность которых во многом определяет рабочие характеристики приемников ШПС.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности процессов синхронизации ШПС путем разработки новых комплексированных методов и алгоритмов анализа и синтеза систем синхронизации и элементов их структуры, функционирующих в условиях воздействия шумов и сложной по-

меховой обстановки.

Достижение поставленной цели обеспечивается решением следующих основных **задач**, составляющих суть исследований:

1. Разработка комплексированного метода синтеза обобщенной многомерной стохастической модели системы синхронизации, обеспечивающего повышение эффективности её функционирования при комбинированном воздействии шумовых и организованных помех.

2. Разработка комплексированного метода анализа СС при воздействии узкополосных помех, позволяющих осуществлять оценку ее эффективности по критерию срыва синхронизации, условий захвата за сигнал и за узкополосную помеху и помехоустойчивости.

3. Разработка комплексированного метода анализа стохастических СС при воздействии комбинированных помех (узкополосных и шумовых) позволяющих осуществлять оценку ее эффективности по критериям устойчивости процессов синхронизации, минимизации срывов и помехоустойчивости.

4. Разработка комплексированного метода структурно-параметрического синтеза оптимальных приемников ШПС, позволяющего разрабатывать элементы структуры и осуществлять расчет параметров схем поиска и синхронизации ПСП, фазовой синхронизации, слежения за задержкой.

5. Разработка быстродействующих алгоритмов синтеза частот и методики рационального выбора структуры и параметров ШП СЧ.

6. Разработка комплексированного алгоритма поиска и синхронизации ПСП в ШПС с кодовым разделением, обеспечивающего повышение эффективности в части быстродействия процессов поиска и захвата.

7. Разработка нового алгоритма анализа синхронизации хаотических систем с использованием вейвлет – преобразований.

8. Разработка комплексированного алгоритма синхронизации шумоподобного сигнала с хаотически меняющейся символьной частотой, обеспечивающего повышение эффективности процессов синхронизации хаотических систем в части помехозащищенности и быстродействия.

Методологической основой проводимых исследований служат: теория марковских случайных процессов и цепей; общие положения методов теории систем автоматического управления; теория оптимальной нелинейной фильтрации Стратоновича и Калмана, теория нелинейных динамических систем, теории колебаний, теория вейвлет-преобразований.

Разработанные методы и алгоритмы анализа характеристик СС с ШПС написаны в программе MATLAB и ориентированы на использование персональных компьютеров.

Научная новизна полученных в диссертационной работе результатов состоит в следующем:

1. Комплексирование методов теории дифференциальных уравнений (ДУ) и метода марковских случайных процессов (МСП) Стратоновича в задачах создания обобщённой многомерной стохастической модели СС, находящейся под воздействием узкополосных и широкополосных помех.

2. Комплексирование методов гармонического баланса и метода фазовой плоскости в задачах анализа динамики статистической СС при воздействии узкополосных помех.

3. Комплексирование методов гармонического баланса, усреднения и численных методов в задачах анализа стохастических СС при воздействии комбинированных помех.

4. Комплексирование метода оптимальной нелинейной фильтрации Стратоновича и численных методов в задаче синтеза перспективных структурных схем и расчета параметров оптимальных приемников ШПС и его элементов.

5. Развита теория непрерывного вейвлет-преобразования в задачах оценки фазовой хаотической синхронизации.

6. Развита теория нелинейной фильтрации в использовании аппарата оптимальной расширенной фильтрации Калмана для решения задач синхронизации и обработки информации в хаотических системах с учетом возмущающих воздействий.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

- Созданная обобщённая многомерная стохастическая модель СС, полученные статистические характеристики, такие как ПРВ ошибки, среднее время до срыва слежения и др., созданные имитационные модели, предложенные обоснованные и реализованные алгоритмы и программы являются эффективным современным средством оценки статистических и динамических характеристик широкого класса систем синхронизации с ШПС при самых общих условиях их работы. Что позволяет заменить сложные и дорогостоящие натурные измерения более дешевыми и функционально более гибкими средствами математического моделирования современных САПР.

- Разработанный комплексированный алгоритм поиска и синхронизации информационных параметров CDMA-сигнала позволяет существенно снизить влияние окрашенного шума на точность оценки частоты и вычислительные затраты, что позволяет использовать данный усовершенствованный алгоритм в приёмниках реального времени ШПС. Созданный программно – аппаратный стенд для экспериментального исследования систем цифровой связи с использованием технологии кодового разделения позволяет подтвердить практическую реализуемость разработанного алгоритма.

- Разработан ряд имитационных моделей СЧ-ИФАП, что позволило рационализировать структуру и рассчитать параметры СЧ с учетом оптимизации малого шага перестройки по частоте при высокой спектральной чистоте генерируемого сигнала. На основании анализа имитационных моделей разработаны опытные и серийные образцы ШП СЧ.

- Предложенные и развитые в диссертации методики и разрабатываемые на их основе алгоритмы, программы, имитационные и полунатурные модели могут быть использованы в научно – исследовательских и опытно – конструкторских работах. Они позволяют проводить анализ статистических свойств СС, оптимизировать параметры СС в целом и ее элементов, тем самым повысить ее эффективность по критериям: помехоустойчивости, быстродействию процессов поиска и захвата, устойчивости процессов слежения, минимизации вероят-

ности срывов синхронизации.

Апробация работы. Основные результаты, полученные в диссертации, докладывались на 8-ми научно-технических конференциях и семинарах, в том числе: на VI, VIII, IX Всероссийских научно-технических конференциях Радиолокация и радиосвязь (Москва, 2012, 2014, 2015 гг.); Международных научно-технических конференциях «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях» «СИНХРОИНФО» (г. Ярославль 2013 г., г. Санкт-Петербург 2015 г.); 58-й и 65-й научных сессиях, посвященных Дню радио РНТОРЭС им. А.С. Попова (Москва 2003, 2010 гг.); Научно-технической конференции школы-семинара Радиофизика и электроника на пороге 21-го века (Ярославль 2001 г.).

Внедрение результатов работы:

1. Практическая ценность результатов подтверждается актами реализации: ОАО «Нижегородское авиационное общество», АО ФНПЦ «Нижегородский научно – исследовательский институт радиотехники», АО «Российская корпорация ракетно – космического приборостроения и информационных систем», ФГУП «Центральный научно – исследовательский радиотехнический институт им. академика А.И. Берга».

2. Результаты диссертации реализованы при создании новых опытно – конструкторских ШП СЧ 9 кГц – 20 ГГц и серийных образцов ШП СЧ М51155-1. Серийные образцы ШП СЧ М51155-1 приняты на снабжение в качестве КИМП для ВС РФ. Подтверждено актом о внедрении в НИОКР ООО «Ника «СВЧ».

3. Результаты диссертации использованы в проектно – конструкторской деятельности разрабатывающих подразделений АО «Концерн «Созвездие» при разработке перспективной техники радиосвязи, что подтверждено актом о внедрении.

4. Результаты диссертации использованы в НИР: «Фундаментальные проблемы создания АУИС», шифр «КЕДР-5», ГРН№: 01200964825. (отчеты по НИР за 2011, 2012, 2013, 2014 гг.); «Помехоустойчивость и синхронизация си-

стем передачи информации» МГТУ им. Н.Э. Баумана № ГР 01 201262971.

На защиту выносятся следующие результаты и положения:

1. Комплексированный метод синтеза обобщенной многомерной стохастической модели СС при воздействии комбинированных помех на основе комбинации методов теории дифференциальных уравнений (ДУ) и метода марковских случайных процессов (МСП).

2. Комплексированный метод анализа стохастических СС при воздействии узкополосных помех на основе комбинации метода гармонического баланса и метода фазовой плоскости.

3. Комплексированный метод анализа стохастических СС при воздействии комбинированных помех на основе комбинации методов гармонического баланса, усреднения и численных методов для решения уравнения ФПК и Понтрягина.

4. Комплексированный метод структурно – параметрического синтеза оптимальных приемников ШПС на основе комбинации метода синтеза оптимального нелинейного фильтра Стратоновича в задаче вектора оценок «фазовременная задержка» и численных методов для анализа синтезированных комплексированных схем фазовой и тактовой синхронизации ШПС.

5. Структурные схемы синтезированных оптимальных приемников фазоманипулированных ШПС сигналов.

6. Комплексированный алгоритм оценки поиска и синхронизации ШПС на фоне интерференционной помехи и шума на основе алгоритмов: Delay and Multiply Approach, усовершенствованного итеративного алгоритма вычисления оценки АКФ и АР-модели принимаемого сигнала.

7. Комплексированный быстродействующий алгоритм работы широкополосного синтезатора частот ШП СЧ, совмещающего алгоритмы косвенного частотного синтеза и элементы алгоритмов прямого синтеза.

8. Методика рационального выбора структуры и параметров ШП СЧ.

9. Алгоритм оценки фазовой хаотической синхронизации на основе непрерывного вейвлет-преобразования, позволяющий определить фазу, в том

числе и для зашумленных хаотических сигналов.

10. Комплексированный алгоритм синхронизации шумоподобного сигнала с хаотически меняющейся символьной частотой на основе алгоритмов оценки фазы и частоты хаотического сигнала с помощью вейвлет-анализа, алгоритма когерентной обработки и алгоритма хаотической синхронизации на основе оптимальной нелинейной фильтрации Калмана.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты, полученные в диссертации, опубликованы в: 1-й монографии; 5-и учебниках и учебных пособиях; 24-х статьях, в том числе в 20 статьях в рецензируемых журналах и изданиях из Перечня ВАК РФ; в 10 научно-технических отчетах; 1-м патенте; докладывались на 8-и научно-технических конференциях и семинарах. Общий объем 100,78 п.л.

В качестве исполнителя автор принимал личное участие в выполнении более чем 10 НИР и ОКР, в том числе: опытно-конструкторского образца ШП СЧ 9 кГц – 20 ГГц.

Объем и структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, восьми глав, заключения, списка использованной литературы и Приложения. Общий объем составляет 321 страниц, включающих 43 страниц Приложения, 170 рисунков, 7 таблиц и список литературы из 162 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований, изложены научная новизна, практическая значимость, положения, выносимые на защиту. Рассмотрены проблемы синхронизации широкополосных сигналов, организации системы связи на базе хаотических сигналов, проведен критический обзор публикаций по теме диссертации.

В первой главе решается задача синтеза многомерной СС, находящейся под воздействием помех (узкополосной помехи и белого шума), с учетом многомерного фильтра, комбинацией методов теории дифференциальных уравне-

ний (ДУ) метода марковских случайных процессов (МСП).

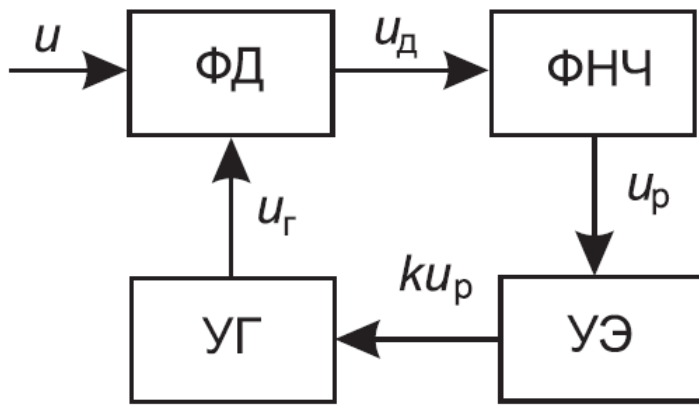


Рис.1.

Структурная схема СС: ФД - фазовый детектор; ФНЧ - фильтр нижних частот; УЭ - управляющий элемент; УГ - управляемый генератор

Объектом исследования является система синхронизации, структурная схема которой изображена на Рис. 1. На вход СС поступает смесь полезного сигнала $s_c(\tilde{t})$, детерминированной помехи $s_{\Pi}(\tilde{t})$, представляющей аддитивную смесь узкополосных сигналов, и шума $n(\tilde{t})$.

Шум $n(\tilde{t})$ содержит как узкополосную $n_y(\tilde{t})$, так и широкополосную $n_{\Pi}(\tilde{t})$ составляющие. В этом случае

$$s_c(\tilde{t}) = \sqrt{2}A \sin(\omega_0 \tilde{t} + \theta_c(\tilde{t})); \quad s_{\Pi}(\tilde{t}) = \sqrt{2} \sum_{i=1}^N A_{\Pi i} \sin(\omega_0 \tilde{t} + \theta_{\Pi i}(\tilde{t}));$$

$$s(\tilde{t}) = s_c(\tilde{t}) + s_{\Pi}(\tilde{t});$$

$$n_y(\tilde{t}) = \sqrt{2}n_{yc}(\tilde{t}) \cos \omega_0 \tilde{t} - \sqrt{2}n_{ys}(\tilde{t}) \sin \omega_0 \tilde{t};$$

$$n_{\Pi}(\tilde{t}) = \sqrt{2}n_{\Pi c}(\tilde{t}) \cos \omega_0 \tilde{t} - \sqrt{2}n_{\Pi s}(\tilde{t}) \sin \omega_0 \tilde{t}; \quad n(\tilde{t}) = n_y(\tilde{t}) + n_{\Pi}(\tilde{t}),$$

где $A, A_{\Pi i}$ - среднеквадратические значения полезного сигнала и узкополосной помехи; ω_0 - несущая частота; $\theta_c(\tilde{t}), \theta_{\Pi i}(\tilde{t})$ - соответственно законы изменения фаз полезного сигнала и i -ой узкополосной составляющей помехи; $n_{yc}(\tilde{t}), n_{ys}(\tilde{t})$ - квадратурные составляющие узкополосной помехи; $n_{\Pi c}(\tilde{t}), n_{\Pi s}(\tilde{t})$ - квадратурные составляющие широкополосной помехи; N - число узкополосных составляющих в детерминированной помехе. $A_{\Pi i} = \varepsilon_i A$, где ε_i - некоторая постоянная величина. Случайные процессы $n_{yc}(\tilde{t}), n_{ys}(\tilde{t})$ и

$n_{\text{шс}}(\tilde{t}), n_{\text{шс}}(\tilde{t})$ - независимые, гауссовские.

Сигнал на входе СС имеет вид $u(\tilde{t}) = s(\tilde{t}) + n(\tilde{t})$.

Напряжение на выходе управляемого генератора $u_{\Gamma} = \sqrt{2}A_{\Gamma} \cos(\omega_0 \tilde{t} + \theta(\tilde{t}))$, где A_{Γ} - среднеквадратическое значение напряжения на выходе управляемого генератора; $\theta(\tilde{t})$ - закон изменения фазы этого напряжения; $\frac{d\theta}{d\tilde{t}} = k u_p(\tilde{t})$, где $u_p(\tilde{t})$ - управляющее напряжение; k - постоянный коэффициент.

Вводя $\varepsilon_i = A_{\text{ш}}/A$; $n_c(\tilde{t}) = n_{yc}(\tilde{t}) + n_{\text{шс}}(\tilde{t})$; $n_s(\tilde{t}) = n_{ys}(\tilde{t}) + n_{\text{шс}}(\tilde{t})$ и, учитывая, что ФНЧ подавляет гармоники частоты $2\omega_0$; σ - оператор дифференцирования по переменной $\tilde{t}$; $K(s)$ - передаточная функция фильтра нижних частот; s - переменная преобразования Лапласа; а также обозначая $n_0(\tilde{t}) = n_c(\tilde{t}) \cos \theta(\tilde{t}) + n_s(\tilde{t}) \sin \theta(\tilde{t})$; фазовую ошибку $x(\tilde{t}) = \theta_c(\tilde{t}) - \theta(\tilde{t})$;

$$h_{\Pi}(x, \tilde{t}) = \sin x(\tilde{t}) + \sum_{i=1}^N \varepsilon_i \sin[x(\tilde{t}) + \theta_{\text{ш}}(\tilde{t}) - \theta_c(\tilde{t})], \quad \Omega(\tilde{t}) = k k_{\text{д}} A_{\Gamma} A(\tilde{t}); \quad \text{в случае}$$

дробно - рациональной функции $K(\sigma) = Q(\sigma)/R(\sigma)$, где $Q(\sigma) = A_0 \sigma^m + A_1 \sigma^{m-1} + \dots + A_m$, $m \leq n-1$, обозначая $R(\sigma) = B_0 \sigma^{n-1} + B_1 \sigma^{n-2} + \dots + B_{n-1}$, $h_0(x, \tilde{t}) = \Omega(\tilde{t}) [h_{\Pi}(x, \tilde{t}) + n_0(\tilde{t})/A(\tilde{t})]$ получим ДУ СС в операторном виде

$$\sigma R(\sigma) x = \sigma R(\sigma) \theta_c - Q(\sigma) h_0(x, \tilde{t}). \quad (1)$$

Для перехода из операторной формы ДУ (1) к нормальной, с использованием методов теории ДУ, в главе 1 доказаны 2 теоремы:

Теорема 1: Если $\theta_c(\tilde{t})$ непрерывна со своими производными до порядка n , ДУ (1) может быть представлено в нормальной форме

$$\frac{d\mathbf{X}}{d\tilde{t}} = \mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{C}h_0(x, \tilde{t}) + \mathbf{U} \sum_{i=0}^{n-1} B_i \theta_c^{(n-i)}(\tilde{t}) = 0, \quad (2)$$

где $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$, $x(\tilde{t}) = x_n(\tilde{t})$,

$$\mathbf{C} = [C_1, C_2, \dots, C_n]^T, C_j = B_0^{-1}(A_{n-j} - \sum_{k=1}^{n-j} B_k C_{j+k}), C_n = A_0 / B_0, \mathbf{U} = [1, 0, \dots, 0]^T,$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -B_0^{-1}B_1 & -B_0^{-1}B_2 & -B_0^{-1}B_3 & \dots & -B_0^{-1}B_{n-1} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Теорема 2: Если $A_{n-1} \neq 0$ и $\theta_c = \Delta\omega\tilde{t} + \varphi_c(\tilde{t})$, где φ_c - некоторая функция времени, $\Delta\omega = \text{const}$ может быть представлено в нормальной форме

$$\frac{d\mathbf{X}}{d\tilde{t}} = \mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{C}h_1(x_n, \tilde{t}) + \mathbf{V}\frac{d\varphi_c}{d\tilde{t}}, \quad (3)$$

где $h_1(x, \tilde{t}) = h_0(x, \tilde{t}) - (B_{n-1}/A_{n-1})\Delta\omega$, $\mathbf{V} = [0, 0, \dots, 0, 1]^T$.

Если узкополосная составляющая шума отсутствует, а квадратурные составляющие $n_c(\tilde{t})$ и $n_s(\tilde{t})$ представляют собой нормальные независимые белые шумы с двусторонней спектральной плотностью мощности $N_0/2$, то ДУ (2) и (3) рассматриваются как стохастические ДУ в форме Стратоновича:

$$\begin{aligned} \text{- ДУ (2): } d_{1/2}\mathbf{X} = & \left[\mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{C}\Omega(\tilde{t})g[x_n, \theta_c, \theta_n] + \mathbf{U} \sum_{i=0}^{n-1} B_i \theta_c^{(n-i)}(\tilde{t}) \right] d\tilde{t} - \\ & - \sqrt{\frac{N_0}{2}} \frac{\Omega(\tilde{t})}{A(\tilde{t})} \mathbf{C} \left[\cos(\theta_c - x_n) d_{1/2}w_{1\tilde{t}} - \right. \\ & \left. - \sin(\theta_c - x_n) d_{1/2}w_{2\tilde{t}} \right], \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{- ДУ (3): } d_{1/2}\mathbf{X} = & \left[\mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{C}(\Omega(\tilde{t})g[x_n, \theta_c, \theta_n] + \Delta\omega B_{n-1}/A_{n-1}) + \mathbf{V}\frac{d\varphi_c}{d\tilde{t}} \right] d\tilde{t} - \\ & - \sqrt{\frac{N_0}{2}} \frac{\Omega(\tilde{t})}{A(\tilde{t})} \mathbf{C} \left[\cos(\theta_c - x_n) d_{1/2}w_{1\tilde{t}} - \right. \\ & \left. - \sin(\theta_c - x_n) d_{1/2}w_{2\tilde{t}} \right], \end{aligned} \quad (5)$$

где $w_{1\tilde{t}}$ и $w_{2\tilde{t}}$ - независимые стандартные винеровские процессы;

$$g[x_n, \theta_c, \theta_\Pi] = \sin x_n + \sum_{i=1}^N \varepsilon_i \sin[x_n + \theta_{\Pi i}(\tilde{t}) - \theta_c(\tilde{t})] \quad \theta_\Pi = [\theta_{\Pi 1}, \theta_{\Pi 2}, \dots, \theta_{\Pi N}]^T.$$

Путем вычисления локальных сносов и дисперсий, доказано, что ДУ (4) и (5) - МСП. Поэтому путем использования методов теории МСП (4) и (5) преобразованы к виду:

- уравнение (4):

$$d\mathbf{X} = \left[\mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{C}\Omega(\tilde{t})g[x_n, \theta_c, \theta_\Pi] + \mathbf{U} \sum_{i=0}^n B_i \theta_c^{(n-i)}(\tilde{t}) \right] d\tilde{t} + \sqrt{\frac{N_0}{2}} \frac{\Omega(\tilde{t})}{A(\tilde{t})} \mathbf{C} d\omega_t; \quad (6)$$

- уравнение (5):

$$d\mathbf{X} = \left[\mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{C}(\Omega(\tilde{t})g[x_n, \theta_c, \theta_\Pi] - \Delta\omega^*) + \mathbf{V} \frac{d\phi_c}{d\tilde{t}} \right] d\tilde{t} + \sqrt{\frac{N_0}{2}} \frac{\Omega(\tilde{t})}{A(\tilde{t})} \mathbf{C} d\omega_t, \quad (7)$$

где $\Delta\omega^* = \Delta\omega B_{n-1} / A_{n-1}$.

На основании полученных ДУ (6) и (7) составлены частные случаи моделей систем фазовой синхронизации 2-го и 3-го порядков для невырожденного пропорционально – интегрирующего фильтра (ПИФ), вырожденного ПИФ, двумя последовательно соединенными ПИФ. Таким образом, синтезированная многомерная стохастическая модель учитывает почти все многообразие видов и типов фильтров, используемых на практике.

Вторая глава посвящена разработке комплексированного метода анализа динамики стохастических систем фазовой синхронизации при воздействии узкополосных помех. Комплексирование заключается в совокупном использовании метода гармонического баланса и метода фазового пространства (плоскости).

Методом гармонического баланса находятся значения параметров предполагаемого решения исходного ДУ (1), с целью их использования при анализе

стохастической СС. Методом фазовой плоскости находятся критические значения частотных расстроек (сигнальной и помеховой). Доказана новая система уравнений для параметров предполагаемого решения $x(t) = x_0 + x_1 \cos(\Delta\beta t + \Delta\theta + \psi)$ ($\Delta\beta$ – расстройка по частоте второго рода, ψ – фазовый угол первой гармоники) исходного ДУ с учетом отношения сигнал/шум (ОСШ) r и отношения помеха/сигнал (ОПС) ε . Получены соотношения для критических значений этих параметров.

Зависимость критического значения $\varepsilon_k^2 = f(\Delta\beta)$ при $a = 0,8$ и $\alpha_0^{-2} = 6,25$ изображена на Рис.2, где кривая 1 получена для СС 1-го порядка и $\beta = 0$; кривая 2 при невырожденном и вырожденном ПИФ и $\beta = 0$; 3 – СС 1-го порядка $\beta = 0,8$; 4 – невырожденный и вырожденный ПИФ и $\beta = 0,8$; (β – расстройка по частоте первого рода).

Зависимости $\psi = f(\Delta\beta)$ изображены на Рис. 3, при $\varepsilon = 0,6$, $a = 0,8$ и $\alpha_0^{-2} = 6,25$, где кривые 1, 3, 5 получены при невырожденном фильтре; 2, 4, 6 – при вырожденном. Кривые 1, 2 получены при $\beta = 0,8$; 3, 4 – $\beta = 0,5$; 5, 6 – $\beta = 0,2$.

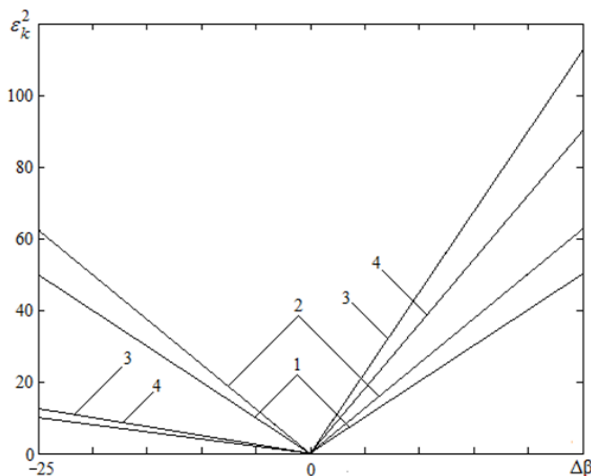


Рис.2.

Зависимость критического значения от расстройки второго рода

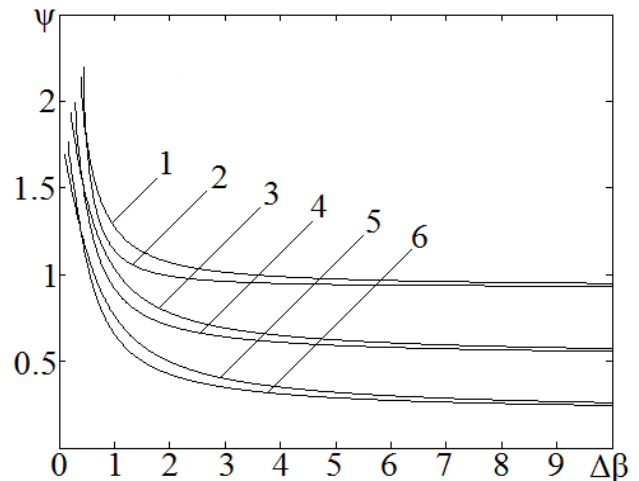


Рис.3.

Зависимость фазового угла от расстройки второго рода

Методом фазового пространства (плоскости) получены неравенства для определения условий захвата за сигнал и за помеху, зависящие от значений

ОПС, сигнальной расстройке по частоте первого рода, отстройке по частоте второго рода. Проведено моделирование режимов захвата за сигнал и за помеху.

Проводился анализ влияния полосы пропускания ПИФ на ход захвата сигнала или помехи, который показал, что уменьшение полосы пропускания (увеличение постоянной времени фильтра) повышает помехоустойчивость системы. В тоже время, при малых $\Delta\beta$ незначительное превышение амплитуды помехи над амплитудой сигнала приводит к захвату за помеху.

Третья глава посвящена разработке комплексированного метода анализа стохастических СС при воздействии комбинированных помех (узкополосных и широкополосных шумовых).

Для применения методов теории МСП к анализу статистических характеристик СС была разработана процедура усреднения коэффициентов исходного стохастического дифференциального уравнения (СДУ) СС по периоду биений и переходу к уравнению Фоккера – Планка - Колмогорова (ФПК) и Понтрягина для СС произвольного порядка.

Для СС первого порядка приводится общее решение уравнения ФПК в интегральной форме и на его основе осуществлен переход к решению в форме ряда Фурье, причем коэффициенты ряда выражаются через Бесселевы функции. Проведена оценка сходимости ряда и разработан алгоритм оценки.

Для решения уравнений ФПК и Понтрягина были разработаны разностные схемы как альтернатива численных методов. На основе разработанной разностной схемы уравнения ФПК находится его решение (плотность распределения вероятностей (ПРВ) сигнала рассогласования) в переходном режиме с доказательством сходимости к стационарной ПРВ согласно структурной схеме предложенного автором алгоритма оценки. Найдено решение уравнения ФПК для СС второго порядка. На основе разностной схемы уравнения Понтрягина получена вероятность до срыва слежения.

В результате получены многочисленные статистические характеристики

СС и их зависимость от параметров системы и ОСШ и ОПС при воздействии на СС узкополосной помехи и широкополосного шума.

На Рис. 4 приведены зависимости среднего времени до срыва слежения (ВСС) и на Рис. 5 приведены средние значения частотного рассогласования (ЗЧР), при $\varepsilon = 0,9$; $\Delta\beta = 4$; $a = 0,025$; $\alpha_0^{-2} = 1600$. Кривые 1, 3, 5 – рассчитаны по методу Шахтарина Б.И. и кривые 2, 4, 6 – по методу, предложенному автором. Кривые 1, 2 получены при $\beta = 0,3$, кривые 3, 4 – при $\beta = 0,6$, кривые 5, 6 – при $\beta = 0,9$.

Показано, что дисперсия сигнала рассогласования увеличивается, если частотные рассогласования и первого и второго рода направлены в разные стороны, в противном случае дисперсия уменьшается.

Использование предложенных разностных схем для уравнения ФПК, позволяет при малых затратах машинного времени с использованием ПЭВМ достаточно быстро вычислить статистические характеристики систем синхронизации.

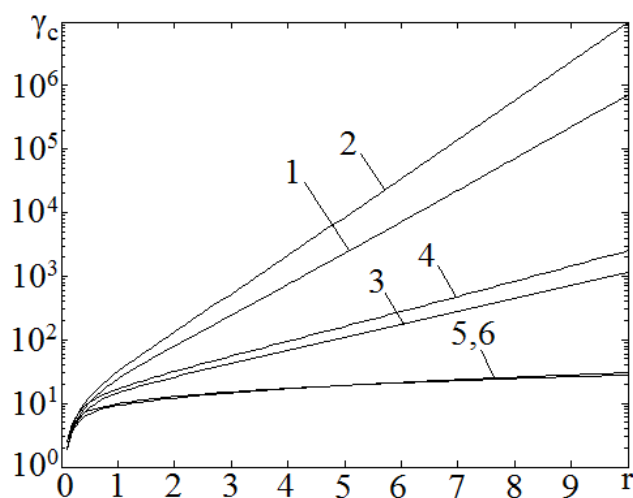


Рис. 4.

Среднее время до срыва слежения

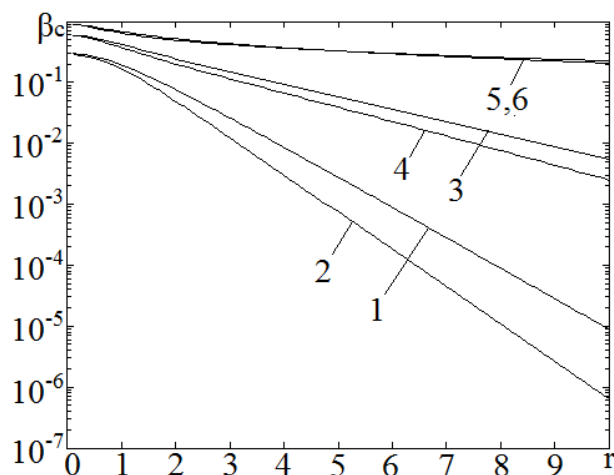


Рис. 5.

Среднее значение
частотного рассогласования

В четвертой главе путем комплексирования методов оптимальной фильтрации Стратоновича и численных методов проводился структурный синтез приемников широкополосных сигналов.

Сначала проводился синтез схемы слежения за задержкой (ССЗ) в пред-

положении, что средняя скорость изменения задержки псевдослучайной последовательности (ПСП) равна нулю $\bar{\tau}_0 = 0$. В результате на основании полученного уравнения фильтрации была получена функциональная схема ССЗ. Затем была синтезирована оптимальная структура ССЗ с флуктуирующей скоростью изменения задержки. В этом случае уравнения фильтрации находились относительно оценок задержки и скорости ее изменения. Далее в главе синтезирована структура оптимального приемника фазоманипулированных сигналов (2-ФМ), путем адаптации метода оптимальной нелинейной фильтрации Стратоновича в задаче оценки вектора «фаза-временная задержка», исходя из условий обеспечения первоначального захвата.

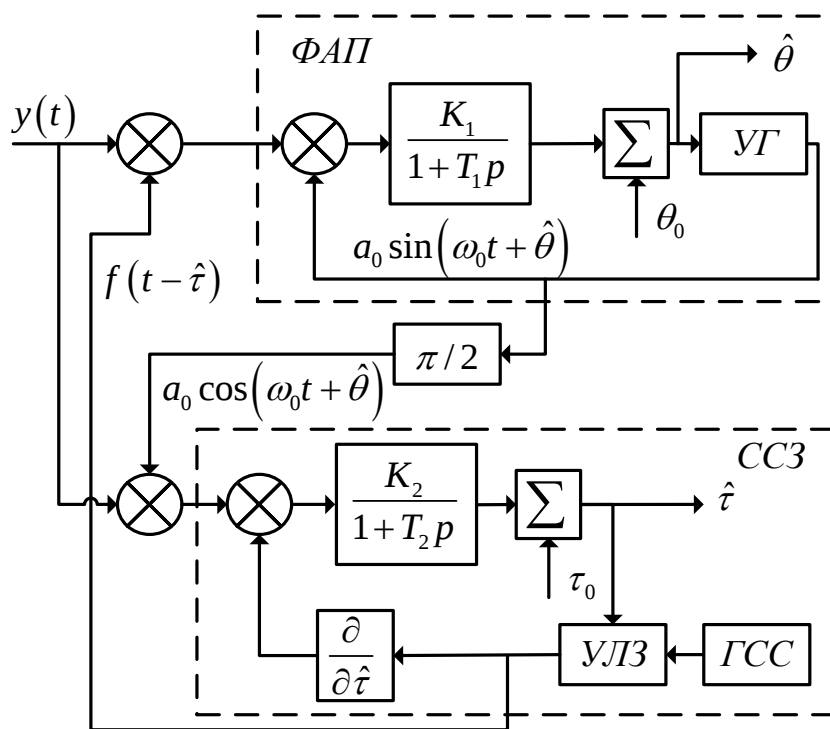


Рис. 6.
Структурная схема комбинированной схемы:
ФАП и ССЗ

$f(t - \hat{\tau})$, ГСС – генератор сигнала синхронизации.

На основании синтезированных оптимальных структур, автором разработан ряд имитационных моделей:

1. Комбинированной СС по фазе (ССФ) и задержке (ССЗ), позволяющей

В результате получена структурная схема оптимального приемника, приведенная на Рис. 6. На Рис. 6: ФАП – фазовая автоподстройка, УГ – управляемый генератор, УЛЗ – управляемая линия задержки, звено $\partial / \partial \hat{\tau}$ осуществляет операцию взятия производной опорной последовательности

анализировать следующие параметры:

- влияние ОСШ в канале приема на точность синхронизации;
- влияние ошибок синхронизации по фазе на корректность работы системы синхронизации по задержке и наоборот.

Было установлено, что в ССФ в зависимости от ширины полосы фильтра длительность переходного процесса составляет от 5 до 9 периодов несущего колебания. В системе синхронизации по задержке (ССЗ) длительность переходного процесса может составлять: 5...6 периодов кодовой последовательности, когда ошибка слежения в ССФ равна нулю; до 20 и более периодов, когда присутствует ошибки синхронизации по фазе. При этом ошибки в ССЗ практически не влияют на длительность переходного процесса в ССФ.

2. Гибридной схемы фазовой и тактовой синхронизации приемников GPS сигнала в среде System Viu, позволяющей анализировать следующие параметры:

- влияние ОСШ в канале приема на точность синхронизации для различных типов дискриминаторов;
- влияние ОСШ в канале приема на время переходных процессов для различных дискриминационных характеристик (ДХ).

В **пятой главе** ставится и решается задача синтеза и верификации алгоритма поиска и синхронизации ШПС с кодовым разделением на фоне аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ) и межканальной интерференции (МКИ). В работе предлагается комплексировать алгоритм Delay and Multiply Approach (DMA), который позволяет осуществить поиск и синхронизацию блока псевдослучайной последовательности (ПСП), не прибегая к перебору по частоте, усовершенствованный итеративный алгоритм уточнения автокорреляционной функции (АКФ) гармонического сигнала и подход для оценки частоты ПСП-модулированного сигнала при помощи авторегрессионной (АР)-модели. Схематично алгоритм изображен на Рис. 7.

Имитационное моделирование показало, что предлагаемый подход обла-

дает существенно лучшими характеристиками с точки зрения вычислительных затрат (в 3 раза меньше операций умножения) в сравнении с параллельным коррелятором.

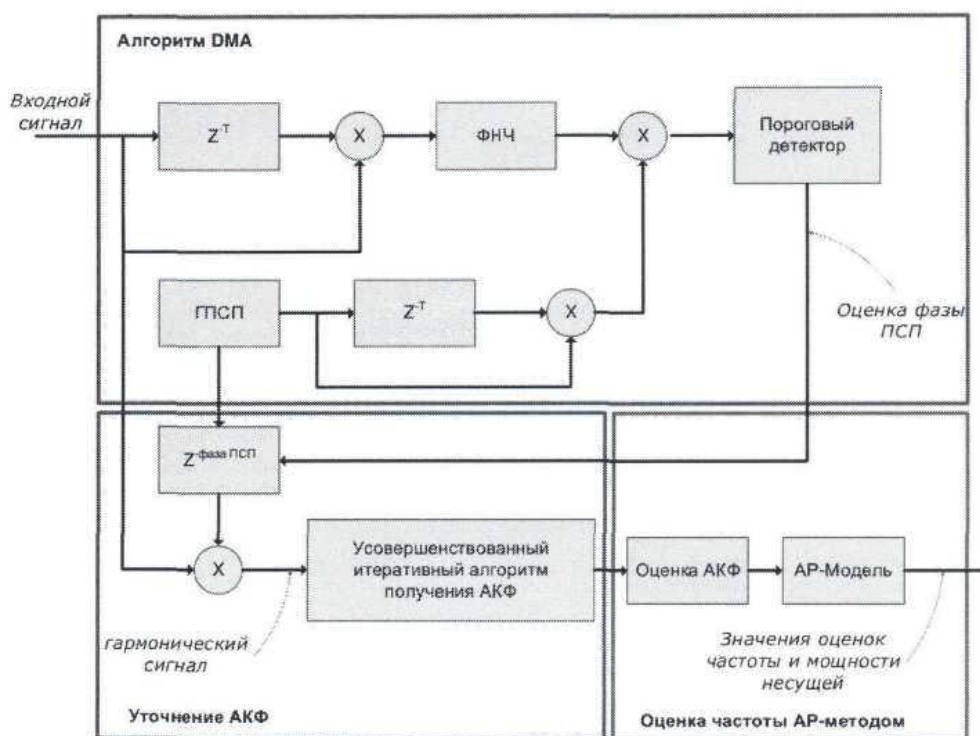


Рис. 7.
Алгоритм поиска и синхронизации ШПС в условиях
интерференции (DMA + уточненный АР)

Для проверки рабочих характеристик предложенного комплексированного алгоритма поиска и синхронизации ПСП фоне АБГШ и МКИ проводился полунатурный эксперимент. Эксперимент проводился на оригинальной, разработанной автором, программно-аппаратной платформе. В качестве микросхемы блока захвата ПСП в оригинальной аппаратной платформе использовался чип от компании Maxim Semiconductor - MAX2769. Программная часть была реализована в математическом пакете MATLAB. Длина записи, получаемой с данной платформы для постобработки, составляет 32 мс. Так же в данной главе приводятся результаты полунатурного моделирования на реальных данных системы Navstar GPS, полученных из внешних источников. Длина записи данных позволяет, как осуществить поиск ПСП сигнала, так и запустить модуль ФАП

для проверки вхождения в синхронизм.

Результаты исследований с использованием имитационного моделирования в математическом пакете MATLAB, а также полунатурного моделирования на разработанной программно-аппаратной платформе и сигнале, полученном из внешних источников, согласуются, и подтверждают возможность использования разработанного комплексированного алгоритма в системе Navstar GPS с уровнем ОСШ порядка -27 дБ. Предложенный комплексированный алгоритм позволяет добиться наилучших результатов при типовых значениях доплеровского смещения и типовых сценариях распространения сигнала в наземных пользовательских приемниках.

Точность оценки, полученная на выходе предлагаемого комплексированного алгоритма, позволяет без дополнительной стадии оценки частоты запустить модуль ФАП.

Шестая глава посвящена разработке быстродействующего алгоритма работы ШП СЧ, совмещающего алгоритмы косвенного частотного синтеза и элементы прямого синтеза.

Предложена разработанная автором методика обоснования выбора рациональных структур и параметров широкополосных синтезаторов частот с ИФАП. Рациональная структура СЧ-ИФАП должна включать в себя: фильтр нижних частот второго порядка в кольце ФАП (для уменьшения эффекта дрожания), ДПКД (для упрощения схемной реализации и возможности создания сетки частот), СДМ (для управления ДПКД и улучшения массо-габаритных характеристик СЧ), ИЧФД (детектор с токовой подкачкой, для сокращения времени переходных процессов).

Выбраны рациональные параметры СЧ-ИФАП, оптимизация которых проводилась по критериям: минимизации времени переходных процессов, условий существования устойчивых режимов работы, отсутствия передискретизации, уменьшения эффекта дрожания, минимизации шумового вклада составляющих СЧ устройств, улучшения точностных характеристик частотного

диапазона (создания более мелкой сетки частот).

В процессе проведенных исследований, с использованием Matlab Simulink, создан ряд имитационных моделей, таких как: модель токового детектора, модель сигма-дельта модулятора, модель кольца ФАП с токовым детектором, модель СЧ с СДМ в цепи обратной связи.

Разработанная методика была использована при создании опытно – конструкторских и серийных образцов ШП СЧ 9 кГц-20 ГГц.

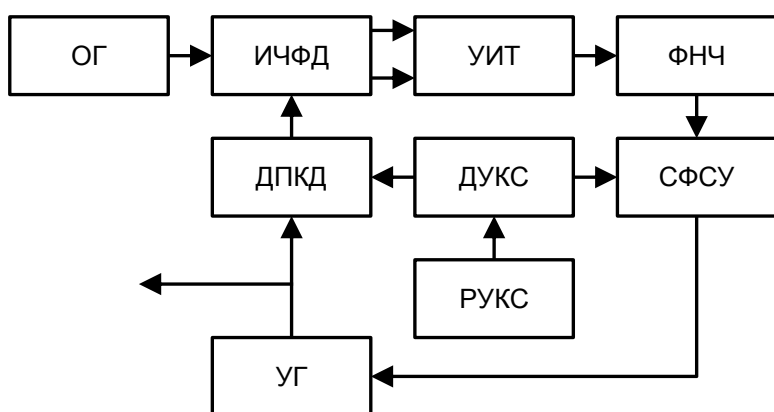


Рис. 8.

Структурная схема быстродействующего СЧ

Также в 6-ой главе предлагается новый алгоритм работы ШП-СЧ, структурная схема которого представлена на Рис. 8.

Синтезатор частоты в своем составе содержит: опорный генератор (ОГ), импульсный частотно-

фазовый детектор (ИЧФД), управляемый источник тока (УИТ), фильтр нижних частот (ФНЧ), управляемый генератор (УГ), делитель с переменным или дробно-переменным коэффициентом деления (ДПКД/ДДПКД), регистр управляющего кодового слова (РУКС), дешифратор управляющего кодового слова (ДУКС), сумматор-формирователь сигнала управления (СФСУ) (Рис. 8).

Оригинальный алгоритм работы СЧ полностью устраняет частотное рассогласование в контуре ИФАП при переключении частоты синтезатора, исключает фазу поиска ИФАП по частоте, допуская лишь незначительное фазовое рассогласование в момент переключения.

Седьмая глава посвящена разработке алгоритма анализа синхронизации хаотического сигнала на основе непрерывного вейвлет – преобразования, который состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Определения фазы хаотического сигнала $\varphi(t)$.

1.1. Вычисление вейвлет-преобразования от $\varphi(t)$:

$$W(s, t_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t) \psi_{s, t_0}^*(t) dt, \quad (8)$$

где $\psi_{s, t_0}(t)$ – вейвлет-функция, получающаяся из материнского вейвлета $\psi_0(t)$

$$\psi_{s, t_0}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi_0\left(\frac{t - t_0}{s}\right), \quad (9)$$

где временной масштаб s определяет ширину вейвлета, t_0 – временной сдвиг вдоль оси времени.

В качестве материнского вейвлета (9) использовался комплексный вейвлет Морле, который представляет собой синусоидальную функцию, модулированную функцией Гаусса:

$$\psi_0(\eta) = \frac{1}{\sqrt{\pi B}} e^{i2\pi C\eta} e^{-\eta^2/B},$$

где C – центральная частота, B – ширина полосы частот вейвлета.

1.2. Вычисление амплитудного вейвлетного спектра $|W(s, t_0)|$.

1.3. Определение фазы сигнала как

$$\theta_s(t) = \arg W(s, t_0),$$

при этом поведение каждого временного масштаба s (частоты f) характеризуется с помощью ассоциированной с ним фазы $\theta_s(t)$.

Шаг 2. Поиск диапазонов временных масштабов.

2.1. Если выполняется условие захвата фаз

$$|\theta_{s1}(t) - \theta_{s2}(t)| \leq \text{const}, \quad (10)$$

то временные масштабы $s \in [s_1; s_2]$ являются синхронизованными, а хаотические системы находятся в режиме синхронизации временных масштабов (частот).

2.2. Если условие (10) не выполняется, то хаотические системы не синхронизированы на этих временных масштабах.

На основе разработанного алгоритма проводилось исследование хаотической синхронизации двухкольцевых непрерывных систем ФАП.

Регистрация хаотической синхронизации осуществлялась посредством сравнения основных частот вейвлет-преобразования хаотических сигналов на выходе формирующей и синхронизирующей систем ФАП (Рис. 9). На Рис. 9: δ - коэффициент связи между синхронизируемыми системами.

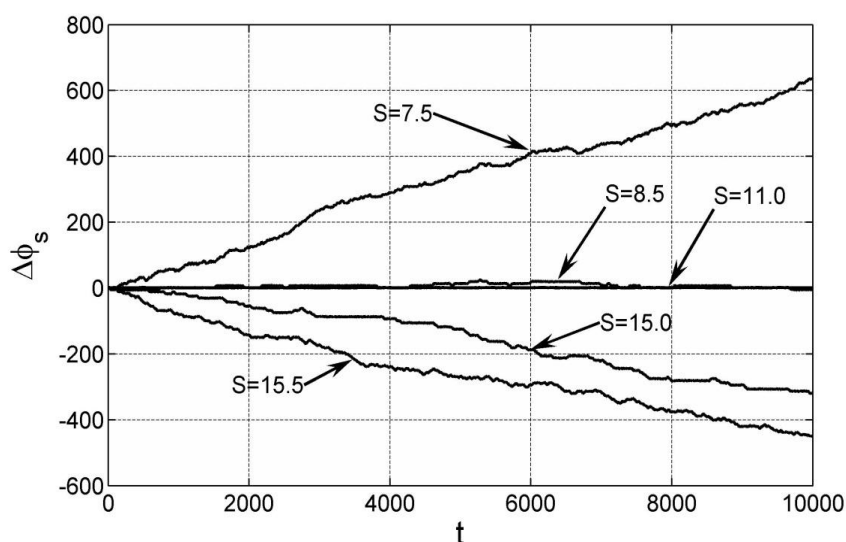


Рис.9.

Диаграммы разностей фаз синхронизируемых подсистем для различных временных масштабов при $\delta = 0.07$

Исследования показали, что чем ближе значение δ к середине интервала синхронизации, тем больше засинхронизировалось различных временных масштабов, таким образом, установлено, что в первую очередь вступают в синхронизм вре-

менные масштабы (частоты), на которые приходится максимальная энергия амплитудного вейвлетного спектра, а затем и соседние компоненты.

В **восьмой главе** разработан комплексированный алгоритм синхронизации шумоподобного сигнала с хаотически меняющейся символьной частотой. Рассматриваются две оригинальные системы передачи: на основе хаотического синхронного отклика многопозиционного сигнала и на основе использования хаотически изменяющейся тактовой частоты. В обоих случаях для обеспечения максимальной энергетической эффективности используется расширенный фильтр Калмана (РФК).

Модель сообщения строится на основе разностного уравнения, получен-

ного из непрерывной модели формирующей системы с учетом предварительной дискретизации. В результате моделирования получены зависимости СКО ошибки восстановления фазы сигнала для различных значений параметров ФАП, модели РФК и отношения сигнал-шум (ОСШ), которые показали возможность многопозиционной передачи информации по нескольким параметрам системы и наличие порогового значения ОСШ для каждого шага дискретизации, выше которого алгоритм функционирует устойчиво.

На Рис. 10 приведена структурная схема двухпозиционной системы передачи информации. ФАП1 и ФАП2 отличаются хаотическими режимами, которые выбираются в соответствии с рассчитанными диаграммами взаимокорреляционных свойств.

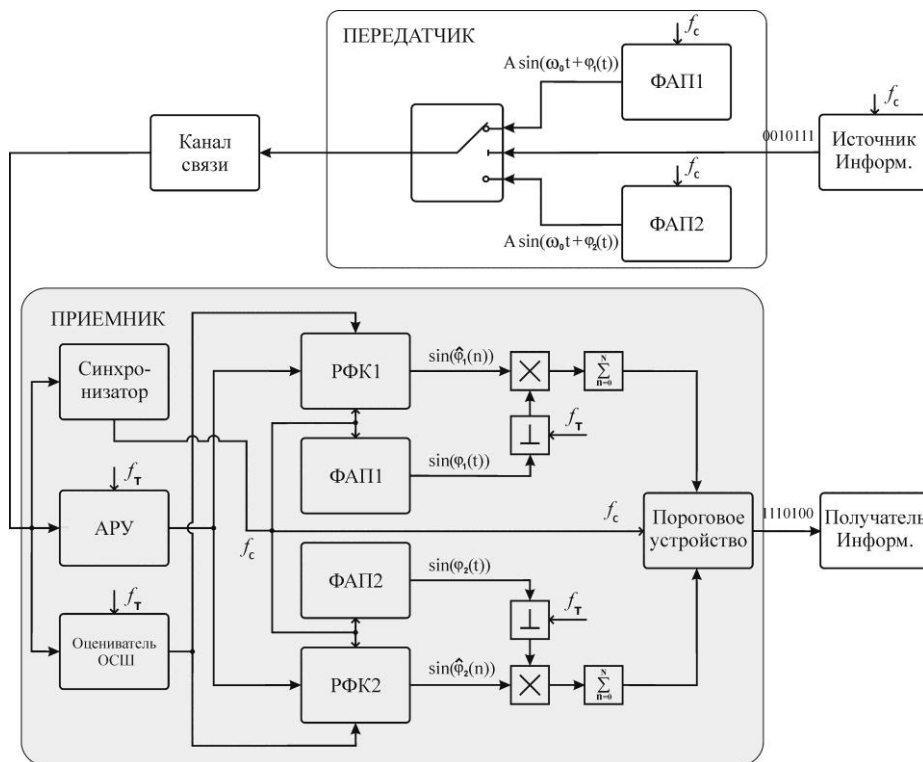


Рис. 10.

Структурная схема двухпозиционной системы передачи информации на основе РФК

ботанным алгоритмом выделения символьной частоты тестовой последовательности на основе сигнала разности фаз, выделенных с помощью вей-влет-преобразования (результаты 7-ой главы), и последующего применения метода

Приемник состоит из блока АРУ, блока оценки ОСШ, синхронизатора, фильтров РФК1, РФК2, генераторов опорных сигналов (ФАП1, ФАП2), корреляторов и порогового устройства.

Синхронизатор работает в соответствии с разработанным алгоритмом выделения символьной частоты тестовой последовательности на основе сигнала разности фаз, выделенных с помощью вей-влет-преобразования (результаты 7-ой главы), и последующего применения метода

максимального правдоподобия для нахождения границ символов. В случае многопозиционного сигнала увеличивается число согласованных фильтров, генераторов опорных сигналов и корреляторов.

На Рис. 11 приведен пример графика энергетической эффективности для 2-х (кривая 3), 4-х (2) и 8-ми (1) позиционного хаотических сигналов. Из Рис. 11 видно, что увеличение позиционности передаваемого хаотического сигнала приводит к незначительному увеличению вероятности ошибки, что напрямую связано с выбором сигнального созвездия. Увеличение вероятности ошибки для сигнала с большей позиционностью объясняется тем, что выбор точек «созвездия» выполнялся с различными значениями порога коэффициента взаимной корреляции.

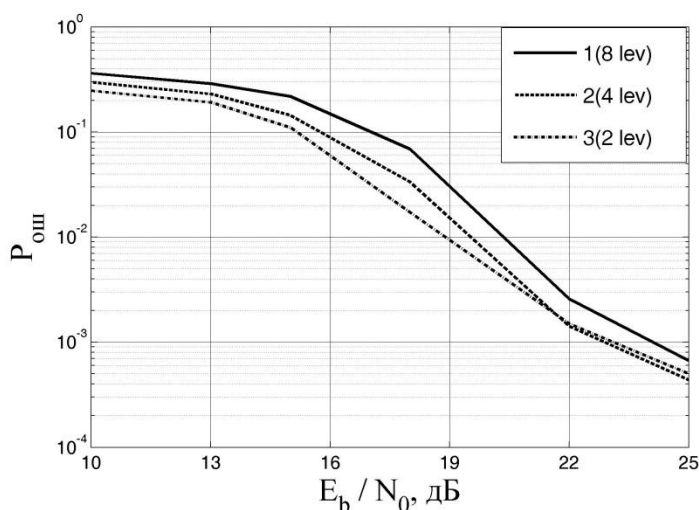


Рис. 11. Вероятность битовой ошибки

В главе также предложен алгоритм передачи двоичной информации, основанный на использовании хаотически изменяющейся тактовой частоты. На приемной стороне синхронный отклик получен с помощью алгоритма РФК (Рис. 12а).

Для оценки непостоянства тактовой частоты введен пара-

метр J , численно равный отношению СКО длительности символа к средней длительности символов информационной последовательности. На Рис. 12б приведена зависимость вероятности ошибки от ОСШ в канале с АБГШ для $J = 0,18$ (кривая 1), $J = 0,27$ (2), $J = 0,36$ (3). Сплошной линией (кривая Theor) указана граница потенциальной помехоустойчивости, соответствующая постоянной тактовой частоте.

Исследования показали, что для заданной вероятности ошибки, например, $P_{ош} = 10^{-5}$ применение тактовой частоты с $J = 0,36$ требует повышения

мощности сигнала на 3,4 дБ. Схемы выделения тактовой частоты, рассчитанные на постоянную тактовую частоту, ошибаются в границах каждого символьного интервала, что делает невозможным несанкционированный перехват информации. Также результатом применения хаотически изменяющейся тактовой частоты является снижение спектральной плотности мощности, что дает дополнительные преимущества.

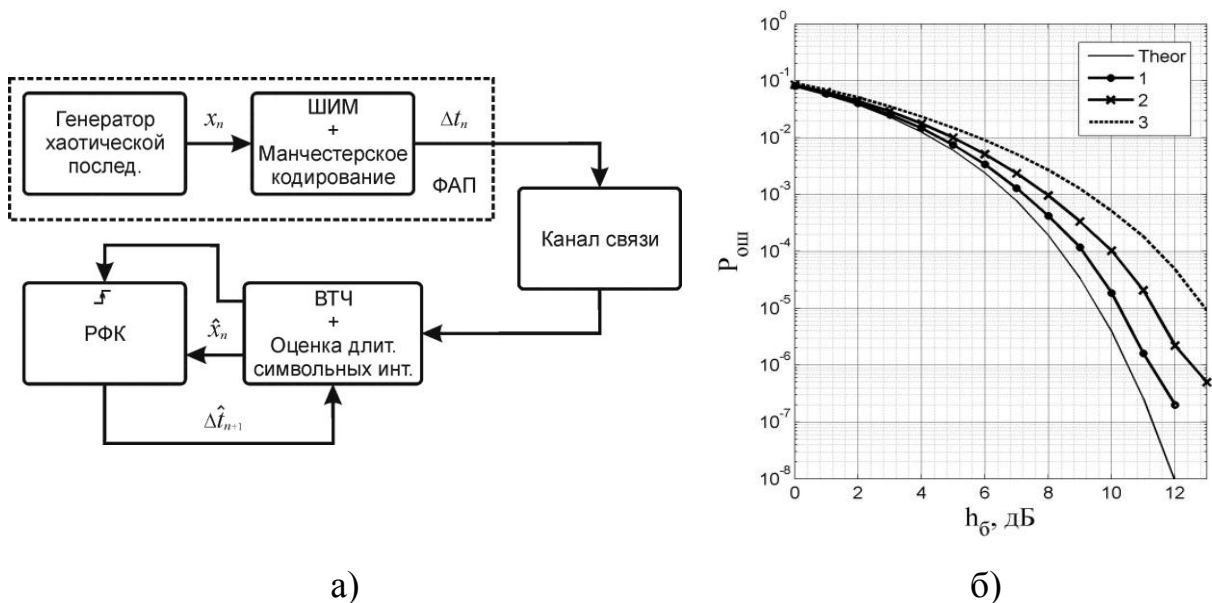


Рис. 12.

Структурная схема системы синхронизации с хаотически меняющейся тактовой частотой (а) и зависимость вероятности ошибки от ОСШ (б)

Представленные в главе результаты выполненных исследований подтверждены на цифровом модуле, выполненном на ПЛИС Spartan-3A DSP.

В **Приложении 1** представлена имитационная модель гибридной схемы фазовой и тактовой синхронизации ШПС приемников и результаты моделирования в System Vii.

В **Приложении 2** - разработка комплексированного алгоритма символьной синхронизации на основе алгоритма выделения фазы хаотического сигнала и результаты его работы для передатчика, построенного по схеме переключения хаотических режимов.

В заключении приведены основные результаты диссертационной рабо-

ты по повышению эффективности процессов синхронизации в системах с широкополосными сигналами и сделаны выводы по решению научной проблемы, имеющей важное практическое значение.

1. Результаты развития теории Марковских случайных процессов позволяют разрабатывать математические и имитационные модели систем синхронизации различных порядков, исследовать их статистические характеристики, синтезировать эффективные алгоритмы процессов вхождения в синхронизм, слежения, и срывов синхронизации в условиях воздействия шумовых и узкополосных помех.

2. Результаты развития теории фильтрации Стратоновича в задачах синтеза оптимальных структур приемников фазоманипулированных сигналов при учете флуктуации частоты, фазы, задержки и амплитуды позволяют повысить эффективность процессов оценки информационных параметров сигнала, фазовой и тактовой синхронизации, слежения за задержкой в системах связи ШПС с прямым расширением спектра.

3. Разработанная комплексированная имитационная модель гибридной схемы слежения за задержкой и схемы тактовой синхронизации является эффективным средством анализа процессов в системах с ШПС.

4. Разработанный комплексированный алгоритм поиска ШПС-сигнала позволяет добиться наилучших результатов при типовых значениях доплеровского смещения и типовых сценариях распространения сигнала в наземных пользовательских приемниках.

5. Разработанные способы рационального выбора структуры и параметров широкополосных СЧ с ИФАПЧ, позволили создать опытные образцы ШП СЧ 9 кГц - 20 ГГц, которые могут быть использованы в системах с расширением спектра программной перестройкой рабочей частоты.

6. Разработанный метод оценки фазы и частоты хаотического сигнала на основе непрерывного вейвлет-преобразования, является эффективным средством анализа процессов синхронизации в хаотических системах. С его помо-

щью получены оценки времени до срыва слежения и времени вхождения в синхронизм различных временных масштабов для рассматриваемых систем.

7. Результаты развития теории нелинейной оптимальной фильтрации Калмана в задачах синхронизации хаотических систем позволили получить эффективные алгоритмы выделения синхронного хаотического отклика в условиях доплеровского смещения частоты и оценки информационной последовательности в цифровом приемном устройстве в условиях двухпозиционного и многопозиционного режимов обработки.

Основные результаты и направления исследований диссертации изложены в следующих основных работах:

1. Шахтарин Б.И., Сидоркина Ю.А., Сизых В.В. Воздействие помех на системы синхронизации. М.: Горячая линия - Телеком, 2016. 268 с. (16,75 п.л./ 5 п.л.)
2. Синхронизация в радиосвязи и радионавигации: Учебн. пособие/ Сидоркина Ю.А. [и др.]. М.: Горячая линия - Телеком, 2011. 278 с. (17,5 п.л. /6 п.л.)
3. Синхронизация в радиосвязи и радионавигации: Учебн. пособие/ Сидоркина Ю.А. [и др.]. М.: Гелиос АРВ, 2007. 256 с. (16 п.л. /4,5 п.л.)
4. Генераторы хаотических колебаний: Учебн. пособие для вузов. – 2-е изд., стереотип./ Сидоркина Ю.А. [и др.]. М.: Горячая линия - Телеком, 2014. 248 с. (15,5 п.л. /4 п.л.)
5. Шахтарин Б.И., Сидоркина Ю.А., Асланов Т.Г. Анализ воздействия гармонической помехи на схему Костаса // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. №222. С. 59-66. (0,5 п.л./ 0,16 п.л.)
6. Шахтарин Б.И., Сидоркина Ю.А., Никифоров А.А. Оценка фазы псевдослучайной последовательности в системах передачи информации с расширенным спектром// Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Серия: Приборостроение. 2015. № 3. С. 92-103. (п.л. 0,75/п.л. 0,25)

7. Сидоркина Ю.А., Никифоров А.А., Шахтарин Б.И. Алгоритм оценки параметров широкополосного сигнала на ограниченном интервале наблюдения// Научный вестник МГТУ ГА. 2014. №210. С. 76-82. (0,44 п.л./0,15 п.л.)
8. Шахтарин Б.И., Сидоркина Ю.А., Кульков И.А. Моделирование гибридной схемы фазовой и тактовой синхронизации ФМ-сигналов/ Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2014. № 4. С. 123-134. (п.л. 0,75/п.л. 0,25).
9. Сидоркина Ю.А., Балыкина А.М. Синтез системы фазовой автоподстройки, оптимальной для приема 2-ФМ манипулированных сигналов (BPSK)// Научный вестник МГТУ ГА. 2012. № 186. С. 53-57. (0,31 п.л./ 0,2 п.л.)
10. Сидоркина Ю.А. Синтез и помехоустойчивость оптимального приемника 4-ФМ манипулированных сигналов (QPSK)// Вестник Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова. Серия Естественные и технические науки. 2012. № 3. С. 64-71. (0,5 п.л.)
11. Сидоркина Ю.А. Синтез схемы Костаса, оптимальной для приема 2-ФМ манипулированных сигналов (BPSK)/ Вестник Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова. Серия Естественные и технические науки. 2012. № 2. С. 71-75. (п.л. 0,31).
12. Сидоркина Ю.А., Ковальчук А.А., Рязанова М.А. Анализ системы фазовой автоподстройки при наличии гармонической помехи// Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2011. № 3. С. 113-123. (0,69 п.л./ 0,23 п.л.)
13. Быков А.А., Сидоркина Ю.А., Ковальчук А.А. Применение сигма-дельта модуляторов в дробных синтезаторах частоты// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2011. № 2. С. 77-83. (0,69 п.л./0,3 п.л.)

14. Сидоркина Ю.А., Ковальчук А.А., Рязанова М.А. Воздействие на систему синхронизации гармонических помех и шума// Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2011. № 3. С. 3-25. (1,38 п.л./ 1 п.л.)
15. Косолапова А.В., Сидоркина Ю.А., Шахтарин Б.И. Анализ работы системы фазовой автоподстройки частоты с токовым детектором// Научный вестник МГТУ ГА. 2010. № 152. С. 163-168. (0,38 п.л./ 0,15 п.л.)
16. Солонухо Г.Т., Сидоркина Ю.А., Шахтарин Б.И. Использование фильтра Калмана для оценки параметров хаотического колебания// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2004. № 3. С. 76-82. (0,45 п.л./ 0,2 п.л.)
17. Аливер В.Ю., Сидоркина Ю.А., Шахтарин Б.И. Статистические характеристики цифровых систем синхронизации// Электромагнитные волны и электронные системы. 2003. Т.8. №2. С. 59-74. (1 п.л./ 0,4 п.л.)
18. Исследование режимов генераторов хаоса/ Сидоркина Ю.А. [и др.] // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48. № 12. С. 1471-1483. (0,82 п.л./ 0,2 п.л.)
19. Сидоркина Ю.А., Ходунин А.В. Применение вейвлет-анализа в задачах синхронизации// Сборник докладов VI Всероссийской научно-технической конференции Радиолокация и радиосвязь. Москва, 2012. Т.1. С. 174-179. (0,31 п.л./ 0,21 п.л.)