

На правах рукописи

Антипов Илья Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО ДЕМОДУЛЯТОРА НА
ОСНОВЕ СИСТЕМЫ СВЯЗАННЫХ АВТОГЕНЕРАТОРОВ,
СИНХРОНИЗУЕМЫХ ФАЗОРАСЩЕПЛЕННЫМ
СИГНАЛОМ**

Специальность 01.04.03 - радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Томск – 2007

Работа выполнена на кафедре радиофизики Томского государственного университета, отделении радиофизики и радиоэлектроники СФТИ ТГУ

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук,
профессор Якубов В.П.

Официальные оппоненты: доктор тех. наук
профессор Малютин Н.Д

доктор тех. наук,
профессор Кашкин В.Б.

Ведущая организация: Институт физики
им. Л.В. Киренского
СО РАН, г. Красноярск

Защита состоится 15 марта 2007 г. в 14.30 в 119 аудитории на заседании диссертационного совета Д 212.267.04 в Томском государственном университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета

Автореферат разослан 15 февраля 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.267.04 _____ Б.Н.Пойзнер

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В последние десятилетия все большее значение приобретают цифровые методы передачи информации, которые по сравнению с аналоговыми обладают такими качествами как простота и эффективность объединения многих независимых сигналов, нечувствительность к искажениям при прохождении через канал связи, возможность достижения конфиденциальности связи. Для передачи цифровой информации в большинстве случаев применяются различные виды фазовой модуляции с подавлением несущей частоты. Отсутствие несущей частоты обеспечивает максимальную энергетическую эффективность, защиту от несанкционированного доступа, улучшение электромагнитной совместимости радиосистем. Вместе с тем, при приеме и последующей обработке таких сигналов одной из ключевых задач становится восстановление этой несущей частоты, то есть когерентного колебания, необходимого для демодуляции, но отсутствующего в спектре.

Актуальность. Принципы формирования когерентного опорного колебания для демодуляции сигналов с подавленной несущей широко известны и применяются в радиотехнике уже более 50 лет. Устройства выделения подавленной несущей, такие как схемы Костаса, Пистолькорса, схемы с обратной связью по решению широко применяются и входят в состав различных радиоприемных систем. Вместе с тем новые задачи и повышенные требования по быстродействию и помехоустойчивости, предъявляемые к устройствам приема цифровых сигналов, нуждаются в новых, нестандартных решениях, в том числе в части реализации выделителя подавленного несущего колебания.

В ходе проведенного поиска новых принципов восстановления подавленной несущей было обращено внимание на системы взаимно синхронизованных генераторов. Эти системы нашли применение, в основном, для сложения мощностей, и главное внимание при их анализе уделялось достижению именно максимальной мощности. Меньшее распространение получили системы с вычитанием колебаний, обладающие высокой чувствительностью к малым

изменениям нагрузочных параметров и способные служить в качестве датчиков. Разнообразие функций, выполняемых системами связанных автогенераторов, стимулировало поиск возможности применения этих систем для целей демодуляции сигналов с подавленной несущей. В результате был выявлен и реализован новый принцип, позволяющий расширить функциональные возможности и устранить недостатки известных схем, а именно: наличие ряда нелинейных и логических преобразований сигнала, ограничивающих быстродействие; сложность схемной реализации, обусловленную большим количеством элементов; лавинообразное увеличение числа элементов схемы при увеличении числа фазовых дискретов сигнала.

В предложенном функциональном узле выделение подавленной несущей достигается путем синхронизации системы в общем случае N связанных автогенераторов, внешним сигналом, разветвленным на N каналов и подведенным к каждому из автогенераторов с определенным дискретным фазовым сдвигом, то есть прошедшим фазорасщепитель. Фазовые соотношения между собственными колебаниями взаимодействующих автогенераторов и внешним воздействием на каждый из них обуславливают возможность существования режима синхронизации, стабильного по отношению к дискретным изменениям фазы внешнего сигнала. Тем самым осуществляется формирование когерентного опорного колебания, необходимого для демодуляции сигнала. В отличие от традиционных схем того же назначения фазовый синхронизм достигается существенно быстрее, практически на одном тактовом интервале. Кроме потенциально более высокого быстродействия, устройство отличается простотой схемной реализации, универсальностью структуры для произвольного числа фазовых дискретов внешнего сигнала, в том числе с неэквидистантным их расположением. Благодаря указанным преимуществам устройство способно найти применение в современных скоростных системах передачи информации.

В ходе предшествующих работ были выявлены элементарные свойства нового функционального узла и некоторые варианты его схемной реализации в радиодиапазоне. Однако ранее полученные сведения были недостаточными для того, чтобы иметь представление о закономерностях поведения специфическим образом синхронизируемой системы, путях оптимизации характеристик и оценки ее практической значимости. В то же время существовала и

продолжает существовать реальная потребность в простом и универсальном устройстве восстановления когерентной несущей, пригодном для использования в различных приемных устройствах, в частности, в демодуляторе спутниковых сигналов. Исследования, проводимые в рамках диссертационной работы, направлены на дальнейшее теоретическое и экспериментальное изучение связанных автоколебательных систем и создание на этой основе устройств восстановления несущей и демодуляции цифровых сигналов без использования традиционных многоэлементных систем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).

Целью диссертационной работы является исследование стационарных и динамических колебательных процессов в системе связанных автогенераторов, находящихся под воздействием фазорасщепленного сигнала и создание на ее основе фазового демодулятора для цифровых систем связи.

Главные поставленные задачи включают:

- построение адекватной инженерно-математической модели, позволяющей исследовать стационарные состояния и динамику системы в режиме выделения когерентного колебания;
- определение частотных и амплитудных границ существования стационарных режимов, в первую очередь, оценка достижимой полосы синхронизации исследуемой системы;
- определение характера динамического поведения системы, на которую воздействует полезный сигнал в смеси с шумом;
- оценка помехоустойчивости системы и ее сравнение с известными системами по этому критерию;
- создание работоспособной конструкции демодулятора на связанных автогенераторах в радиодиапазоне, проверка теоретических выводов и подтверждение практической применимости демодулятора для обработки тестовых сигналов и реальных сигналов спутниковой цифровой системы связи.

Методы исследования. Теоретическая часть работы опирается на обобщенную математическую модель связанных автоколебательных систем. При исследовании стационарных состояний и динамики колебательных процессов в системе применяется часто используемый в теории нелинейных колебаний **метод укороченных уравнений**. Ввиду того, что при выделении когерентного опорного колебания главное значение имеют фазовые соотношения, в работе делается допущение об относительной

слабости связи между автогенераторами, также как и об относительной малости внешнего сигнала. Приближение малости синхровоздействий позволяет исключить из рассмотрения амплитудные изменения и сосредоточить основное внимание на фазовых соотношениях, играющих принципиальную роль в задачах синхронизации. При интерпретации амплитудных и фазовых соотношений между собственными и вносимыми извне колебаниями используется **метод комплексных амплитуд**, позволяющий пользоваться методами **векторного анализа**. При анализе нелинейной динамики системы, находящейся под воздействием сигнала и аддитивного шума, применяется **метод численного моделирования**. Для проверки основных теоретических выводов применяется **экспериментальный метод**, в рамках которого производилось макетирование лабораторного образца демодулятора и получение основных закономерностей его поведения. Результаты, полученные разными методами, дополняют и подтверждают друг друга.

Положения, выносимые на защиту:

1. Система ограниченного числа N слабо связанных автогенераторов, характеризуемая малым коэффициентом амплитудной связи μ и синхронизируемая расщепленным на эквидистантные фазовые дискреты θ_n внешним сигналом с нормированной амплитудой λ , в динамическом режиме восстановления несущей адекватно описывается укороченным дифференциальным уравнением для фазы суммарного колебания φ_s , включающим постоянную расстройку $\Delta\omega$ и возмущающую, периодическую по фазе обобщенную силу:

$$\frac{d\varphi_s}{dt} = \Delta\omega + \frac{\lambda}{\tau_k S} \sum_{n=1}^N \frac{\sin(\theta_n - \varphi_s) - T_n \cos(\theta_n - \varphi_s)}{T_n^2 + 1}$$

где S – амплитуда суммарного колебания, τ_k - постоянная времени колебательной системы, $T_n = \lambda \sin(\theta_n - \varphi_s) [\mu S + \lambda \cos(\theta_n - \varphi_s)]^{-1}$.

2. В режиме, обеспечивающем восстановление несущей частоты внешнего фазомодулированного сигнала, полоса синхронизации системы слабо связанных автогенераторов пропорциональна нормированной амплитуде сигнала, возведенной в степень, равную числу автогенераторов.

3. Помехоустойчивость фазового демодулятора на основе системы связанных автогенераторов по мере уменьшения амплитуды

внешнего сигнала асимптотически приближается к помехоустойчивости оптимального когерентного демодулятора.

Достоверность научных положений и других результатов обусловлена использованием известной математической модели системы связанных автогенераторов на основе укороченных уравнений движения для фазы в приближении слабой связи. Применяемые упрощения, приводящие к явным аналитическим зависимостям (1 и 2 научные положения), обоснованы относительной малостью сигналов, воздействующих на парциальные автогенераторы системы. Применимость упрощений, в конечном счете, подтверждается результатами экспериментального исследования реально созданного демодулятора.

Численное моделирование поведения системы в условиях мешающего воздействия узкополосного нормального шума, выполненное на языке программирования PASCAL, в широком диапазоне значений параметров с шагом итераций, обеспечивающим высокую точность и воспроизводимость результатов, подтверждает отмеченную в 3 научном положении помехоустойчивость демодулятора на связанных автогенераторах. Об этом же свидетельствуют экспериментальные данные.

При проведении эксперимента используются стандартные лабораторные приборы для анализа сигналов, стандартные радиотехнические элементы и узлы. Полученные новые результаты и выводы не противоречат известным представлениям теории связанных автогенераторов.

Научная ценность полученных результатов определяется обнаружением новых, ранее неизвестных закономерностей, присущих исследуемой системе:

- найдена явная форма уравнения, приближенно, но адекватно описывающего стационарный и динамический режимы системы посредством единственной переменной, роль которой играет векторная сумма колебаний автогенераторов, составляющих систему (1 положение);
- впервые выявлена необычная для известных систем степенная зависимость полосы синхронизации системы произвольного числа связанных автогенераторов от относительной амплитуды сигнала (2 положение);
- аналитически и численно обоснован вывод о том, что фазовый демодулятор на основе связанных автогенераторов по критерию

помехоустойчивости близок к оптимальному когерентному демодулятору (3 положение);

- обнаружен гистерезисный характер зависимости амплитуды суммарного колебания от относительной амплитуды внешнего сигнала.

Практическая значимость:

- созданный лабораторный макет демодулятора используется в действующем наземном пункте приема спутниковых сигналов, а также в учебном процессе и научно-исследовательской работе студентов на радиофизическом факультете ТГУ;
- разработанные принципы построения фазовых демодуляторов на связанных автогенераторах могут быть использованы для проектирования перспективных систем скоростной мобильной цифровой связи, телеметрии и телевидения.

Внедрение результатов диссертации и рекомендации по их дальнейшему использованию. В настоящее время к области конкретного применения относятся две научно-технические задачи. Первая из них связана с организацией приема информации с низколетящих спутников, осуществляющих мониторинг земной поверхности. Речь идет о спутниковых системах «Метеор-3М» и TERRA, в которых используется дискретная фазовая модуляция. Демодуляторы на основе исследуемой системы успешно испытаны в приемных устройствах, разработанных коллективом специалистов Сибирского физико-технического института и кафедры радиофизики ТГУ. Вторая задача связана с модификацией дуплексной цифровой линии связи миллиметрового диапазона, разрабатываемой в НИИ полупроводниковых приборов (г. Томск). Переход от амплитудной модуляции к фазовой теоретически повышает энергетический потенциал линии на 6 дБ, что существенно для планируемого увеличения тактовой частоты с 10 до 125 МГц.

Дальнейшее внедрение результатов целесообразно проводить в отделении радиофизики СФТИ ТГУ и НИИ полупроводниковых приборов г. Томск. Кроме того, исследуемая схема в составе систем обработки сигналов может найти применение в различных отраслях, связанных с информатикой и телекоммуникациями.

Связь с плановыми работами. Работа была поддержана грантом Министерства образования РФ 2003 – 2004 гг. из раздела «Фундаментальные исследования в области технических наук» № Т02–02.5–3393 «Исследование функционального узла на основе

системы связанных автогенераторов, синхронизируемых фазомодулированным внешним сигналом», № гос. регистрации 01200307770, а также Государственным контрактом № 02.438.117008 на 2005 – 2006 гг. РИ-16.0/013 «Научно-организационное, методическое и техническое обеспечение организации и поддержки научно-образовательных центров в области технологии безопасности и осуществление на основе комплексного использования материально-технических и кадровых возможностей совместных исследований и разработок» в рамках Федеральной целевой научно-технической программой Федерального агентства по науке и инновациям. «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» (2002 – 2006 гг.).

На момент постановки задачи **тема диссертации ориентирована:**

– по перечню приоритетных направлений развития науки и техники на поз. 2.2.7. «Интегрированные информационно-телекоммуникационные системы и сети» – в плане обеспечения функционирования радиосредств;

– по перечню критических технологий федерального уровня тематика диссертации ориентирована на поз. 1.5. «Информационно-телекоммуникационные системы».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 статей в рецензируемых журналах. Материалы диссертации опубликованы в 14 трудах научных конференций и школ-семинаров.

Личный вклад автора состоит в проведении основных математических расчетов, сборке экспериментальных макетов и выполнении экспериментов, интерпретации всех полученных результатов и формулировке выводов, вошедших в диссертационную работу.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего ___ наименования, содержит __ рисунка, ___ приложения – всего _____ страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель и задачи исследования, приводятся защищаемые научные положения, показаны новизна, научная

ценность и практическая значимость результатов, кратко изложено содержание работы.

В главе 1 приводится обзор ранее полученных результатов, касающихся исследуемой системы и областей ее применения.

Исследуемая система представляет собой N идентичных автогенераторов (АГ), имеющих общую нагрузку и связанных между собой синфазно. В такой системе в режиме взаимной синхронизации каждый из АГ синхронизируется гармоническим сигналом, представляющим собой сумму напряжений остальных генераторов, умноженную на некоторый амплитудный коэффициент связи μ . Если сигнал, начальная фаза которого может принимать дискретный эквидистантный ряд значений θ_n , где $n = 1, 2, \dots, N$, подводится к отдельным генераторам со сдвигом фазы $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N$, то при достаточно близких значениях частот сигнала и автогенераторов в системе установится синхронный режим с фазой гармонических колебаний, привязанной к одному из фазовых дискретов сигнала. Благодаря этому система может использоваться в качестве выделителя подавленной несущей фазомодулированных сигналов.

В результате предшествовавших работ установлено, что процесс установления фазы суммарного колебания в системе связанных АГ, в целом, подобен такому же процессу в любой другой схеме восстановления несущей (СВН). Медленные изменения фазы сигнала влекут за собой соответствующие изменения фазы суммарных колебаний синхронизируемой системы. Мгновенное же изменение фазы сигнала от одного дискрета к другому не окажет влияния на суммарные колебания, так что однажды установившаяся фаза будет сохранять фиксированное значение. Характерно, что чем больше скорость переключения фазы сигнала, тем слабее проявляется реакция, которая состоит в кратковременном отклонении фазы от стационарного значения с последующим возвратом к нему же. Это обстоятельство указывает на потенциально высокое быстродействие схемы.

Обзор ранее проделанных работ показывает, что результаты и выводы, полученные на момент постановки задач диссертации, носили разрозненный характер и не давали ответов на ряд ключевых вопросов, суть которых составляет цель и задачи данной работы, а решение содержится в последующих результативных главах.

Глава 2 посвящена стационарным режимам в системе связанных автогенераторов, синхронизируемой фазорасщепленным внешним сигналом.

Математическая модель системы представляет собой набор укороченных уравнений для фаз составляющих ее идентичных изохронных автогенераторов:

$$\frac{d\varphi_k}{d\tau} = \delta + \sum_m \mu \sin(\varphi_m - \varphi_k) + \lambda \sin(\theta_k - \varphi_k), \quad (1)$$

где использованы следующие обозначения:

k – порядковый номер парциального АГ;

φ_k – текущая фаза колебаний АГ с порядковым номером k относительно фазы внешнего гармонического сигнала;

μ – коэффициент взаимной амплитудной связи АГ, считаемый одинаковым для всех взаимодействующих пар АГ;

$\tau = t/\tau_k$ – безразмерная временная переменная;

t_k – постоянная времени колебательной системы;

$\delta = \Delta\omega \cdot \tau_k$ – нормированная расстройка собственной частоты АГ относительно частоты внешнего сигнала;

$\theta_k = (2k+1)\pi/N$ – сдвиг фазы внешнего сигнала, подводимого к парциальному АГ;

λ – амплитуда внешнего сигнала, нормированная относительно амплитуды собственных колебаний АГ.

Поскольку $\varphi_k - \varphi_k \equiv 0$, то суммирование допускается проводить по всем $m=1 \div N$, включая k . Это обстоятельство послужило основанием для весьма плодотворного приема - введения векторной суммы парциальных колебаний \mathbf{S} как единой переменной, характеризующей состояние системы.

В теории колебаний принято изображать состояние системы, совершающей периодические колебания, вектором в плоскости комплексной переменной. Применение этого формализма для отображения стационарного режима системы приводит к векторным уравнениям $\delta = \mathbf{a}_k \times (\mu \mathbf{S} + \boldsymbol{\lambda}_k)$, где \mathbf{a}_k – вектор амплитуды парциального АГ, $\boldsymbol{\lambda}_k$ – вектор внешнего воздействия, ориентированный на фазовой плоскости соответственно индивидуальному значению угла θ_k . Векторы $\boldsymbol{\lambda}_k$ образуют на плоскости симметричную звезду.

В отсутствие расстроек каждый парциальный вектор оказывается ориентированным точно вдоль направления векторной суммы $\boldsymbol{\sigma}_k = \mu \mathbf{S} + \boldsymbol{\lambda}_k$. Вектор \mathbf{S} ориентируется вдоль одного из N

равноправных направлений, характеризуемых углами $\beta_k = 2\pi k/N$ относительно направления, принятого за нулевое. Эта ситуация отражается на рисунке 1 в виде векторной диаграммы.

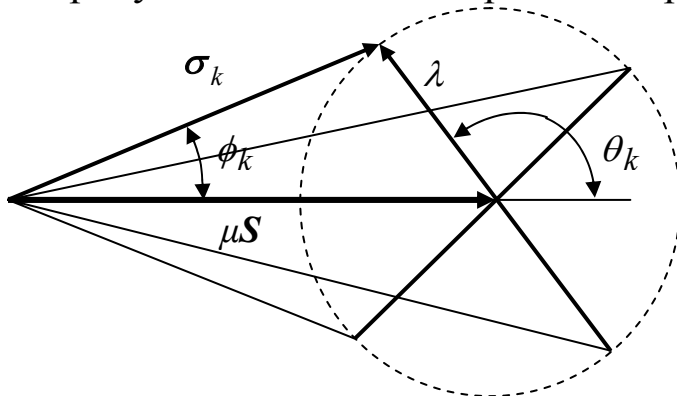


Рисунок 1. – Векторная конфигурация, соответствующая стационарному режиму

Геометрические соотношения, диктуемые вышеуказанными векторными уравнениями, позволили установить характер зависимости амплитуды суммарного вектора от амплитуды внешнего сигнала и определить условия его обращения в ноль, то есть исчезновения режима, инвариантного к скачкам фазы внешнего сигнала. Обнаружено, что в области предельных значений λ при $N > 2$ имеет место амплитудный гистерезис. На рисунке 2 приведено семейство зависимостей $S(\lambda)$ для систем с различным числом автогенераторов. Пунктирные части кривых соответствуют неустойчивым состояниям. Область гистерезиса простирается в диапазоне нормированных амплитуд сигнала, соответствующем условию $0,5 \leq \lambda / N\mu \leq 0,65$.

Наряду с предельными значениями амплитуд сигнала представляют интерес предельные величины расстроек, при которых существует интересующий нас режим выделения подавленной несущей. Путем интегрирования исходной системы (1) с перебором значений амплитуд и расстроек установлено, что зависимость полосы синхронизации от амплитуды сигнала имеет степенной характер, причем показатель степени равен числу автогенераторов.

Результаты расчетов приведены в виде графиков (рисунок 3), где по оси абсцисс отложены нормированные амплитуды, а по оси ординат – корни N -й степени от максимальных расстроек.

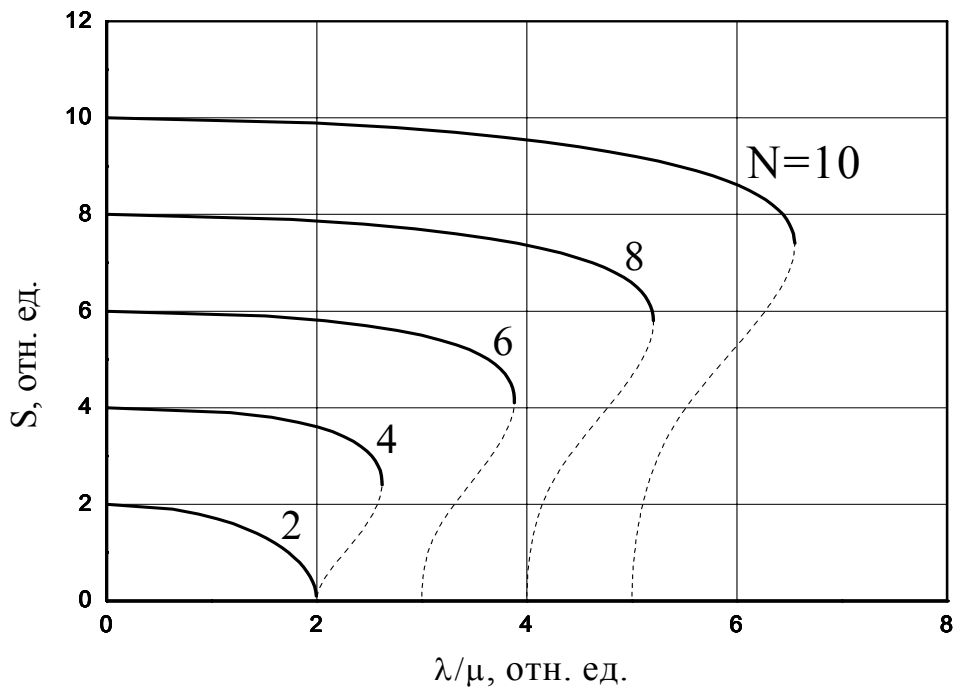


Рисунок 2. – Семейство зависимостей величины суммарного вектора от амплитуды внешнего сигнала

При наличии расстройки симметрия векторной конфигурации рисунка 1 нарушается. Каждый индивидуальный вектор отклоняется от направления, задаваемого векторной суммой $\mu\mathbf{S} + \lambda_k$. Как следствие, сам суммарный вектор отклоняется от исходного направления. Численные расчеты показывают, что отклонения индивидуальных векторов от направлений $\mu\mathbf{S} + \lambda_k$ мало заметны на фоне отклонения всей конфигурации от оси симметрии.

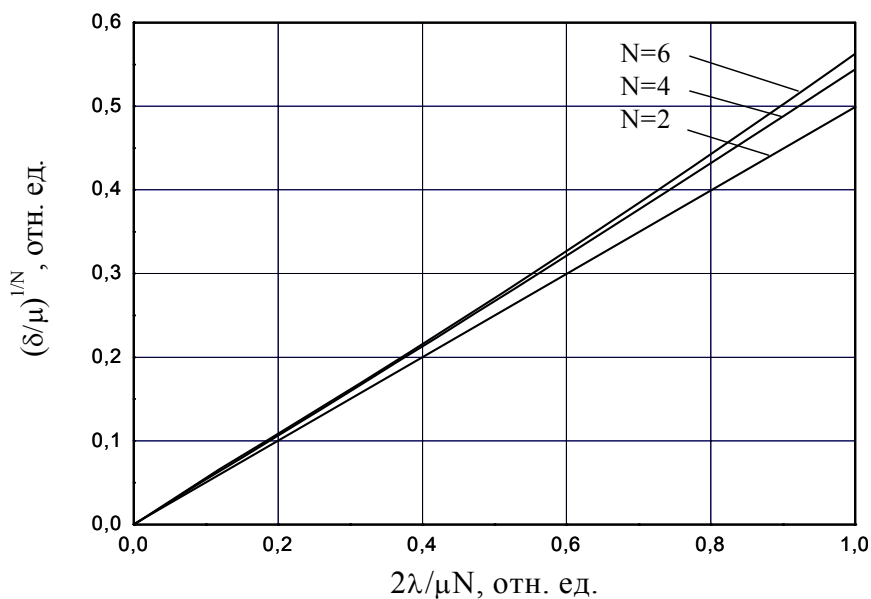


Рисунок 3. – Зависимость полосы синхронизации от амплитуды внешнего сигнала.

На рисунке 4 изображен типичный вид семейства векторных диаграмм, соответствующих нулевой и ненулевой расстройкам системы шести АГ. Указанные отклонения практически не видны в масштабе рисунка. Они становятся заметными только в экстремальных ситуациях, при значениях амплитуды сигнала, близких к максимально допустимым. Данное обстоятельство позволяет воспользоваться по отношению к векторной конфигурации понятием «жесткости», которое окажется полезным в дальнейшем при анализе динамики системы.

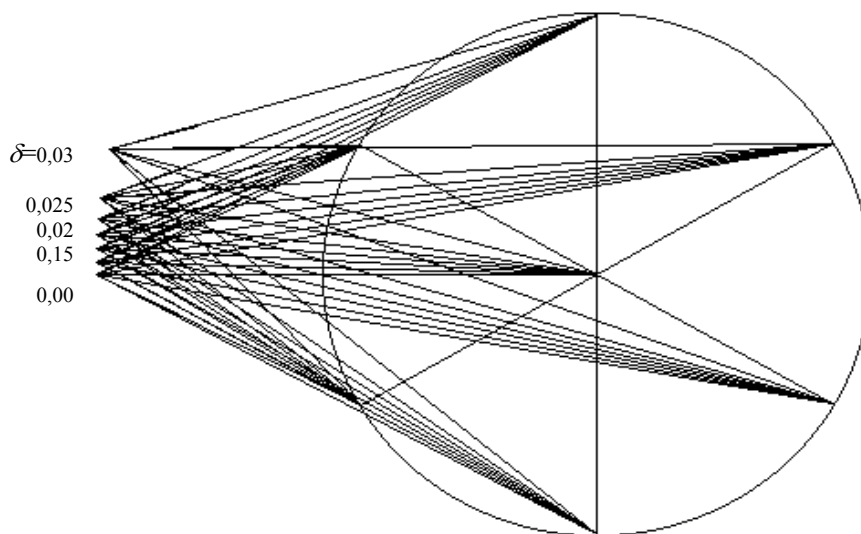


Рисунок 4. – Векторные диаграммы системы шести АГ при различных расстройках

Выводы второй главы послужили основой для формулировки защищаемого научного положения о степенной зависимости полосы синхронизации от амплитуды сигнала.

В главе 3 рассмотрен динамический режим системы связанных автогенераторов, синхронизуемых фазорасщепленным внешним сигналом. В то время как стационарный режим представляет собой некоторую идеализацию, динамический режим характеризует реальное состояние системы. Это обусловлено не только тем, что сигнал является модулированным по фазе, но и тем, что помимо сигнала на систему неизбежно воздействует аддитивный шум. Чтобы судить о качестве работы фазового демодулятора на основе исследуемой системы, нужно, во-первых, иметь представление о процессах в ней, сопровождающих переход между фазовыми дискретам принимаемого сигнала, и, во-вторых, иметь оценку вероятности сбоев, связанных с проскальзыванием фазы в результате совместного действия сигнала и шума. Предваряя 4 главу, где

методом численного моделирования изучается поведение системы при различных соотношениях между уровнями сигнала и шума, глава 3 дает ответ на вопрос о характере движений в системе, выводимой из равновесия внешними воздействиями.

Поскольку в практическом отношении основной интерес представляет угловое положение вектора \mathbf{S} , целесообразно свести реакцию системы на внешнее воздействие к соответствующей реакции его фазы φ_s . Объединение исходных уравнений (1) приводит к уравнению движения фазы суммарного вектора в виде

$$\frac{d\varphi_s}{d\tau} = \frac{1}{|\mathbf{S}|^2} \sum (\mathbf{S} \cdot \mathbf{a}_n) \frac{d\varphi_n}{dt}. \quad (2)$$

Дальнейшее применение векторного формализма позволяет получить уравнение движения в форме:

$$\mathbf{\Omega}_s = \delta + \frac{\mu}{|\mathbf{S}|^2} [\mathbf{S} \times \sum \cdot [[\mathbf{a}_n \times \mathbf{S}] \times \mathbf{a}_n]] + \frac{\lambda}{|\mathbf{S}|^2} [\mathbf{S} \times \sum [[\mathbf{a}_n \times \boldsymbol{\theta}_n] \times \mathbf{a}_n]] \quad (2a),$$

где $\mathbf{\Omega}_s$ – вектор нормированной угловой скорости поворота вектора \mathbf{S} ;

$\boldsymbol{\theta}_n$ – единичный вектор, повернутый на угол θ_n .

Первое слагаемое правой части отражает обусловленный расстройкой дрейф фазы, происходящий в отсутствие сторонних воздействий.

Второе слагаемое определяет движение под действием внутренних сил. Согласно правилам кинематики, движение под действием внутренних сил невозможно, если только оно не обусловлено флуктуациями, которые навязываются системе за счет поступления энергии извне в форме теплоты, излучения и т.п. Поскольку указанные флуктуации значительно слабее, чем входящий на вход сигнал, ими можно пренебречь.

Третье слагаемое представляет наибольший интерес, поскольку определяет движение под действием внешней силы.

Анализ уравнения (2a) осложнен тем, что присутствующие в нем парциальные векторы являются, в свою очередь, решениями парциальных дифференциальных уравнений. Однако, небольшое сужение общности позволяет упростить решение и сделать достаточно достоверные аналитические выводы. Речь идет о допущении, что относительная амплитуда внешнего сигнала λ невелика в сравнении с амплитудным коэффициентом внутренней связи μ . Основание для такого допущения содержится в главе 2, где констатируется, что

существует граничное значение амплитуды внешнего сигнала $\lambda \approx \mu S$, при котором амплитуда суммарного вектора обращается в ноль. Для практики имеют смысл режимы с амплитудой внешнего сигнала, не слишком приближающейся к указанному граничному значению. При этом условии скорость, с которой вся векторная конфигурация следует за положением вектора внешнего сигнала, также оказывается невелика в сравнении со скоростью установления взаимной ориентации парциальных векторов внутри конфигурации. В главе 2 было указано, что конфигурация обладает «жесткостью», обеспечивающей равновесное положение парциальных векторов относительно суммарного вектора. Жесткость сохраняется и при наличии расстройки: отклонения парциальных векторов от направлений σ_n (рисунок 4) мало заметны на фоне поворота всей конфигурации. Таким образом, для каждого момента времени угловое положение векторов \mathbf{a}_n определяется по правилу векторного сложения в соответствии с диаграммой (рисунок 1).

В результате уравнение движения фазы суммарного вектора приводится к явному виду

$$\frac{d\varphi_s}{dt} = \Delta\omega + \frac{\lambda}{\tau_k S} \sum_{n=1}^N \frac{\sin(\theta_n - \varphi_s) - T_n \cos(\theta_n - \varphi_s)}{T_n^2 + 1}, \quad (3)$$

где
$$T_n = \operatorname{tg}(\varphi_n - \varphi_s) = \frac{\lambda \sin(\theta_n - \varphi_s)}{\mu S + \lambda \cos(\theta_n - \varphi_s)}.$$

Полученная формула позволяет построить фазовый портрет системы. На рисунке 5 приведен пример фазового портрета системы из четырех связанных автогенераторов, синхронизируемых расщепленным на четыре квадранта внешним сигналом. Скорость движения фазы к устойчивому состоянию определяется возвращающей силой, определяемой правой частью уравнения (3). Изображенная на рисунке 5 кривая имеет периодический характер. Точки пересечения с осью абсцисс, в которых кривая имеет отрицательный наклон, соответствуют устойчивым состояниям системы. Число устойчивых состояний на интервале 2π равно числу АГ.

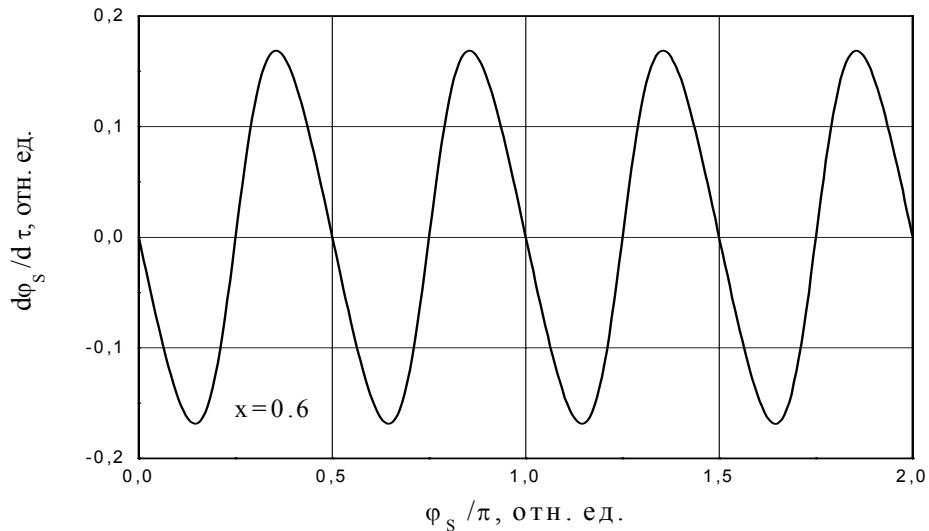


Рисунок 5. – Фазовый портрет системы 4-х автогенераторов

Вблизи устойчивых состояний система подобна по динамике линейному инерционному звену первого порядка. Скорость релаксации к устойчивому состоянию зависит от амплитуды внешнего сигнала. При достаточно малых величинах амплитуды система проявляет фильтрующие свойства по отношению к аддитивным фазовым флуктуациям сигнала и благодаря этому способна выделять практически когерентное колебание. Это обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что система по критерию помехоустойчивости должна асимптотически приближаться к известным когерентным схемам восстановления несущей.

Уравнение (3) позволяет определять стационарные положения суммарного вектора в диапазоне допустимых расстройок, а также определять максимально допустимые расстройки без длительных процедур интегрирования системы (1). Предельная расстройка равна максимуму функции возвращающей силы, определить который не составляет труда. Численные расчеты полосы синхронизации при помощи уравнения (3) подтверждают вывод о степенном характере ее зависимости от амплитуды сигнала. Более того, разложением функции возвращающей силы в ряд по степеням амплитуды сигнала получено непосредственное подтверждение того, что полоса синхронизации пропорциональна амплитуде сигнала в степени N (второе защищаемое положение), а функция возвращающей силы имеет N периодов на интервале 2π .

На основании выводов третьей главы сформулировано защищаемое научное положение об адекватности описания динамики

системы посредством единственной переменной – фазы суммарного вектора и о форме этого описания в виде уравнения (3).

В главе 4 исследование динамического режима распространяется на наиболее важную для практики ситуацию, в которой на систему одновременно воздействуют фазомодулированный сигнал и шум. Поскольку наибольший практический интерес представляла система 2-х автогенераторов, полученные результаты касаются именно ее.

При воздействии на систему сигнала, модулированного по фазе информационным сообщением, ориентация суммарного вектора в режиме выделения подавленной несущей остается неизменной. Однако взаимное расположение векторов колебаний парциальных автогенераторов систематически изменяется. В связи с этим допущение о жесткости векторной конфигурации теряет силу, что ставит под сомнение справедливость уравнения (3). Положение еще более осложняется присутствием аддитивного шума, сравнимого по уровню с сигналом. Определить характер поведения системы при этих условиях позволяет непосредственное интегрирование укороченных уравнений с зависящей от времени правой частью. Соответствующая математическая модель реализована на языке PASCAL. Ее основные компоненты: модель узкополосного шума в виде двух квадратурных составляющих, модель сигнала и модель системы. Дискрет по времени выбирался от 1/10 до 1/20 тактового интервала, что позволяло достаточно точно воспроизводить переходные процессы.

Имитация процесса восстановления подавленной несущей и демодуляции сигнала производилась с целью выявить различия в частоте появления ошибок у исследуемой схемы и у идеального демодулятора с когерентным опорным колебанием. Число ошибок определялось посимвольным сравнением демодулированного сигнала с исходным. Результаты численного расчета приведены на рисунке 6. Сплошная линия соответствует заимствованной из литературы теоретической кривой помехоустойчивости для оптимального когерентного демодулятора, точки – расчету.

Расчетные данные приведены для трех характерных ситуаций. В первой из них в качестве опорного колебания выбиралась идеальная синусоида. Данная ситуация соответствует оптимальному когерентному демодулятору.

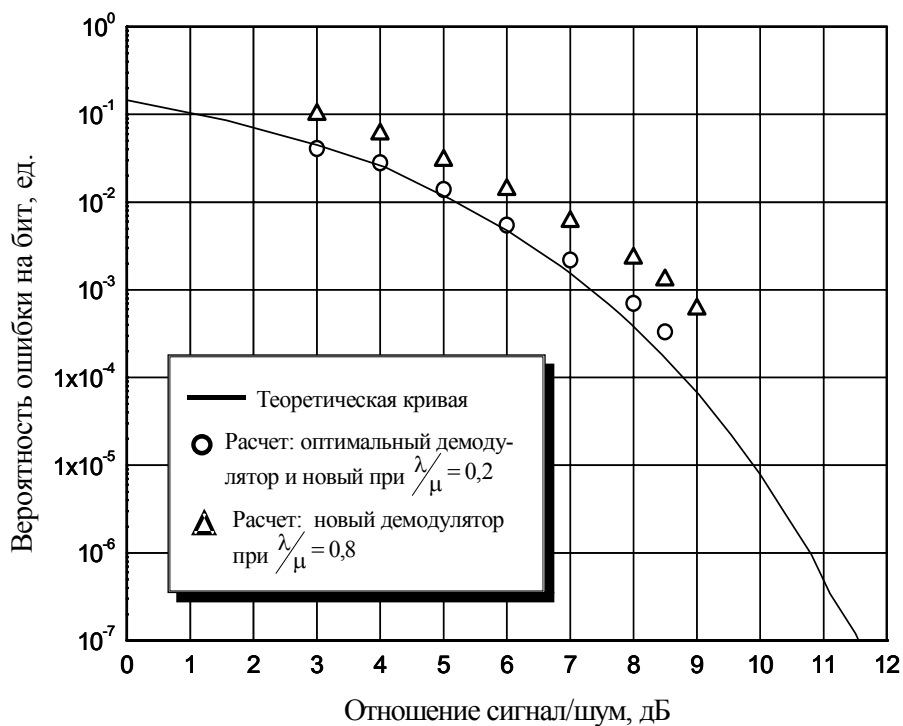


Рисунок 6. – Результаты численного расчета помехоустойчивости нового демодулятора

Полученная кривая ошибок принималась за «эталон», по отношению к которому оценивались характеристики помехоустойчивости исследуемой модели. «Эталонная» кривая несколько отклоняется от теоретической, что можно объяснить конечным числом разрядов в представлении чисел, а также различиями в форме и ширине полосы фильтров, используемых в модели и в теории.

Во второй ситуации в качестве опорного колебания была использована восстановленная несущая при относительной амплитуде внешнего сигнала, значительно меньшей, чем коэффициент амплитудной связи между генераторами. Оказалось, что для первых двух ситуаций расчетные значения коэффициента ошибок при равных прочих условиях различаются менее чем на 1%, в масштабе рисунка данное различие не проявляется. Расчетные точки для двух совпадающих кривых обозначены кружками.

В ходе дальнейших расчетов амплитуду внешнего сигнала постепенно увеличивали. При этом качество восстановления несущей ухудшалось, что проявлялось в монотонном увеличении коэффициента ошибок. Третья ситуация, отражающая эту тенденцию, представлена на рисунке треугольниками.

Удовлетворительное соответствие между теоретическими оценками и численными расчетами помехоустойчивости нового

демодулятора на основе системы связанных автогенераторов подтверждает корректность ее динамической модели и правильность полученных с использованием этой модели качественных выводов.

На основании выводов 4-й главы сформулировано третье защищаемое научное положение об асимптотической близости помехоустойчивости исследуемой схемы к помехоустойчивости классических демодуляторов.

Глава 5 посвящена экспериментальному исследованию фазового демодулятора на основе системы 2-х связанных автогенераторов.

Электрическая схема фазового демодулятора на основе системы связанных АГ приведена на рисунке 7. Схема реализована в диапазоне промежуточных частот малошумящих спутниковых конверторов, конкретное значение рабочей частоты 1200 МГц. Фазовые соотношения определяются отрезками микрополосковых линий.

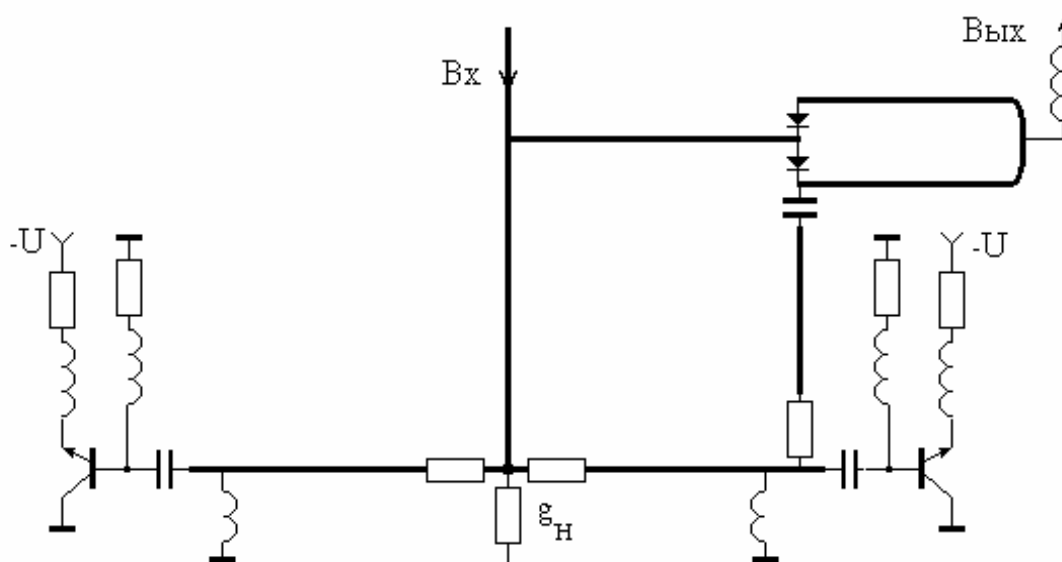


Рисунок 7. – Принципиальная схема фазового демодулятора

Связь между АГ определяется номиналами Т-образно соединенных резисторов. Суммарная длина линии, соединяющей АГ, составляет половину длины волны, что соответствует противофазному режиму взаимной синхронизации. В этом состоит отличие от схемы, исследовавшейся в предшествующих работах, где длина отрезка, соединяющего парциальные автогенераторы, составляла целую длину волны, что соответствовало синфазному режиму. Такая модификация не сказалась на качестве работы схемы, однако, позволила уменьшить ее размеры. Для обоих вариантов в схеме реализовывался режим выделения подавленной несущей

сигнала с двухпозиционной фазовой модуляцией. В указанном режиме схема может находиться в двух равновероятно реализующихся состояниях, различающихся фазой восстановленной несущей. Переход от одного состояния к другому сопровождается инвертированием демодулированного сигнала на выходе схемы. Экспериментально подтверждается, что полоса синхронизации пропорциональна квадрату амплитуды внешнего сигнала. Характерно, что все указанные свойства системы сохраняются при увеличении взаимной связи. При этом в схеме с полуволновой длиной соединительной линии отмечено значительное повышение стабильности собственной частоты по отношению к изменениям температуры и напряжения питания. Это объясняется увеличением добротности резонатора, образованного соединительной линией, в которой нагрузка расположена в узле напряжений и не вносит ощутимых потерь.

Практическое применение исследуемый фазовый демодулятор нашел в приемном комплексе спутникового геомониторинга, созданного на базе Сибирского физико-технического института и кафедры радиофизики ТГУ. Комплекс обеспечивает прием информации с российского спутника «Метеор-3М» и американского спутника TERRA, передающих изображение земной поверхности в различных участках спектра. Сигнал транслируется в диапазоне 8 ГГц с использованием фазовой модуляции. Радиотракт, смонтированный для приемного комплекса, включает: малошумящий конвертор, усилитель-ограничитель ПЧ, фазовый демодулятор, регенератор и имитатор сигнала ПЧ.

При помощи имитатора, позволяющего проводить настройку приемной системы в отсутствие сигнала со спутника, были получены экспериментальные кривые помехоустойчивости нового демодулятора. Изменения проводились с использованием прибора ГК5-83, включающего генератор псевдослучайных последовательностей и анализатор ошибок. Экспериментальные данные приведены на рисунке 8. Для сравнения там же приведена теоретическая кривая помехоустойчивости и результаты расчетов из предыдущей главы. Коэффициент ошибок измерялся с погрешностью 4% при доверительной вероятности 96%. Точность калибровки детектора оценивается в 0,5 дБ. В пределах погрешности совпадение кривых следует считать удовлетворительным, что подтверждает достоверность как теории, так и эксперимента.

Сеансы приема информации с пролетающих спутников проводились в период с марта по октябрь 2005 г. Территория, доступная для наблюдения, простирается от устья Лены и побережья Охотского моря на востоке до Кольского полуострова и Каспийского моря на западе. Характерные примеры полученных изображений приведены на рисунках 9 и 10.

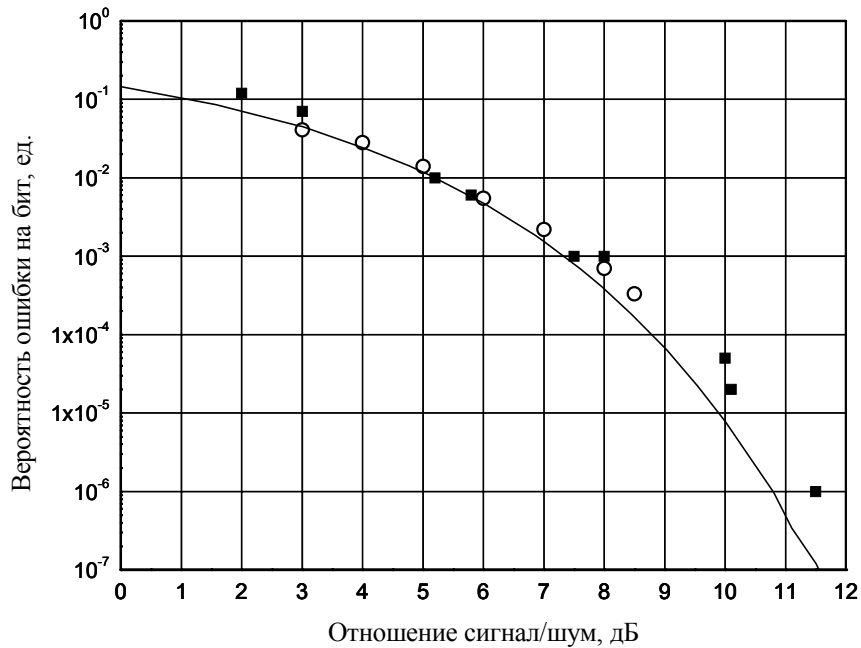


Рисунок 8. – Теоретическая, расчетная и экспериментальная кривые помехоустойчивости нового демодулятора

Таким образом, экспериментальные исследования фазового демодулятора подтвердили соответствие его характеристик теоретическим предпосылкам. Имеются все основания для применения схемы в реальных приемных устройствах, получен первый опыт такого применения в приемнике спутниковых сигналов.

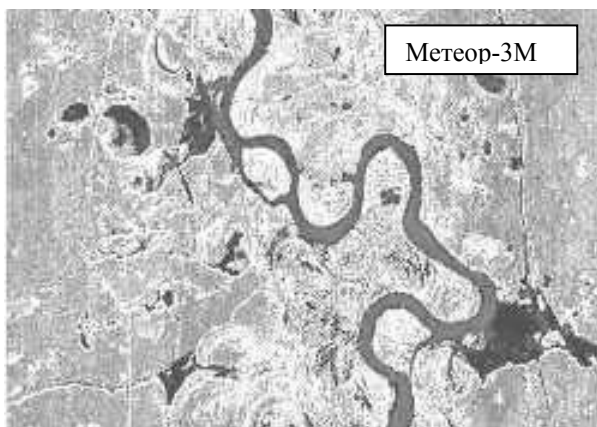


Рисунок 9. – Река Чулым. Разрешение 40 м/пиксель

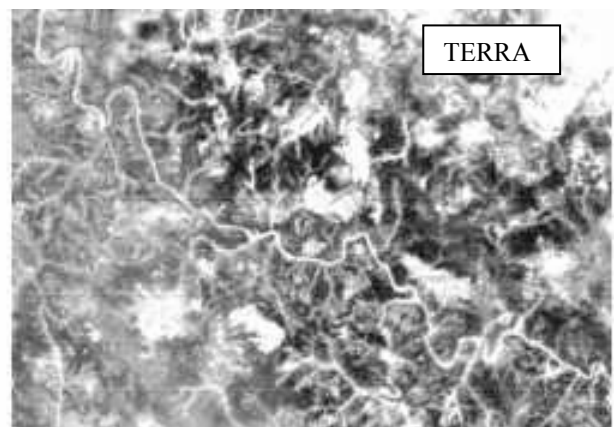


Рисунок 10. – Река Подкаменная Тунгуска. Разрешение 250 м/пиксель

В **Заключении** изложены основные результаты диссертационной работы:

1. Определены области существования **стационарных режимов** системы, инвариантных к дискретным изменениям фазы сигнала. Показано, что максимально допустимое значение амплитуды пропорционально числу автогенераторов в системе N , а полоса синхронизации пропорциональна амплитуде в степени N . В области максимально допустимых значений амплитуды обнаружены гистерезисные зоны.

2. В ходе исследования **динамического режима** системы показано, что ее поведение достаточно адекватно описывается единственным уравнением движения фазы суммарного колебания, содержащим в правой части функцию обобщенной возвращающей силы, имеющую N периодов на интервале 2π . Указано, что фазовый демодулятор на основе исследуемой системы приближается по критерию помехоустойчивости к идеальному демодулятору.

3. Численное исследование **нелинейной динамики** системы подтвердило предположение о высокой помехоустойчивости фазового демодулятора на ее основе. Это свидетельствует о корректности динамической модели, предложенной в теоретической части работы.

4. **Экспериментальные результаты**, полученные в работе, соответствуют теоретическим выводам, подтверждая их достоверность. Для системы двух АГ, связанных длинной линией, показана возможность повышения стабильности собственной частоты в схеме с противофазным режимом взаимной синхронизации. Общим свидетельством работоспособности нового демодулятора и принципов, заложенных при его разработке, являются полученные с его помощью реальные изображения, транслируемые спутниками «Метеор-3М» и TERRA.

В **Заключении** также характеризуются возможные направления продолжения работ.

Основные публикации по теме диссертации

1. Антипов И.В. Схема выделения подавленной несущей на основе системы связанных автогенераторов // Известия вузов. Физика. – 2006. – № 9. Приложение. – С. 246–251.
2. Антипов В.Б., Антипов И.В., Злепушков М.Г. Стационарные режимы в системе связанных автогенераторов, синхронизируемой фазорасщепленным внешним сигналом // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2006. – № 1. – С. 12–19.
3. Антипов В.Б., Антипов И.В., Макаров С.Ф. Динамический режим в системе связанных автогенераторов, синхронизируемой фазорасщепленным внешним сигналом // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2006. – № 2. – С. 3–10.
4. Антипов В.Б., Антипов И.В. Стационарные режимы в системе связанных автогенераторов, синхронизируемой фазорасщепленным внешним сигналом // «Журнал радиоэлектроники»: [Электронный ресурс]. – № 11. – 2003. – Режим доступа: <http://jre.cplire/jre/nov03/2/text.html>, свободный.
5. Антипов В.Б., Антипов И.В., Злепушков М.Г., Макаров С.Ф. Динамический режим в системе связанных автогенераторов, синхронизируемой фазорасщепленным внешним сигналом // «Исследовано в России»: [Электронный ресурс]. – № 10. – 2005. – стр. 99–112. – Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2005/010.pdf>, свободный.
6. Антипов В.Б., Антипов И.В., Макаров С.Ф. Нелинейная динамика системы связанных автогенераторов, синхронизируемой фазорасщепленным внешним сигналом // Исследовано в России: [Электронный ресурс]. – № 13. – 2006. – стр. 125–137. – Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2006/013.pdf>, свободный.
7. Антипов В.Б., Антипов И.В., Тельпуховский Е.Д. Исследование фазового демодулятора на основе системы связанных автогенераторов // Сб. тр. Восьмой Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (май 2002, г. Воронеж). – Воронеж: Изд. ВГУ, 2002. – С. 2176–2181.
8. Антипов И.В., Злепушков М.Г., Антипов В.Б. Стационарные режимы и помехоустойчивость фазового демодулятора на основе системы связанных автогенераторов // Сб. науч. тр. Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Современные проблемы радиоэлектроники» (6–7 мая 2004, г. Красноярск). – Красноярск: Изд. ИПЦ КГТУ, 2004. – С. 354–357.
9. Антипов И.В., Макаров С.Ф. Моделирование динамических процессов в системе связанных автогенераторов, синхронизируемых фазорасщепленным внешним сигналом. – Сб. науч. тр. Седьмой Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Современные проблемы радиоэлектроники» (6–7 мая 2005, г. Красноярск). – Красноярск: Изд. ИПЦ КГТУ, 2005. – С. 97–100.
10. Антипов И.В. Анализ стационарных режимов в системе связанных автогенераторов, синхронизируемой многофазным внешним сигналом // Сб. тез. Девятой Всероссийской научной конференции студентов – физиков и молодых ученых «ВНКСФ – 9» (28 марта – 3 апреля 2003, г. Красноярск). – Красноярск: Изд. АСФ России, 2003. Т. 2. – С. 904–905.
11. Антипов И.В. Динамический режим в системе связанных автогенераторов, синхронизируемых фазорасщепленным внешним сигналом // Сб. тез. Десятой Всероссийской научной конференции студентов – физиков и молодых ученых

- «ВНКСФ – 10» (1 – 7 апреля 2004, г. Москва). – Красноярск: Изд. АСФ России, 2004. Т. 2. – С. 941–942.
12. Антипов И.В., Макаров С.Ф. Нелинейная динамика системы связанных автогенераторов, синхронизируемой фазорасщепленным внешним сигналом // Сб. тез. Одиннадцатой Всероссийской научной конференции студентов – физиков и молодых ученых «ВНКСФ – 11» (24 – 31 марта 2005, г. Екатеринбург). – Екатеринбург: Изд. АСФ России, 2005. – С. 450–451.
 13. Антипов И.В. Фазовый демодулятор с выделителем несущей на основе системы связанных автогенераторов // Восьмая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тез. докл. В 3-х т. – М.: Изд. МЭИ, 2002. Т. 1. – С. 48 – 49.
 14. Антипов И.В. Исследование фазового демодулятора на основе системы связанных автогенераторов // Труды региональной научно-технической школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные проблемы радиотехники (СПР-2001)» (26-30 ноября 2001, г. Новосибирск). – Новосибирск: Изд. НГТУ, 2001. – С. 140 – 141.
 15. Антипов В.Б., Антипов И.В., Тельпуховский Е.Д. Радиооборудование приемной станции системы космомониторинга земной поверхности // Сб. статей молодых ученых «Современные проблемы радиофизики, технологии и инновационного развития» (5-7 февраля 2003, г. Томск). – Томск: Изд. ТГУ, 2003. – С. 146 – 148.
 16. Антипов И.В. Восстановление несущей ФМ-сигнала системой связанных автогенераторов // Материалы Тридцать Девятой международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс». – Новосибирск: Изд. НГТУ, 2001. – С. 34 – 35.
 17. Антипов И.В. Применение фазового демодулятора на основе системы связанных автогенераторов в приемном устройстве системы космомониторинга «Ресурс» // Труды региональной научно-технической школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные проблемы радиотехники (СПР-2003)» (26-28 ноября 2003, г. Новосибирск). – Новосибирск: Изд. НГТУ, 2001. – С. 93 – 95.
 18. Антипов В.Б., Антипов И.В., Федоров Е.В. Исследование функционального узла на основе системы связанных автогенераторов // Тез. докл. международной научно-технической конференции «Электроника и информатика XXI век» (22-24 ноября 2000, г. Зеленоград) – М.: Изд. МИЭТ, 2000. – С. 406 – 407.
 19. Антипов И.В., Злепушков М.Г., Антипов В.Б., Макаров С.Ф. Исследование помехоустойчивости фазового демодулятора на основе системы связанных автогенераторов // Материалы четырнадцатой международной Крымской конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» (13–17 сентября 2004, г. Севастополь). – Севастополь: Изд. «Вебер», 2004. – С. 279– 281.
 20. Антипов И.В., Макаров С.Ф. Новая схема фазового демодулятора и ее применение в системах передачи информации // Сб. тр. Второй международной научно-технической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (7–9 февраля 2006, г. Санкт–Петербург). – Санкт–Петербург: Изд. Политехн. ун-та, 2006. – С. 97–99.