

На правах рукописи

БАШМАКОВ Михаил Вячеславович

**СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИСКРЕТНЫХ СФС В
УСЛОВИЯХ КОМБИНИРОВАННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства
радионавигации, радиолокации и телевидения

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва – 2001

Работа выполнена в Ярославском государственном университете им. П.Г. Демидова на кафедре динамики электронных систем

Научный руководитель

д.т.н., доцент Казаков Л.Н.

Официальные оппоненты

д.т.н., Лауреат государственной премии,
профессор Шахтарин Б.И.

к.т.н., Лауреат государственной премии,
профессор Капранов М.В.

Ведущее предприятие

Институт криптографии, связи и
информатики Академии ФСБ России

Защита диссертации состоится " 17 " января 2002 г. в 15.30
в аудитории А-402 на заседании диссертационного совета Д-212.157.05
Московского энергетического института (Технического Университета) по
адресу: г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 17.

Отзыв, заверенный печатью, просим направлять по адресу: 111250,
Москва, Е-250, ул. Красноказарменная, д.14, Ученый Совет МЭИ.

С диссертацией можно познакомиться в библиотеке МЭИ.

Автореферат разослан " 28 " ноября 2001 г.

Ученый секретарь

диссертационного Совета

кандидат технических наук, доцент

Т.И. Курочкина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие современных систем и устройств радиотехники и связи, техники управления, радиолокации и навигации, радио и информационно-измерительных комплексов невозможно без широкого применения систем фазовой синхронизации (СФС). Круг задач, решаемых этими системами, весьма обширен: слежение за несущими и поднесущими частотами принимаемых сигналов, когерентная демодуляция аналоговых и цифровых сигналов с частотной и фазовой модуляцией, синхронизация и демодуляция двоичных символов цифровой информации, измерение частоты и фазы сигналов, тактовая синхронизация, синтез сложных радиотехнических сигналов, синтез сетки высокостабильных частот, стабилизация частот генераторов различных диапазонов.

В последние годы интенсивно проводятся исследования в области систем фазовой синхронизации с элементами дискретизации, что связано с совершенствованием элементной базы микроэлектроники и ростом рабочих частот. Переход на новые технологии существенно расширил возможности систем фазовой синхронизации и повысил эффективность устройств на их основе. Выбором структуры колец и входящих в них узлов появилась возможность создавать варианты систем, обладающих требуемыми характеристиками по точности и надежности работы, быстродействию, помехоустойчивости для различных типов входных сигналов и законов модуляции. За счет усложнения режимов работы колец стало реальностью создание гибких алгоритмов обработки информации, оптимизации параметров и характеристик.

Большой интерес последнее время вызывает поведение систем в условиях помеховых воздействий. Анализ реакции на действие помех достаточно важен для практики. Во многом именно помеховая обстановка определяет точностные характеристики системы. При этом статистические моменты фазовой и частотной ошибок слежения не дают полной информации о поведении СФС. Поскольку СФС – существенно нелинейная система, то в ряде случаев необходимо знание плотностей распределения вероятностей (ПРВ) ее переменных состояния. Особенностью СФС по сравнению с рядом других систем (не фазовых) является существование множества устойчивых состояний равновесия, а в отдельных предельных случаях и устойчивых периодических движений 1-го и 2-го рода, что еще более усложняет картину при действии шумов. Ситуация становится еще более сложной, если на вход системы кроме шумового воздействия поступает помеха в виде детерминированного сигнала с неизвестными параметрами. В качестве последнего может выступать помеховый сигнал, по структуре повторяющий полезный.

Учет такого комбинированного воздействия в ряде случаев может иметь важное практическое значение, в частности при ответе на вопрос об

эффективности функционирования СФС в условиях сосредоточенной по частоте помехи. Сегодня подобная задача крайне актуальна по причине непрерывно расширяющегося числа одновременно работающих радиосредств. Примером могут служить помехи по основному каналу приема, характерные для систем подвижной связи, повторно использующих одни и те же частоты при формировании сотового частотного режима (соканальные помехи).

Как и для любой следящей системы, для СФС важным вопросом является анализ срыва слежения. Под срывом слежения в СФС следовало бы понимать переход траектории движения из области притяжения одного устойчивого состояния равновесия в область притяжения другого устойчивого состояния равновесия или устойчивого периодического движения. Однако традиционно решается задача о достижении марковским случайным процессом, описывающим траекторию движения системы, некоторой заданной границы. Это связано с тем, что в исходной постановке сталкиваются с трудностями, вызванными необходимостью рассматривать решение соответствующих уравнений на всей плоскости переменных состояния, что с использованием численных методов возможно лишь для систем 1-го порядка.

Следует отметить, что явление срыва слежения может оказать существенное влияние на работоспособность СФС и привести к резкому увеличению ошибок по частоте. Это в первую очередь важно в доплеровских фазовых системах и становится особенно актуальным в условиях комбинированных воздействий. Даже, если отсутствует детерминированная помеха, но входной полезный сигнал изменяется по частоте (например, случай ЧМ-колебания), вероятность срыва слежения может существенно возрасти.

Основы теории исследования статистических характеристик СФС с использованием их марковских моделей заложили Р.Л. Стратонович и В.И. Тихонов. Значительный вклад в теорию синхронизацию при наличии шумов внесли Б.И. Шахтарин, В. Линдсей, А. Витерби, Дж. Холмс, В.Д. Шалфеев, Н.Н. Удалов, В.Н. Белых, В.Н. Кулешов, В.Д. Разевиг, В.В. Шахгильдян, А. Вайнберг и другие. Если теория аналоговых стохастических систем сегодня достаточно развита, то теория дискретных систем, несмотря на повышенное внимание к ней, развита существенно в меньшей степени. Применительно к аналоговым системам можно говорить о законченных исследованиях как систем 1-го так 2-го порядков, в случае систем дискретного времени речь может идти лишь о законченных исследованиях в лучшем случае для систем 1-го порядка. Хотя и этой теме посвящено немало работ. Среди них исследования, выполненные М.И. Жодзишским, В.Н. Кулешовым, В.В. Шахгильдяном, Б.И. Шахтариним, В.Н. Белыхом, В.П. Сизовым, Д. Холмсом, Д. Джиллой, Х. Осборном, С. Гуптой.

Исследованиям СФС в условиях даже простейших детерминированных помех посвящено ограниченное число работ, среди которых

следует отметить работы Б.И. Шахтарина и его учеников. К числу этих работ следует отнести исследования, выполненные автором диссертации.

Подобную ситуацию можно объяснить следующими причинами. Во-первых, представляет собой достаточно серьезную проблему переход от исходных стохастических уравнений 2-го и выше порядков к марковским моделям, не существует общей методики перехода; ситуация значительно усложняется в условиях комбинированных воздействий. Во-вторых, необходимо обеспечить строгий переход от марковской модели к векторному уравнению Колмогорова-Чепмена, корректно построив условную плотность вероятности перехода; сложность вызвана периодическим характером фазового пространства по фазовой координате и, соответственно, необходимостью отыскания инвариантных движений в пространстве. До сих пор корректно данную задачу даже в случае простейших воздействий решить в большинстве случаев не удавалось. В-третьих, задача о среднем времени до срыва слежения имеет особенную постановку, что вызвано необходимостью использования подвижных границ, относительно которых рассматривается срыв слежения. В традиционной постановке эти границы фиксированы. Даже наличие простого сигнала без помехи, но с изменяющейся частотой, существенно усложняет решение задачи о срыве. Наконец, в-четвертых, необходимость анализа двумерной плотности распределения вероятности, особенно в задаче о срыве слежения с подвижными границами приводит к значительным вычислительным трудностям, что требует разработки новых эффективных численных методов решения уравнений Колмогорова-Чепмена, так и новых алгоритмов определения статистических характеристик времени срыва.

Таким образом, критический анализ работ, претендующих на достаточно строгие и полные исследования статистических характеристик дискретных СФС 2-го показал, что число таких работ достаточно ограничено. Отсутствие эффективных методов исследования, а следовательно, и методик расчета статистических характеристик, особенно в условиях сложных комбинированных воздействий, сдерживает широкое распространение их на практике. С одной стороны, большая практическая потребность в высокоэффективных системах синхронизации, с другой стороны, отсутствие достаточно полной информации о поведении таких систем в реальной помеховой обстановке, отсутствие информации об потенциальных возможностях СФС приводят к необходимости разработки как прикладных методов анализа статистических характеристик дискретных СФС, так и проведения исследований с помощью этих методов конкретных моделей СФС для технических приложений.

В связи с вышеизложенным тема диссертации, посвященная разработке методов и анализу статистических характеристик дискретных систем фазовой синхронизации с применением этих методов, является актуальной.

Цели и задачи диссертации

Целью диссертационной работы является разработка методов анализа дискретных систем фазовой синхронизации, позволяющих проводить расчет статистических характеристик импульсных и цифровых СФС с учетом комбинированных воздействий в виде аддитивной смеси полезного сигнала, детерминированной помехи и гауссовского шума.

Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие основные задачи:

1. Построение математических моделей ряда дискретных СФС с многоуровневым квантованием в форме марковских моделей.
2. Разработка методики перехода к векторному уравнению Колмогорова–Чепмена, учитывающего периодический характер фазовой координаты.
3. Разработка алгоритмов отыскания инвариантных движений в пространстве с целью построения условной плотности вероятности перехода.
4. Разработка методики определения характеристик среднего времени до срыва слежения в условиях переменных границ.
5. Разработка эффективных алгоритмов численного решения уравнения Колмогорова-Чепмена и поиска оценки среднего времени до срыва.
6. Получение и анализ одномерной и двумерной плотности распределения вероятности, характеристик среднего времени до срыва слежения ряда дискретных СФС 1-го и 2-го порядка с различными фильтрами в канале управления (пропорционально-интегрирующий и астатический) для различных полезных и помеховых воздействий.
7. Разработка модуля цифровой СФС с квадратурным преобразователем на входе на основе сигнального процессора ADSP - 2181 с целью проверки полученных теоретических результатов и определения предельных возможностей процессора для реализации синхронно-фазовых демодуляторов.

Общая методика исследований

Разрабатываемые в диссертации методы анализа статистических характеристик дискретных СФС базируются на общих положениях качественных методов теории дискретных систем с периодическими нелинейностями, теории точечных отображений и разностных уравнений, теории марковских процессов и цепей.

Для решения поставленных задач используются также компьютерное моделирование, численное решение нелинейных стохастических разностных уравнений.

Разработанные методы и алгоритмы анализа статистических характеристик дискретных, в том числе цифровых, СФС ориентированы на использование персональных компьютеров.

Научная новизна результатов

1. Получены эквивалентные функциональные схемы и марковские модели ряда дискретных СФС для случая комбинированных воздействий в виде смеси полезного колебания, детерминированной помехи и широкополосного гауссовского шума.

2. На основе общих положений качественных методов исследования дискретных СФС в фазовом пространстве разработана методика определения инвариантных движений, необходимых для построения условной плотности вероятности.

3. Предложена методика численного решения векторного уравнения Колмогорова-Чепмена с учетом комбинированных воздействий на входе.

4. Разработана методика определения среднего времени до срыва слежения для случая подвижных границ для различных типов входных полезных и помеховых воздействий.

5. С учетом разработанных методов предложены алгоритмы получения и анализа статистических характеристик ряда дискретных систем в условиях комбинированных воздействий: плотности распределения вероятности, дисперсии фазовой ошибки слежения, пороговых кривых, среднего времени до срыва слежения и его дисперсии.

6. На основе разработанных методик и алгоритмов создано оригинальное программное обеспечение для анализа статистических характеристик различных дискретных систем фазовой синхронизации.

7. С помощью разработанных методик и алгоритмов выполнено исследование статистических характеристик дискретных СФС. В отношении ряда систем получены уточняющие по сравнению с известными результаты (за счет применения более эффективных методик). Ряд исследований выполнен впервые, это касается в первую очередь СФС 2-го порядка с комбинированным воздействием. В процессе исследований установлен ряд новых качественных особенностей дискретных СФС, обусловленных характером воздействия.

Практическая ценность

1. В диссертации разработаны методики исследования, позволяющие определить основные статистические характеристики различных дискретных СФС. Разработаны алгоритмы для расчета статистических характеристик; созданные автором пакеты программ апробированы на ряде предприятий: МГТУ им. Баумана г. Москва, Институте криптографии, связи и информатики Академии ФСБ России, ЯрГУ г. Ярославль.

2. Разработанные программы позволяют оптимизировать параметры фильтра в цепи управления с целью обеспечения заданных статистических свойств дискретных СФС в условиях комбинированных воздействий.

3. Полученные в диссертации результаты позволили сформулировать предложения по повышению эффективности разрабатываемых дискретных

СФС, включая цифровые, функционирующие в условиях сложной помеховой обстановки.

4. Предложенные и развитые в диссертации методики и разработанные на их основе алгоритмы и программы можно использовать в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах для анализа статистических свойств дискретных систем синхронизации и синтеза дискретных систем синхронизации различного назначения.

5. Разработанный в диссертации модуль цифрового синхронно-фазового демодулятора на основе сигнального процессора ADSP-2181, созданное программное обеспечение по управлению модулем в комплексе с персональным компьютером позволили реализовать ряд алгоритмов, оптимизирующих поведение системы при наличии анализа текущего состояния и возможности корректировки параметров системы. Подобный подход перспективен для создания адаптивных цифровых систем на основе сигнальных процессоров.

Часть материалов, включая разработанное программное обеспечение, используется в учебном процессе Института криптографии, связи и информатики Академии ФСБ России, МГТУ им. Баумана г. Москва, ЯрГУ г. Ярославль.

Положения, выносимые на защиту

1. Эквивалентные функциональные схемы и марковские модели ряда дискретных СФС для случая комбинированных воздействий в виде смеси полезного колебания, детерминированной помехи и широкополосного гауссовского шума.

2. Методика определения инвариантных движений, необходимых для построения условной плотности вероятности, полученная на основе общих положений качественных методов исследования дискретных СФС в фазовом пространстве.

3. Методика численного решения векторного уравнения Колмогорова-Чепмена с учетом комбинированных воздействий.

4. Методика определения среднего времени до срыва слежения для случая подвижных границ для различных типов входных полезных и помеховых воздействий.

5. Алгоритмы анализа статистических характеристик ряда дискретных систем в условиях комбинированных воздействий: плотности распределения вероятности, дисперсии фазовой ошибки слежения, пороговых кривых, среднего времени до срыва и его дисперсии.

6. Оригинальное программное обеспечение для анализа статистических характеристик различных дискретных систем фазовой синхронизации, созданное на основе языка программирования высокого уровня C++.

7. Результаты исследования статистических характеристик ряда дискретных СФС 2-го порядка с различными фильтрами в цепи управления для различных полезных и помеховых воздействий.

8. Модуль цифрового синхронно-фазового демодулятора с квадратурным преобразованием на входе на основе сигнального процессора ADSP-2181 и результаты исследования статистических характеристик модуля.

Апробация результатов. Результаты диссертации прошли апробацию на ряде международных и российских конференций и семинаров. Среди них международная конференция по цифровой обработке и ее применению, Москва, 1999 г., Всероссийские науч.-тех. конференции по динамике дискретных электротехнических и электронных систем, г. Чебоксары, 1999, 2001 г.г., Всероссийская конференция "Проблемы синхронизации третьего тысячелетия", г. Ярославль, 2000 г., Юбилейная науч.-тех. конференция, посвященная 30-летию ЯрГУ, г. Ярославль, 2000 г., LVI научная сессия НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио Москва, 2001 г., IV международная конференция – ПТСПИ"2001, г. Владимир, 2001 г., международная конференция IEEE/ISS-2001, С.Петербург, 2001 г., международный семинар "Системы синхронизации в технике и связи", г. Одесса, 2001 г., 7-я международная конференция "Теория и техника передачи, приема и обработки информации", г. Харьков, 2001 г., международная конференция, посвященная 100-летию А.А. Андропова, г. Н.Новгород, 2001 г.

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в работах [1-23].

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем составляет 220 страниц, из них 30 страниц приложений, 4 акта о внедрении, 99 иллюстраций.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы и ее практическая значимость, сформулированы цели и задачи исследования, дан критический анализ работ в области исследования динамических характеристик различных классов дискретных систем фазовой синхронизации.

В первой главе построены математические модели в форме разностных стохастических уравнений для трех типов дискретных СФС в условиях комбинированных входных воздействий. К их числу относятся цифровые СФС с равномерной и неравномерной дискретизацией. Для каждого типа предложены эквивалентные функциональные схемы. Функциональная схема для СФС с равномерной дискретизацией приведена на рис. 1.

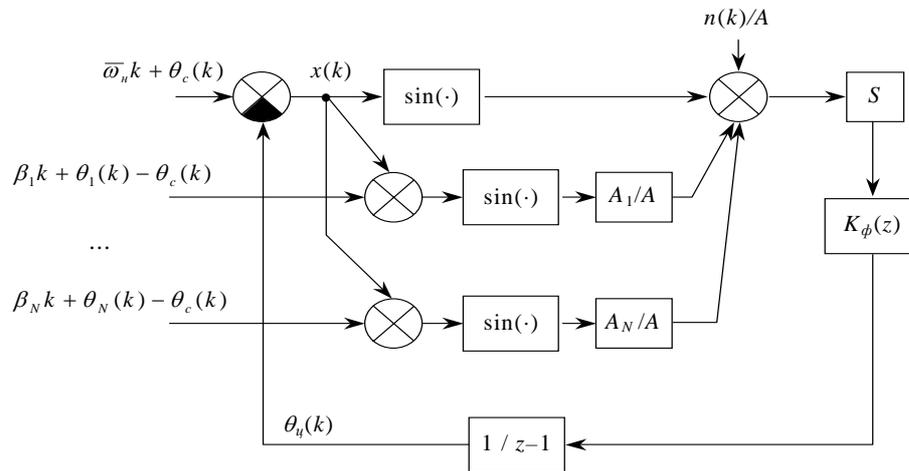


Рис. 1.

Анализ схем позволил свести математическое описание рассматриваемых систем к общему стохастическому уравнению 2-го порядка вида:

$$\begin{aligned}
 x(k+2) = & (1-b_1)x(k+1) + b_1x(k) + (1+b_1)\bar{\omega}_n + \theta_c(k+2) + (b_1-1)\theta_c(k+1) - b_1\theta_c(k) - \\
 & - a_0S \left(\sin x(k+1) + \frac{n(k+1)}{A} + \sum_i \frac{A_i}{A} \sin(x(k+1) + (k+1)\beta_i + \theta_i(k+1) - \theta_c(k+1)) \right) - \\
 & - a_1S \left(\sin x(k) + \frac{n(k)}{A} + \sum_i \frac{A_i}{A} \sin(x(k) + \beta_i k + \theta_i(k) - \theta_c(k)) \right).
 \end{aligned} \quad (1)$$

где $x(k)$ – отсчеты фазового рассогласования; $\bar{\omega}_n$ – начальная частотная расстройка; A – амплитуда полезного сигнала; $\theta_c(k)$ – закон изменения фазы полезного колебания; a_0, a_1, b_1 – параметры цифрового фильтра в канале управления; S – коэффициент усиления кольца; $A_i, \beta_i, \theta_i(k)$ – амплитуда, частотная расстройка и закон изменения фазы i -й составляющей детерминированной помехи; $n(k)$ – шумовые отсчеты.

Вторая глава посвящена разработке методики исследования статистических характеристик фазовой ошибки дискретных СФС 2-го порядка в условиях комбинированных воздействий и анализу полученных на основе применения этой методики результатов для различных входных воздействий и типов фильтра в цепи управления. Необходимость разработки методики вызвана особенностями поведения дискретных систем с периодической нелинейностью. При этом фазовое пространство СФС 2-го порядка является цилиндрическим.

Для решения задачи предложен переход к новым переменным состояния, в которых система разностных уравнений дискретной СФС описывает марковскую последовательность. Полученная система уравнений и уравнение Колмогорова–Чепмена для двумерной плотности вероятности, в котором учтена ограниченность одной из переменных состояния, имеют вид:

$$\begin{cases} u_1(k+1) = \frac{d}{\gamma}u_1(k) - \frac{1}{\gamma}u_2(k) + \mu + \frac{\gamma}{d(\gamma-d)(\gamma-1)}\tilde{r}(k), \\ u_2(k+1) = \frac{d(\gamma-d)(\gamma-1)}{\gamma}u_1(k) + \frac{\gamma+d\gamma-d}{\gamma}u_2(k) - K\gamma \sin u_2(k) + \\ + d\mu - K_1\gamma \left\{ n(k) + \sum_i A_i \sin(u_2(k) + k\beta_i + \theta_i(k) - \theta_c(k)) \right\} \end{cases} \quad (2)$$

и

$$\begin{aligned} W_{k+1}(u_1, u_2) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi c^2 d^2}} \times \\ &\times \sum_{k=-\infty}^{\infty} \int_{-T_2}^{T_2} w_k \left(\frac{1}{d}[\gamma\{u_1 + T_1 k\} + v_2 - \mu\gamma - \frac{\gamma^2}{d(\gamma-d)(\gamma-1)}\tilde{r}(k)], v_2 \right) \times \\ &\times \exp \left\{ -\frac{1}{2c^2\gamma^2} \left[u_2 - (\gamma-d)(\gamma-1)\{u_1 + T_1 k\} - \gamma v_2 + K\gamma \sin v_2 - \mu\gamma(1+ \right. \right. \\ &\left. \left. + d - \gamma) + K_1\gamma \sum_i A_i \sin(v_2 + k\beta_i + \theta_i(k) - \theta_c(k)) + \frac{\gamma}{d}\tilde{r}(k) \right]^2 \right\} dv_2 \end{aligned} \quad (3)$$

где $\tilde{r}(k)$ отвечает за изменение фазы полезного колебания, T_1 и T_2 являются интервалами периодичности преобразованных координат, μ – величина, пропорциональная начальной частотной расстройке, K, K_1 – параметры системы, d, γ – параметры цифрового пропорционально–интегрирующего фильтра, c^2 – дисперсия пересчитанного шума.

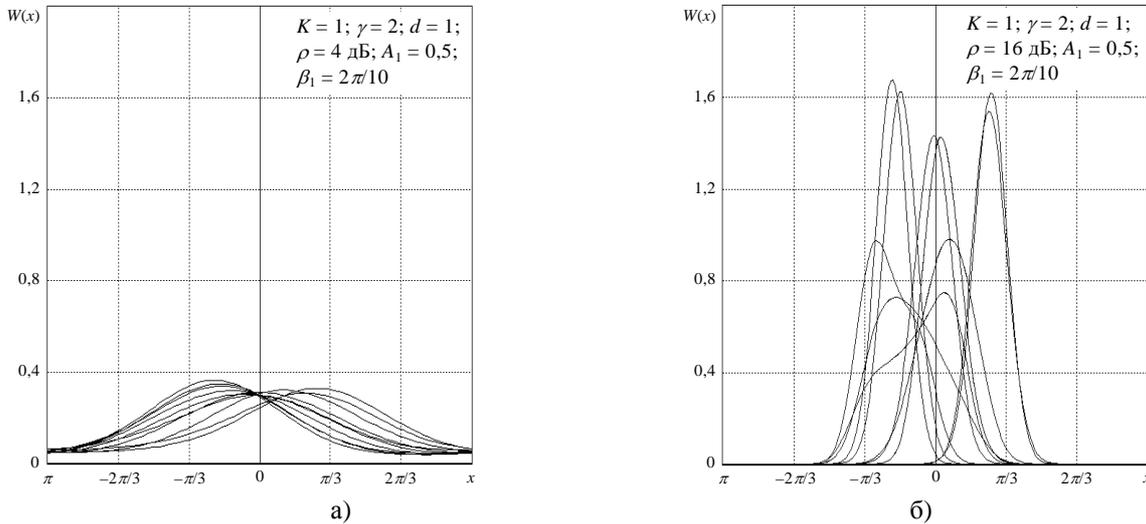


Рис. 2.

Для уравнения вида (3) предложен эффективный численный метод решения, учитывающий характер воздействия и особенности свертывания плотностей вероятности. С использованием метода получены одномерные и двумерные плотности вероятности фазовой ошибки дискретной СФС 2-го порядка для различных воздействий в виде аддитивной смеси полезного сигнала, близкой по структуре помехи и широкополосного гауссового шума, статистические моменты фазовой ошибки, пороговые кривые. Пример расчета

одномерной ПРВ для постоянного по частоте полезного колебания и расстроенной гармонической помехи приведен на рис. 2.

В третьей главе исследуется срыв слежения в дискретных СФС 1-го и 2-го порядков. Особенность решения данной задачи вызвана характером входных воздействий. Наличие изменяющейся во времени входной частоты, вызванной угловой модуляцией или наличием помех, приводит к двум факторам, которые не рассматриваются при традиционном решении данной задачи. Во-первых, становится нестационарной условная ПРВ; во-вторых, положение поглощающих границ, относительно которых рассматривается срыв слежения, также меняется во времени (рис.3а). Это вынуждает отказаться от стандартного подхода при расчете вероятности срыва. В главе предлагается методика, основанная на предположении кратности периода изменения частоты входного воздействия и интервала дискретизации системы. В результате удастся получить рекуррентное выражение для вероятности срыва и в конечном итоге перейти к интегральному уравнению Фредгольма 2-го рода для моментов времени до срыва слежения.

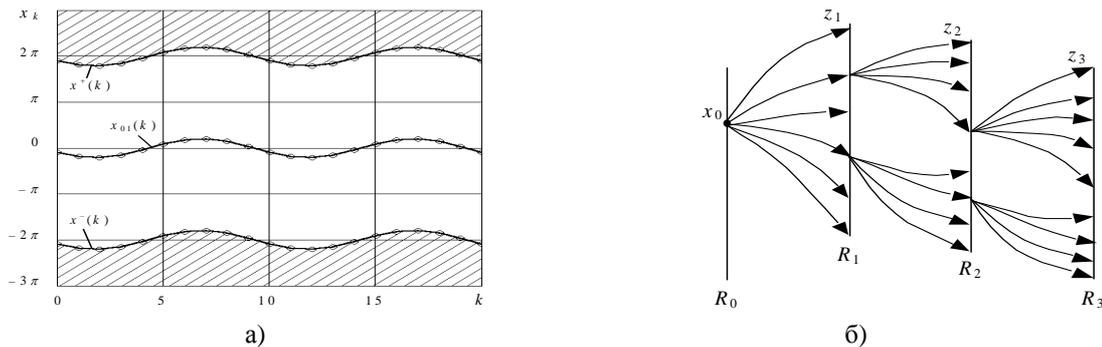


Рис. 3

Согласно предложенной методике вероятность срыва на $(k+1)$ -м периоде изменения входной частоты для двукратного отношения периодов имеет вид:

$$d_{2(k+1)}(x_0) = \int_{R_1} \int_{R_2} d_{2k}(z_2) q_1(z_2 | z_1) dz_2 q_0(z_1 | x_0) dz_1, \quad (4)$$

где R_1, R_2 – переменные интервалы, определяющие срыв слежения (рис.3б); $q_1(z_2 | z_1), q_0(z_2 | z_1)$ – условные ПРВ в различные моменты времени.

В этом случае выражения для статистических моментов времени до срыва слежения h -го порядка будут иметь вид:

$$m_{h,2}(x_0) = \sum_{i=1}^{\infty} (2i)^h d_{2i}(x_0). \quad (5)$$

Уравнение Фредгольма 2-го рода:

$$m_2(x_0) = 2 + \int_{R_1} \int_{R_2} m_2(z_2) q_1(z_2 | z_1) q_0(z_1 | x_0) dz_2 dz_1. \quad (6)$$

В главе получены выражения для произвольного дробно-рационального отношения периода частоты входного воздействия и интервала дискретизации.

На рис. 4 приведены примеры расчета среднего времени до срыва

слежения для различной интенсивности гармонической помехи A_1 и различных коэффициентов усиления в кольце СФС 1-го порядка: $K = 1$ (а), $K = 0,5$ (б).

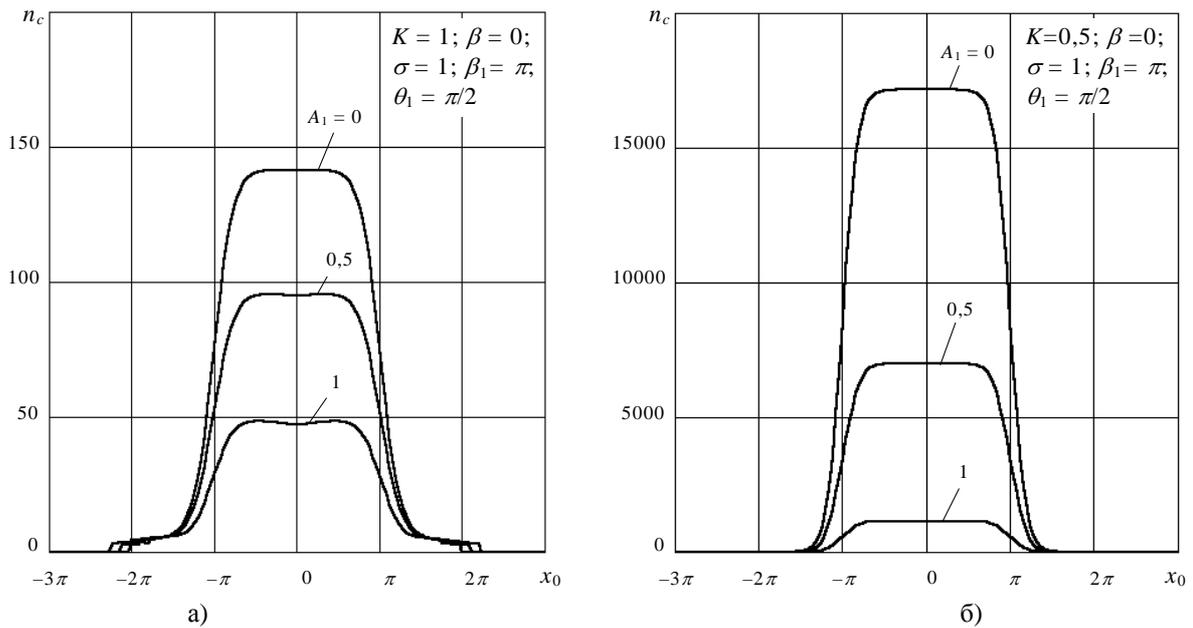


Рис. 4

В главе также предлагается модифицированная методика расчета моментов времени до срыва слежения для СФС 2-го порядка в случае фиксированных поглощающих границ, учитывающая результаты 2-ой главы.

Четвертая глава посвящена проверке основных результатов теоретических исследований, полученных в предыдущих главах диссертационной работы, и уточнению ряда результатов, вызванных учетом допущений, сделанных при выводе математических моделей исследованных типов СФС. С этой целью разработан аппаратно-программный комплекс, в состав комплекса входит персональный компьютер со специальным двухканальным устройством ввода-вывода информации, модуль цифровой СФС на основе сигнального процессора ADSP 2181, узел сопряжения компьютера с цифровым модулем. Аппаратно-программный комплекс может функционировать в различных режимах: в режиме компьютерной модели заданной структуры СФС, работающей в реальном или "модельном" времени; в режиме цифрового модуля, реализующего структуру конкретного типа СФС; режиме совместного функционирования цифрового модуля и контрольно-измерительного блока, реализованного на основе компьютера. Последний режим предполагает оптимизацию программного обеспечения процессора ADSP 2181 и контрольно-измерительного блока. В главе выполнен комплекс экспериментальных исследований для различных входных воздействий, по результатам которых сформулированы предложения по реализации цифровых СФС на основе сигнальных процессор серии ADSP 2100, включая вопросы оптимизации программного обеспечения.

В заключении подведены итоги диссертации и показаны направления дальнейшего развития идей, предложенных в работе.

В приложении приведены блоки программ для расчета двумерной и одномерной плотностей распределения вероятностей фазовой ошибки, фрагменты программы для сигнального процессора ADSP 2181, функционирующего в режиме цифрового синхронно-фазового демодулятора, акты о внедрении результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате проведенных в диссертационной работе теоретических и экспериментальных исследований получены следующие основные результаты:

1. Построены математические модели в форме стохастических разностных уравнений для двух классов дискретных систем фазовой синхронизации для случая комбинированных воздействий, представляющих собой аддитивную смесь полезного колебания с угловой модуляцией, детерминированной помехи в виде ряда из N гармонических составляющих с произвольным законом изменения фазы и гауссовского шума. Уравнения написаны в терминах разности полной фазы входного полезного колебания и полной фазы выходного колебания.

2. Для СФС с обоими типами дискретизации получена общая эквивалентная функциональная схема, согласно которой шумовое воздействие пересчитывается на выход фазового детектора в виде аддитивной широкополосной гауссовской составляющей. Учет гармонических составляющих помехи эквивалентен введению N параллельных основному фазовых детекторов, ко входу каждого из которых дополнительно подсуммируются разности полных фаз соответствующей составляющей ряда помехи и полезного колебания.

3. Предложена методика перехода от стохастического разностного уравнения, описывающего статистическую динамику дискретной СФС 2-го порядка, к системе уравнений, описывающей простую марковскую последовательность. Для корректного перехода к интегрированию в конечных пределах в уравнении Колмогорова-Чепмена разработана методика расчета плотности распределения вероятности, учитывающая инвариантность состояний в фазовом пространстве. С учетом ее получено несколько вариантов уравнения Колмогорова-Чепмена для различных входных воздействий и фильтров в кольце СФС.

4. Для численного решения уравнения Колмогорова-Чепмена предложена оригинальная замена исходных переменных, позволяющая значительно повысить эффективность расчетов. Особенность замены переменных связана с получением фазового цилиндра в новых координатах, ориентированного вдоль одной из координат. С учетом предложенного преобразования координат и инвариантности движений в фазовом пространстве разработана методика перехода от двумерной плотности распределения вероятности фазовой ошибки к одномерной.

5. На основе численного решения уравнения Колмогорова-Чепмена с помощью предложенных методик получены и проанализированы зависимости для переходных и установившихся нестационарных и усредненных по времени одномерных ПРВ фазовой ошибки для различных типов входных воздействий. Исследования выполнены в зависимости от параметров системы, интенсивности помехи, частотных расстройек составляющих детерминированной помехи относительно частоты полезного сигнала.

6. С использованием одномерной ПРВ фазовой ошибки рассчитаны и проанализированы среднее значение фазовой ошибки, дисперсия, пороговые кривые для различных типов входных воздействий. Для расчета выходного отношения сигнал–шум использовано выражение, учитывающее шумовую составляющую фазовой ошибки, помеховую составляющую и динамическую составляющую, обусловленную инерционностью СФС.

7. С помощью разработанной методики расчета двумерной ПРВ фазовой ошибки исследованы квазипериодические режимы систем при наличии на входе шумового воздействия, характерные для предельных режимов дискретных СФС, когда в автономном режиме наряду с состоянием квазисинхронизма существует несколько устойчивых циклических движений 1-го и 2-го рода. Исследованы временные зависимости установления ПРВ в зависимости от областей притяжения устойчивых движений, начальных условий и интенсивности шумового воздействия.

8. Предложена методика построения интегральных уравнений Фредгольма 2-го рода для расчета моментов времени до срыва слежения в дискретной СФС 2-го порядка при наличии на входе гармонического колебания и шума. Также получены рекуррентные выражения для вероятности срыва слежения на заданном шаге, с помощью которых также можно вычислить характеристики времени до срыва. С использованием разработанной методики построены и проанализированы зависимости среднего времени до срыва слежения в дискретных СФС 2-го порядка для различных параметров системы и входного воздействия.

9. Предложена методика построения интегрального уравнения Фредгольма 2-го рода для нестационарной плотности вероятности перехода и подвижных поглощающих границ, относительно которых рассматривается срыв слежения. Методика основана на предположении кратности периода изменения входной частоты и интервала дискретизации. Получены рекуррентное выражение для вероятности срыва и интегральное уравнение Фредгольма 2-го рода для моментов времени до срыва в СФС 1-го порядка.

10. С помощью полученных уравнений построены и проанализированы зависимости среднего времени до срыва слежения для случая воздействия сигнала с угловой модуляцией при отсутствии детерминированной помехи, а также гармонического сигнала при наличии гармонической помехи. Установлены основные причины, вызывающие

уменьшение среднего времени до срыва слежения.

11. Разработан аппаратно–программный комплекс для исследования цифровых СФС. В состав комплекса входит написанная автором диссертации универсальная программа для моделирования цифровых схем. Вторая часть комплекса предназначена для разработки и исследования цифровых устройств на базе сигнального процессора. В ее состав входит цифровой модуль на базе цифрового сигнального процессора ADSP–2181, блок формирования двухканального аналогового сигнала произвольной структуры, персональный компьютер для управления вышеперечисленными устройствами и обработки полученной из отладочного модуля информации, комплект специализированного программного обеспечения для сигнального процессора и персонального компьютера.

12. На базе сигнального процессора реализована цифровая СФС с квадратурным аналого–цифровым преобразованием на входе, работающая в режиме синхронно–фазового демодулятора. Получены экспериментальные зависимости ряда статистических характеристик цифровых СФС 1–го и 2–го порядков для различных комбинированных воздействий. Экспериментальные результаты подтвердили основные теоретические положения, сформулированные по итогам выполненных исследований.

13. Продемонстрированы возможности процессора ADSP–2181 при реализации цифровых СФС в реальном времени дополнительно выполнять за счет оптимизации программного обеспечения расчеты статистических характеристик входных и выходных сигналов СФС, включая среднее значение, дисперсию, одномерную плотность распределения вероятности.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ

1. Башмаков М.В., Захаров Д.Е., Казаков Л.Н. Анализ выходного сигнала цифрового синхронно-фазового демодулятора при наличии на входе гармонической помехи // Современные проблемы радиофизики и электроники: Юб. сб. науч. тр. / Яросл. гос. ун-т.–1998. – С. 118-125.
2. Башмаков М.В., Казаков Л.Н. Статистические характеристики дискретной СФС 2-го порядка при наличии на входе гармонической помехи // Электросвязь.–2001.–№ 6.– С. 25-28.
3. Башмаков М.В. Расчет плотности вероятности фазовой ошибки цифровой СФС в условиях детерминированных воздействий // Радиофизика и электроника на пороге 21 века: Сб. науч. тр. молод. учен., асп. и студ. шк.-семинара июль 2001 г. – Ярославль, 2001.– С. 28-40.
4. Башмаков М.В., Кукушкин И.А., Душин И.Н. Анализ времени до срыва слежения в дискретной СФС 2-го порядка // Радиофизика и электроника на пороге 21 века: Сб. науч. тр. молод. учен., асп. и студ. шк.-семинара июль 2001

г. – Ярославль, 2001.– С. 40-50.

5. Башмаков М.В., Казаков Л.Н. Помехоустойчивость цифрового синхронно-фазового демодулятора с многоуровневым квадратурным преобразованием входного сигнала // Цифровая обработка сигналов и ее применение: Сб. докл. 2-й межд. конф. 21–24 сентября 1999 г. – Москва, 1999.– С. 446-451.

6. Душин И.Н., Башмаков М.В. Экспериментальное исследование статистических характеристик цифровой бинарной СФС при наличии прицельной по частоте помехи // Нелинейная динамика электронных систем: Сб. докл. молод. учен., асп. и студ. шк.–семинара 11-13 октября 2000 г. – Ярославль, 2001.– С. 66–73.

7. Башмаков М.В., Казаков Л.Н. Статистические свойства дискретной СФС при наличии прицельной по частоте помехи // Труды LVI научной сессии, посвященной Дню радио, 16-17 мая 2001 г.– Москва, 2001. – С. 401-404.

8. Башмаков М.В., Казаков Л.Н., Кукушкин И.А. Сравнительный анализ методов оценки дисперсии фазовой ошибки дискретных СФС // Труды LVI научной сессии, посвященной Дню радио, 16-17 мая 2001 г.– Москва, 2001. – С. 404-406.

9. Башмаков М.В., Казаков Л.Н. Помехоустойчивость цифрового синхронно-фазового демодулятора при сосредоточенной по частоте помехе // Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ'2001: Тр. IV межд. науч.-тех. конф. 15–17 авг. 2001 г.– Владимир–Суздаль, 2001.– С. 158–161.

10. Башмаков М.В., Казаков Л.Н. Статистические характеристики цифрового синхронно-фазового демодулятора в условиях комбинированного входного воздействия // Теория связи и обработка сигналов: Тр. межд. конф. IEEE/ISSC2001 13–15 июня 2001 г.– С.-Петербург, 2001.– С. 11–14.

11. Казаков Л.Н., Башмаков М.В. Помехоустойчивость цифрового синхронно-фазового демодулятора в условиях узкополосных помех по основному каналу// Теория и техника передачи, приема и обработки информации: Тр. 7-й межд. конф. 1-4 октября 2001 г.– Харьков-Туапсе, 2001.– С. 150-152.

12. Пономарев Н.Ю., Башмаков М.В. Нелинейная динамика кусочно–линейного отображения 3–го порядка // Нелинейные колебания механических систем: Тез. докл. IV межд. науч.-тех. конф. 1996 г.– Н. Новгород, 1996.– С. 123.

13. Казаков Л.Н., Башмаков М.В., Смирнов О.Ю. Оценка областей существования колебательных режимов дискретных СФС с кусочно–линейной характеристикой детектора // Тез. докл. LIV научной сессии, посвященной Дню радио, май 1999 г.– Москва, 2001. – С. 280-281.

14. Башмаков М.В., Казаков Л.Н., Пономарев Н.Ю. Нелинейная динамика дискретной модели 3–го порядка с кусочно-линейной периодической нелинейностью // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: Тез. докл. 3-й Всерос. науч.-тех. конф. 3–10 июня 1999 г.– Чебоксары, 1999.– С. 87-88.

15. Башмаков М.В., Смирнов О.Ю., Кукушкин И.А. Помехоустойчивость цифрового синхронно-фазового демодулятора с многоуровневым квадратурным преобразованием входного сигнала // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: Тез. докл. 3-й Всерос. науч.-тех. конф. 3–10 июня 1999 г.– Чебоксары, 1999.– С. 89-90.
16. Башмаков М.В., Кукушкин И.А., Казаков Л.Н. Статистические характеристики цифрового синхронно-фазового демодулятора // Проблемы синхронизации третьего тысячелетия: Тез. докл. науч.-тех. конф. 26–28 июня 2000 г.– Ярославль, 2000.– С. 50-51.
17. Якимов И.М., Казаков А.Л., Башмаков М.В. Исследования периодических движений в дискретных СФС 2-го и 3-го порядков методом гармонической линеаризации // Сб. тез. юб. науч. конф., посвященной 30-летию Яр. гос. ун-та им. П.Г. Демидова, 2000 г.– Ярославль, 2000.– С. 42.
18. Башмаков М.В., Кукушкин И.А., Казаков Л.Н. Статистические характеристики цифрового синхронно-фазового демодулятора при наличии прицельной по частоте помехи // Сб. тез. юб. науч. конф., посвященной 30-летию Яр. гос. ун-та им. П.Г. Демидова, 2000 г.– Ярославль, 2000.– С. 43.
19. Казаков Л.Н., Башмаков М.В., Александров А.С. Синхронно-фазовый демодулятор ЧМ-сигналов на основе процессора ADSP-2181 // Системы синхронизации в радиотехнике и связи: Сб. тез. межд. научно-тех. сем. 4–7 сент. 2001 г.– Одесса, 2001.– С. 25–27.
20. Казаков Л.Н., Башмаков М.В., Якимов И.М. Оптимизация программного обеспечения сигнального процессора ADSP-2181, функционирующего в режиме цифровой СФС // Системы синхронизации в радиотехнике и связи: Сб. тез. межд. научно-тех. сем. 4–7 сент. 2001 г.– Одесса, 2001.– С. 27–28.
21. Башмаков М.В., Казаков Л.Н., Кукушкин И.А. Сравнительный анализ методов оценки дисперсии ошибки слежения в дискретных системах // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: Сб. тез. IV Всерос. науч.-тех. конф. 5–8 июня 2001.– Чебоксары, 2001.– С 161-162.
22. Казаков Л.Н., Башмаков М.В. Квазипериодические режимы дискретной СФС 2-го порядка, функционирующей в условиях флуктуационного воздействия // Прогресс в нелинейной науке: Сб. тез. докл. межд. конф., посвященной 100-летию А.А. Андропова, 2-6 июля 2001 г.– Н.Новгород, Россия, 2001.– С. 246-247. (на англ.)
23. Казаков Л.Н., Башмаков М.В. Математические модели стохастических цифровых систем фазовой синхронизации: Учеб. пос. / Яр. гос. ун-т им. П.Г. Демидова.– Ярославль, 2001.– 135 с.

Печ. л.

Тираж

Заказ

Типография МЭИ, Красноказарменная, 13