

На правах рукописи
УДК 621.37



Ходунин Александр Викторович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ СИНХРОНИЗАЦИИ ДЛЯ
СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ С ХАОТИЧЕСКОЙ НЕСУЩЕЙ**

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

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ярославль – 2012

Работа выполнена на кафедре радиотехнических систем Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова.

Научный руководитель:

доктор технических наук,
профессор Леонид Николаевич Казаков

Официальные оппоненты:

д.т.н., профессор, Заслуженный деятель науки
и техники РФ, Лауреат Государственной
премии СССР Шахтарин Борис Ильич, МГТУ
им. Н.Э. Баумана

д.т.н., начальник кафедры радиоэлектронных
систем, доц. Сизых Вадим Витальевич,
Институт криптографии, связи и информатики
Академии ФСБ России

Ведущая организация:

ОАО «Концерн «Созвездие» (г. Воронеж)

Защита состоится “27” ноября 2012 года в 14:30 на заседании диссертационного
Совета Д 212.141.02 при Московском государственном техническом университете
им. Н.Э. Баумана по адресу: 107105, Москва, Госпитальный пер., д.10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного
технического университета им. Н. Э. Баумана.

Автореферат разослан “20” октября 2012 г.

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

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



2011360

Ходунин А.В. Разработка и в

Ученый секретарь
диссертационного Совета,
к.т.н., доцент

Муратов И. В.

20/11/12

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Изучение фундаментальных свойств динамического хаоса породило интерес к прикладной стороне этого явления, связанной с возможностью построения технических систем, в основе функционирования которых использовались бы свойства динамического хаоса. Одним из таких перспективных направлений использования динамического хаоса явилось его применение в системах связи. Динамический хаос обладает многими привлекательными свойствами, которые могут быть полезны при передаче информации:

- возможность получения сложных колебаний с помощью простых по структуре устройств;
- способность в одном устройстве реализовать большое количество различных хаотических мод;
- конфиденциальность при передаче сообщений и др.

Первые эксперименты по передаче информации подтвердили принципиальную возможность использования динамического хаоса. Однако развитие этого направления натолкнулось на серьезные проблемы, среди которых высокая чувствительность к искажениям в канале, шумам и неполной идентичности параметров передатчика и приемника. В связи с этим дальнейшее использование хаотических систем связи поставило целый ряд вопросов, касающихся разработки высокоэффективных генераторов хаоса, обладающих значительной помехозащищенностью, и способов, обеспечивающих устойчивую синхронизацию хаотических сигналов.

Для разрешения вышеуказанных проблем представляется перспективным обратиться к фазовым системам. Как известно, в устройствах передачи информации, использующих регулярные сигналы, широко применяются фазовые (системы фазовой автоподстройки – ФАП) системы. Высокая точность, надежность, помехоустойчивость, управляемость, способность работать на высоких и сверхвысоких частотах, технологичность сделали эти системы неотъемлемой частью практически любых систем связи. Естественно, что вышеперечисленные свойства делают такие системы весьма привлекательными при создании новых систем связи, в том числе на основе хаотических сигналов.

Важно отметить, что формируемые на выходе управляемых генераторов систем ФАП хаотические сигналы могут передаваться в канал связи непосредственно после своего формирования, не подвергаясь никаким дополнительным преобразованиям, что является несомненным достоинством этих систем. К преимуществам рассматриваемых систем следует отнести и тот факт, что они легко объединяются в ансамбли путем организации различных связей между системами ФАП. Возникающие в результате объединения новые свойства расширяют функциональные возможности этих систем.

И.Н.Э БАУМАНА
БИБЛИОТЕКА

многokolъцевых систем ФАП в асинхронном режиме в этом случае может в значительной степени снизить чувствительность к различным возмущениям.

Для систем связи особый интерес представляет исследование влияния канала в условиях доплеровского смещения частоты. Для хаотических систем эти исследования также актуальны, поскольку частота выступает в качестве неуправляемого параметра задающего воздействия и оказывает влияние на условия синхронизации. Применение систем ФАП с повышенным порядком астатизма может в значительной степени снять остроту проблемы. Практически отсутствуют работы, в которых бы исследовались эти вопросы.

В связи с вышеизложенным, тема диссертации, посвященная разработке и исследованию алгоритмов синхронизации для систем передачи информации с хаотической несущей на основе однокольцевых и двухкольцевых систем ФАП, с повышенным порядком астатизма, является достаточно актуальной.

Степень разработанности проблемы

Во многих исследовательских центрах как в России, так и за рубежом в течение последних 20 – 30 лет ведутся интенсивные исследования методов формирования хаотических колебаний, их синхронизации и обработки информации с их использованием.

Лидирующее положение в отечественной науке в области использования хаотических колебаний занимают прежде всего ИРЭ РАН (Залогин Н. Н., Кислов В. В., Дмитриев А. С., Панас А. И., Старков С. О.), МГТУ им. Н. Э. Баумана (Шахтарин Б. И., Сидоркина Ю. А. и др.), Саратовский государственный университет (Анищенко В. С., Астахов В. В., Безручко Б. П. и др.), Нижегородский государственный университет (Шалфеев В. Д., Белых В. Н., Матросов В. В., Шильников Л. П. и др.), Московский энергетический институт (технический университет) (Кулешов В. Н., Капранов М. В., Удалов Н. Н., Томашевский А. И. и др.), ИКСИ академии ФСБ России (Сизых В. В., Тратас Ю. Г., Голубев С. В. и др.).

За рубежом проблемами практического использования хаотических колебаний занимаются во многих странах. Пионерские работы были выполнены в 1990-х годах в США Л. Чуа (L. Chua), Л. Пекора (L. Pecora) и Т. Кэрроллом (T. Carroll), в Швейцарии – М. Хаслером (M. Hasler), в Японии – Т. Эндо (T. Endo).

Трудами перечисленных ученых была теоретически обоснована и экспериментально подтверждена принципиальная возможность использования хаотических колебаний. Тем не менее, многие проблемные вопросы остаются не решенными.

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 случайных воздействий.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является повышение эффективности систем передачи информации с хаотической несущей за счет применения новых алгоритмов синхронизации, включая оптимальные, минимально чувствительные к неустойчивости параметров передатчика, приемника и радиоканала, в том числе в условиях доплеровского смещения частоты.

В соответствии с целью работы были поставлены следующие **задачи**:

1. Исследование хаотической динамики непрерывных моделей однокольцевой и двухкольцевой фазовых систем различного порядка астатизма.

2. Разработка методики оценки фазовой хаотической синхронизации нелинейных динамических систем на основе вейвлет-преобразования, эффективной в условиях шумовых воздействий.

3. Исследование хаотической синхронизации каскадно-связанных однокольцевых фазовых систем различного порядка астатизма в условиях частотной неопределенности.

4. Исследование хаотической синхронизации каскадно-связанных двухкольцевых фазовых систем в условиях частотной неопределенности.

5. Исследование возможности применения расширенного фильтра Калмана при получении синхронного хаотического отклика для фазовых систем различного порядка астатизма.

6. Разработка алгоритма выбора сигнально-кодовой конструкции на основе взаимнокорреляционных диаграмм.

7. Разработка структуры демодулятора для схемы переключения хаотических режимов с совмещением функций демодуляции и синхронизации.

8. Разработка алгоритма синхронизации на основании расширенного фильтра Калмана для систем с хаотически изменяющейся символьной частотой.

9. Реализация предложенных алгоритмов синхронизации на базе программируемых логических интегральных схем и цифровых сигнальных процессоров.

Методы исследования

Решение поставленных выше задач осуществлялось с использованием методов теории нелинейных динамических систем, теории колебаний, теории автоматического управления. Применялись методы математической статистики, Фурье-анализ, для определения фазы хаотического сигнала – вейвлет-преобразование. Математические расчеты проводились в среде Matlab, а также в ее приложении Simulink.

Научная новизна результатов

1. Предложен и исследован генератор хаоса на основе астатической системы ФАП, малочувствительной к медленным изменениям частоты, отличающийся от известных высоким порядком астатизма.

2. Получены условия хаотической синхронизации каскадно-связанных однокольцевых систем ФАП различного порядка астатизма, отличающиеся возможностью эффективного использования в доплеровских каналах.

3. Получены условия хаотической синхронизации каскадно-связанных двухкольцевых систем ФАП различной структуры, отличающиеся большей вариабельностью параметров систем за счет использования различных структур систем ФАП на передающей и приемной сторонах.

4. Разработан алгоритм оценки фазовой хаотической синхронизации на основе непрерывного вейвлет-преобразования, отличающийся от известных возможностью адаптации материнского вейвлета под энергетические параметры сигнала и помехи.

5. Разработан алгоритм выделения сигнала с хаотически изменяющейся символьной частотой повышенной девиации на основе расширенного фильтра Калмана для систем скрытной передачи информации.

6. Разработан алгоритм оценки информационной последовательности на основе расширенного фильтра Калмана для двухпозиционной и многопозиционной систем передачи с переключением хаотических режимов, отличающийся повышенной помехозащищенностью за счет совмещения функций демодуляции и синхронизации.

Теоретическая и практическая значимость исследования

Ценность диссертационного исследования состоит в том, что оно вносит вклад в развитие теории динамических систем, методов анализа хаотической синхронизации, вопросов применения нелинейной фильтрации и формирования хаотических радиосигналов, что имеет большое значение для повышения эффективности разработки и испытания радиотехнических систем различного назначения.

Достоверность полученных результатов определяется корректностью используемого математического аппарата, основанного на методах теории нелинейных колебаний и теории автоматического управления. Правильность функционирования разработанных в диссертации алгоритмов и программ проверялась на классических нелинейных динамических системах Лоренца, Ресслера, Чуа. Согласованность опубликованных для этих систем характеристик с результатами, полученными с помощью разработанных алгоритмов, позволяет сделать вывод о правильности разработанных автором алгоритмов и программ и полученных с их помощью результатов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Условия хаотической синхронизации каскадно-связанных однокольцевых систем ФАП различного порядка астатизма, обеспечивающих пониженную чувствительность к медленным частотным изменениям.

2. Условия хаотической синхронизации каскадно-связанных двухкольцевых систем ФАП различной структуры, обеспечивающих большую вариабельность параметров по сравнению с однокольцевыми системами.

3. Алгоритм оценки фазовой хаотической синхронизации на основе непрерывного вейвлет-преобразования, отличающийся от известных большей эффективностью в условиях шумовых воздействий.

4. Алгоритм выделения сигнала с хаотически изменяющейся символьной частотой на основе расширенного фильтра Калмана для систем скрытной передачи информации.

5. Комбинированный алгоритм оценки информационной последовательности на основе расширенного фильтра Калмана для двухпозиционной и многопозиционной систем передачи с переключением хаотических режимов, с совмещением функций демодуляции и синхронизации.

Апробация результатов исследования

Результаты работы докладывались и обсуждались на 9-й, 10-й, 11-й, 12-й, 13-й, 14-й международных научно-технических конференциях «Цифровая обработка сигналов и ее применение», DSPA'07, DSPA'08, DSPA'09, DSPA'10, DSPA'11, DSPA'12; на всероссийских научно-практических конференциях-выставках "Актуальные вопросы разработки и внедрения информационных технологий двойного применения", г. Ярославль, 2009 г., 2010 г., 2011 г.; международном форуме по интеллектуальной собственности «Expropriety 2010», г. Москва, 2010 г.; на международных научно-технических семинарах «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях «СИНХРОИНФО-2011» и «СИНХРОИНФО-2012» 2011 и 2012 гг., Одесса, Йошкар-Ола.

Автором опубликовано 16 печатных работ по теме диссертации, из них 2 работы в изданиях из перечня ведущих периодических изданий, определенных ВАК. Результаты диссертационной работы вошли в 5 отчетов по НИР, выполняемых на кафедре РТС ЯрГУ. На основной алгоритм определения фазы хаотического сигнала было получено свидетельство о госрегистрации программы на ЭВМ (Ходунин А. В., Казаков Л. Н. Идентификация синхронизации хаотических последовательностей ChaosSynchr1.0 // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010611725 от 03.03.2010). На модель системы ФАП 2-го и 3-го порядка астатизма получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ (Ходунин А. В., Корнева О. Л., Казаков Л. Н. Имитационная модель системы слежения за фазой и частотой на основе цифровой ФАПЧ (PPLim v.2.1.) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011613503 от 05.05.2011).

Внедрение результатов работы

Результаты, полученные в диссертационной работе, являются составной частью ряда НИР, проводимых соискателем и кафедрой радиотехнических систем ЯрГУ им. П.Г. Демидова. Среди них:

- Государственный контракт № 14.740.11.0500 от 1 октября 2010 г. «Применение хаотической синхронизации для повышения конфиденциальности передаваемой информации и скрытности функционирования систем», 2010–2011;

- ВП «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)» Министерства образования и науки РФ. Наименование проекта «Развитие нелинейной теории обработки сигналов и изображений в радиотехнике и связи» № 2.1.2/7067. 2009-2010;

- Грант РФФИ «Развитие теории цифровой обработки сигналов и изображений в технических системах» № 06-08-00782, 2006-2008;

- Грант РФФИ «Развитие теории нелинейной цифровой обработки сигналов и изображений в технических системах» № 10-08-01186а, 2010-2012;

- ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России». Наименование проекта: «Моделирование распространения радиоволн в различных средах и его применение для анализа и имитации работы радиоэлектронных средств». (2009–2011 г.г.). Госконтракт Рособразования № П454 от 1 июля.

Результаты исследования внедрены в учебный процесс ЯрГУ им. П.Г. Демидова, МГТУ им. Н.Э. Баумана и НИОКР ОАО «Концерн «Созвездие».

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и изложена на 160 страницах, включает 90 рисунков. Список литературы содержит 88 наименований.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований, изложены положения, выносимые на защиту, и краткое содержание работы. Рассмотрены проблемы организации системы связи на базе хаотических сигналов. Приводится краткий обзор методов передачи информации, использующих эффект хаотической синхронизации, описываются трудности, связанные с получением устойчивого режима хаотической синхронизации по отношению к возмущениям в канале.

В первой главе исследуется хаотическая синхронизация каскадно-связанных однокольцевых непрерывных систем ФАП. Согласно схеме (рис. 1) связь между системами осуществляется с помощью дополнительного фазового детектора с синусоидальной дискриминационной характеристикой.

Математическая модель взаимодействующих систем имеет вид

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_1 = x_1; & \dot{x}_1 = y_1; \\ \dot{y}_1 = \frac{1}{\mu_1} (y_1 - x_1 - \varepsilon_1 y_1 - \sin \varphi_1); \\ \dot{\varphi}_2 = x_2; & \dot{x}_2 = y_2; \\ \dot{y}_2 = \frac{1}{\mu_2} (y_2 - x_2 - \varepsilon_2 y_2 - \sin \varphi_2 + \delta \sin(\varphi_2 - \varphi_1)) \end{cases}, \quad (1)$$

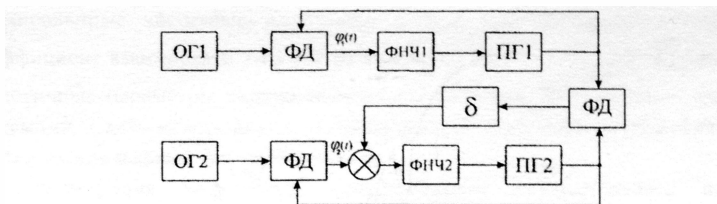


Рис. 1

где δ – коэффициент, характеризующий величину связи между системами ФАП; μ_1 , ε_1 – параметры ФНЧ1, μ_2 , ε_2 – параметры ФНЧ2, γ_1 , γ_2 – нормированные частотные расстройки, медленные функции времени. Случай $\gamma \neq 0$ соответствует системам ФАП с астатизмом 1-го порядка, случай $\gamma = 0$ соответствует системам ФАП с астатизмом 2-го порядка.

Методика исследования (1) основана на численном решении системы (1) методом Рунге-Кутты 4-го порядка. Для анализа периодических и хаотических режимов строились сечения Пуанкаре. Степень «хаотичности» режимов определялась с помощью старшего показателя Ляпунова, вычисленного по алгоритму Бенеттина (G. Benettin).

Для регистрации и исследования режима хаотической синхронизации в главе предлагается методика определения фазы хаотического сигнала с помощью непрерывного вейвлет-преобразования. По отношению основных частот, на которые приходится максимум энергетического вейвлет-спектра, как функции от δ можно судить о наступлении фазовой хаотической синхронизации.

На рис. 2. в качестве примера приведена зависимость отношения основных частот от величины связи. Параметры систем выбирались из условия наибольшей устойчивости режимов хаотических колебаний (учитывались старший показатель Ляпунова, мультистабильность, «близость» регулярных режимов). Согласно рисунку в интервале $\delta \in [0.030; 0.043]$ основные частоты полностью совпадают, что подчеркивает существование режима синхронизации. При дальнейшем увеличении коэффициента связи происходит срыв режима синхронизации. Наличие срыва говорит о существовании оптимального диапазона величины связи. Как показал анализ режимов в синхронизирующей системе при $\delta > 0.043$, синхронизация в ней нарушается из-за сильного влияния формирующей системы, при этом хаотический аттрактор колебательного типа синхронизирующей системы сменяется аттрактором вращательного типа. Таким образом, хаотическую фазовую синхронизацию, возникающую в системах ФАП, можно отнести к классу слабого взаимодействия.

В главе приведены результаты исследования чувствительности хаотической синхронизации к вариациям параметров приемной системы по отношению к передающей. Получены оценки допустимого отношения сигнал/шум.

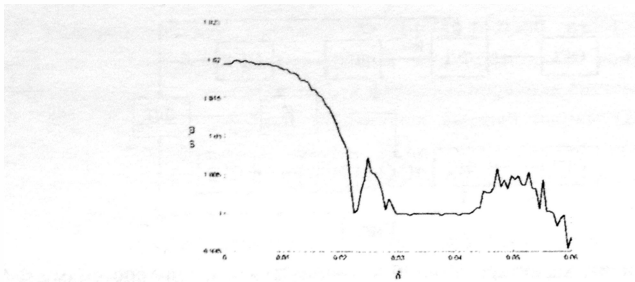


Рис. 2. Зависимость отношения основных частот от параметра связи δ при $\mu_1 = \mu_2 = 2.2$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1$, $\gamma_1 = 0.46$, $\gamma_2 = 0.55$

В беспроводных каналах расстройка γ является неуправляемым параметром и ее значение вследствие ряда причин, среди которых нестабильность генераторных схем, доплеровское смещение частоты, на приемной стороне неизвестно. Для уменьшения влияния частотной расстройки на эффективность приема была исследована система ФАП с астатизмом 2-го порядка, математическая модель которой имеет вид

$$T_1 T^2 \frac{d^4 \varphi}{d\tau^4} + 2\xi T T_1 \frac{d^3 \varphi}{d\tau^3} + T_1 \frac{d^2 \varphi}{d\tau^2} + m T_1 \cos(\varphi) \frac{d\varphi}{d\tau} + \sin(\varphi) = 0, \quad (2)$$

где T_1 – постоянная времени интегратора, m – коэффициент форсирования, ξ – коэффициент демпфирования и T – постоянная времени колебательного звена.

Результаты исследования 1-ой главы положены в основу синхронизатора демодулятора двухпозиционной цифровой системы передачи.

Вторая глава посвящена исследованию хаотической синхронизации двухкольцевых непрерывных систем ФАП. Идея использования двухкольцевых ФАП связана с предположением о возможном расширении диапазона параметров, в котором гарантированно обеспечивается режим синхронизации. Исследуются два случая: синхронизация двух двухкольцевых систем и синхронизация двухкольцевой и однокольцевой систем ФАП.

Математическая модель каскадно-связанных двухкольцевых систем имеет вид

$$\begin{aligned} \mu_1 \ddot{\varphi}_1 + \varepsilon_1 \dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_1 + \sin(\varphi_1) + k_1 \sin(\varphi_2 - \varphi_1) &= \gamma_1, \\ \mu_2 \ddot{\varphi}_2 + \varepsilon_2 \dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_2 + \sin(\varphi_2 - \varphi_1) &= \gamma_2, \\ \mu_3 \ddot{\varphi}_3 + \varepsilon_3 \dot{\varphi}_3 + \dot{\varphi}_3 + \sin(\varphi_3) + k_2 \sin(\varphi_4 - \varphi_3) + \delta \sin(\varphi_3 - \varphi_1) &= \gamma_3, \\ \mu_4 \ddot{\varphi}_4 + \varepsilon_4 \dot{\varphi}_4 + \dot{\varphi}_4 + \sin(\varphi_4 - \varphi_3) &= \gamma_4, \end{aligned} \quad (3)$$

где φ_1 , φ_2 – сигналы фазовых ошибок 1-го и 2-го колец формирующей системы; μ_1 , ε_1 – параметры ФНЧ 1-го кольца, μ_2 , ε_2 – параметры ФНЧ 2-го кольца; γ_1, γ_2 –

нормированные частотные расстройки 1-го и 2-го колец соответственно: k_1 , коэффициент взаимосвязи 1-го и 2-го колец: φ_3 , φ_4 , μ_3 , ϵ_3 , μ_4 , ϵ_4 , γ_3 , γ_4 , k_2 аналогичные параметры синхронизирующей системы; δ – величина связи между системами. Связь между двумя двухкольцевыми системами осуществлялась также через дополнительный фазовый детектор.

Регистрация хаотической синхронизации осуществлялась посредством сравнения основных частот вейвлет-преобразования хаотических сигналов на выходе формирующей и синхронизирующей систем ФАП.

Получены области хаотической фазовой синхронизации. Комбинированная схема, состоящая из каскадно-соединенных двухкольцевой и однокольцевой систем ФАП, оказалась более эффективной, по сравнению с рассмотренными системами, по критерию устойчивости хаотической синхронизации.

На рис. 3а приведен пример зависимости разности фаз ($\varphi_1 - \varphi_3$) основных частот от параметров связи δ и k_2 . Область белого цвета соответствует режиму синхронизации. Более темному цвету соответствует больший набег разности фаз.

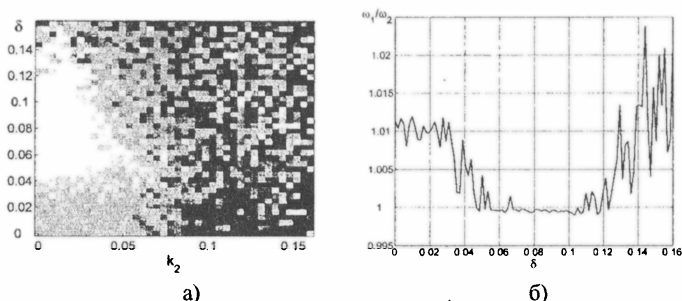


Рис. 3. Диаграмма разностей фаз синхронизируемых подсистем (а) и отношение основных частот при $k_2 = 0$ (б)

Диапазон допустимых значений параметра δ , при котором наблюдается хаотическая фазовая синхронизация между системами, увеличился в $3 \div 4$ раза по сравнению с двумя однокольцевыми и в $2 \div 3$ раза по сравнению с двумя двухкольцевыми системами ФАП. Допустимое изменение параметров для комбинированной схемы составило порядка 5% от номинального значения.

В третьей главе исследуются вопросы хаотической синхронизации применительно к задаче цифровой передачи на основе переключения хаотических режимов. 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.

Модель сообщения строится на основе разностного уравнения, полученного из непрерывной модели формирующей системы (2). С учетом предварительной дискретизации модель сообщения для астатической системы имеет вид

$$\begin{cases} x_k^1 = x_{k-1}^1 + h \cdot x_{k-1}^2 + w_{k-1}^1, \\ x_k^2 = x_{k-1}^2 + h \cdot x_{k-1}^3 + w_{k-1}^2, \\ x_k^3 = x_{k-1}^3 + h \cdot x_{k-1}^4 + w_{k-1}^3, \\ x_k^4 = x_{k-1}^4 - h/(T_1 T^2) \cdot [2\xi T_1 T x_{k-1}^4 + T_1 x_{k-1}^3 + \\ + m T_1 x_{k-1}^2 \cos(x_{k-1}^1) + \sin(x_{k-1}^1)] + w_{k-1}^4, \end{cases} \quad (4)$$

где ξ , T , T_1 , m – те же, что и в (6), h – период дискретизации, $\mathbf{x}_k = (x_{k-1}^1, x_{k-1}^2, x_{k-1}^3, x_{k-1}^4)$ – вектор состояния системы, $\mathbf{w}_{k-1} = (w_{k-1}^1, w_{k-1}^2, w_{k-1}^3, w_{k-1}^4)$ – дискретный аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ) канала с ковариационной матрицей $\mathbf{Q}$ и значениями диагональных элементов $\mathbf{q}$.

Модель наблюдения имеет вид

$$z_k = g(x_k^1, v_k) = \delta \cdot \sin(x_k^1 - \hat{x}_k^1) + v_k, \quad (5)$$

где $\hat{x}_k^1$ – априорная оценка фазы сигнала (первой компоненты вектора состояния $\mathbf{x}_k$), v_k – дискретный АБГШ с дисперсией $\mathbf{R}$, возникающий в дополнительном фазовом дискриминаторе, δ – нормировочный множитель.

В этом случае апостериорная часть алгоритма цифрового РФК запишется в виде

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T + \mathbf{V}_k \mathbf{R} \mathbf{V}_k^T)^{-1}, \quad (6)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - g(\hat{x}_k^1, 0)), \quad (7)$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_k^-, \quad (8)$$

а априорная часть в виде

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{A}_k \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{A}_k^T + \mathbf{W}_k \mathbf{Q}_{k-1} \mathbf{W}_k^T, \quad (9)$$

где $\mathbf{K}_k$ – оптимальная по Калману матрица коэффициентов усиления; $\mathbf{P}_k$ и $\mathbf{P}_k^-$ – апостериорная и априорная ковариационные матрицы ошибок $\mathbf{e}_k = \mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k$ ($\hat{\mathbf{x}}_k$ – апостериорная оценка вектора состояний $\mathbf{x}_k$) и $\mathbf{e}_k^- = \mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k^-$ ($\hat{\mathbf{x}}_k^-$ – априорная оценка вектора состояний $\mathbf{x}_k$, полученная из (7) при отсутствии шума $\mathbf{w}_k$) соответственно;

$$\mathbf{A}_k = \begin{pmatrix} 1 & h & 0 & 0 \\ 0 & 1 & h & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h \\ \frac{h}{T_1 T^2} (m T_1 x^2 \sin(x^1) - \cos(x^1)) & -\frac{hm}{T^2} \cos(x^1) & -\frac{h}{T^2} & 1 - \frac{2h\xi}{T} \end{pmatrix}_{\substack{x^1 = \hat{x}_{k-1}^1 \\ x^2 = \hat{x}_{k-1}^2}}, \quad (10)$$

$$\mathbf{W}_k = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

$$\mathbf{H}_k = (\delta \cdot \cos(x^1 - \hat{x}_k^1) \quad 0 \quad 0 \quad 0)_{x^1 = \hat{x}_k^1} = (\delta \quad 0 \quad 0 \quad 0), \quad (12)$$

$$\mathbf{V}_k = (1), \quad (13)$$

$\mathbf{I}$ – единичная матрица.

В главе исследована зависимость точности настройки РФК от параметров $\mathbf{R}$, $\mathbf{Q}$ и h . Установлено, что в рассмотренном РФК длительность переходных процессов и величина среднеквадратической ошибки зависят от отношения $\mathbf{R}$ к $\mathbf{Q}$, не зависят от их абсолютных значений. На рис. 4 приведен пример зависимости СКО ошибки от отношения сигнал/шум для разных периодов дискретизации.

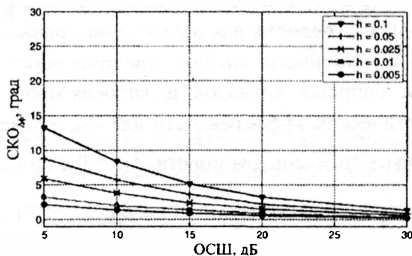


Рис. 4.

Для каждого шага дискретизации существует пороговое значение ОСШ, выше которого алгоритм функционирует устойчиво. В целом, уменьшение периода дискретизации ведет к уменьшению ошибки восстановления исходного вектора состояний.

На рис. 5 приведена структурная схема двухпозиционной системы передачи информации. ФАП1 и ФАП2 отличаются хаотическими режимами, которые выбираются в соответствии с диаграммами взаимнокорреляционных свойств.

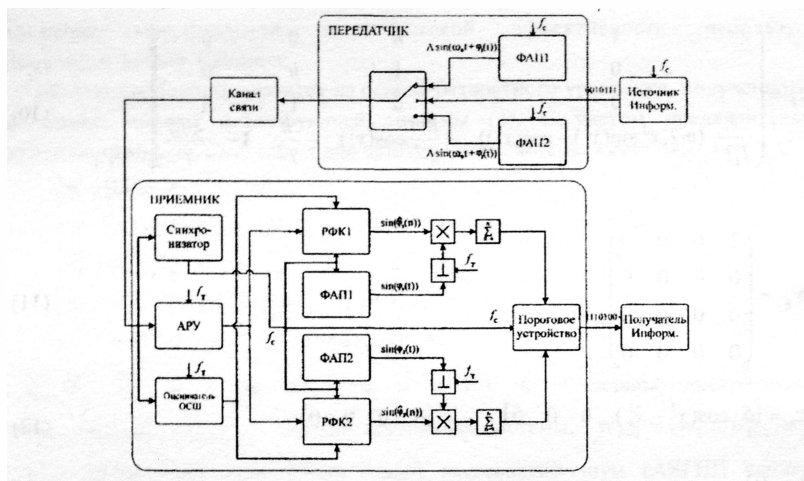


Рис. 5. Структурная схема двухпозиционной системы передачи информации на основе РФК

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 вейвлет-преобразования (результаты 1-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. 6 приведен пример графика энергетической эффективности для 2-х (кривая 3), 4-х (2) и 8-ми (1) позиционных хаотических сигналов для порога $\lambda_D = 0,08$ и $C_r = 0,3$.

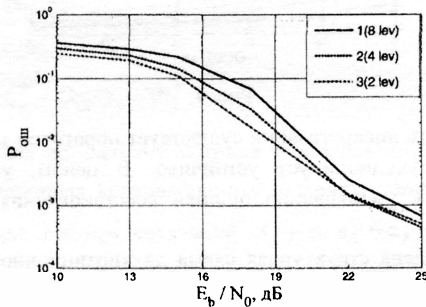


Рис. 6.

Из рис. 6 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.

В главе предложен также метод передачи двоичной информации, основанный на использовании хаотически изменяющейся тактовой частоты. На приемной стороне синхронный отклик может быть получен с помощью расширенного фильтра Калмана (рис. 7а).

Для оценки непостоянства тактовой частоты введен параметр J , численно равный отношению СКО длительности символа к средней длительности символов информационной последовательности. На рис. 7б приведена зависимость вероятности ошибки от ОСШ в канале с АБГШ для $J = 0,18$ (кривая 1), $J = 0,27$ (2), $J = 0,36$ (3). Шпилькой (кривая Т) указана граница потенциальной помехоустойчивости, соответствующая постоянной тактовой частоте.

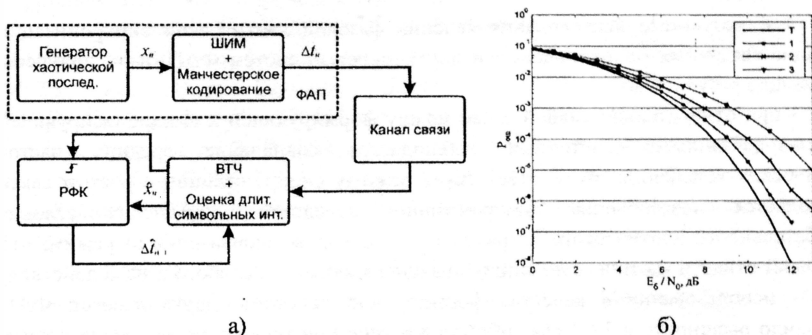


Рис. 7. Структурная схема системы синхронизации с хаотически изменяющейся тактовой частотой (а) и зависимость вероятности ошибки от ОСШ (б)

Согласно рис. 7б повышение скрытности передаваемой информации, обусловленное большим уровнем джиттера, ведет к увеличению вероятности ошибки при передаче информации. Основная причина заключается в существовании коротких импульсов, для которых отношение энергии бита к спектральной плотности мощности (E_b/N_0) оказывается меньше среднего значения.

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

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе рассмотрен комплекс вопросов, связанных с разработкой и исследованием принципов и алгоритмов хаотической синхронизации

в фазовых системах, направленных на повышение эффективности цифровых систем передачи с хаотической несущей. В ходе проведенных исследований получены следующие основные результаты:

1. Проведено комплексное исследование генераторов хаотических колебаний, построенных на основе однокольцевых и двухкольцевых систем ФАП с астатизмом 1-го и 2-го порядков. Однокольцевая система ФАП с фильтром в виде колебательного звена 2-го порядка допускает $1 \div 3$ % нестабильность параметров, что затрудняет практическое использование таких систем в качестве генераторов хаотически модулированных колебаний. Для двухкольцевых систем ФАП область генерации хаотических колебаний возросла, при этом допустимая вариабельность параметров составила $4 \div 5$ %.

2. Разработана и исследована методика оценки фазы и частоты хаотического сигнала на основе непрерывного вейвлет-преобразования. С его помощью получены оценки областей параметров устойчивой синхронизации, среднего времени вхождения в синхронизм различных временных масштабов и времени до срыва синхронизации. Методика обеспечивает устойчивую оценку фазы сигнала при $ОСШ > 10$ дБ.

3. В результате исследования явления фазовой хаотической синхронизации каскадно-связанных однокольцевых и двухкольцевых систем ФАП были получены следующие результаты:

- при относительно слабой связи между формирующей и синхронизирующей каскадно-связанными системами наблюдается совпадение средних частот хаотических колебаний, что соответствует режиму синхронизации; с ростом связи наблюдается исчезновение синхронизации вследствие нарушения условия колебательности хаотического аттрактора и переход во вращательный режим, что позволяет отнести хаотическую синхронизацию к явлениям слабого взаимодействия;
- использование в качестве формирующей системы двухкольцевой ФАП позволило расширить в $2 \div 3$ раза область хаотической генерации с одновременным увеличением в $1,5 \div 2$ раза старшего показателя Ляпунова; в качестве синхронизирующей системы предпочтительнее использовать однокольцевые системы ФАП; результат совместного их использования дал выигрыш по увеличению вариабельности параметров в $3 \div 4$ раза по сравнению с результатами, полученными для хаотической синхронизации однокольцевых систем.

4. Предложена структура синхронизатора, основанная на фазовой хаотической синхронизации систем ФАП различного типа. Подобное устройство может быть использовано для повышения помехоустойчивости цифровых систем передачи информации с переключением хаотических режимов.

5. Предложен алгоритм формирования многопозиционного сигнального созвездия на основе диаграмм взаимнокорреляционных свойств хаотических сигналов, позволивший повысить энергетическую эффективность системы передачи с переключением хаотических режимов.

6. Предложена система передачи информации, построенная по схеме переключения хаотических режимов, формируемых на основе астатических ФАП. Использование когерентной обработки совместно с оптимальной нелинейной фильтрацией позволило на $10 \div 12$ дБ уменьшить требование на ОСШ по сравнению с известными схемами переключения хаотических режимов.

7. Разработана структура системы передачи информации с хаотически изменяющейся символьной частотой, обеспечивающей за счет большого джиттера и множества используемых хаотических последовательностей высокую скрытность. Выявлено значительное снижение (на $10 \div 15$ дБ) спектральной плотности мощности побочных дискретных составляющих в спектре выходного сигнала. Это ведет к повышению электромагнитной совместимости каналов связи.

8. Для экспериментальной проверки теоретических результатов и выработки рекомендаций по их практическому использованию с учетом современных технологий разработан цифровой модуль на основе ПЛИС Spartan 3A DSP.

Результаты диссертационного исследования в полной мере опубликованы в 16 статьях и докладах конференций, из них 2 работы в изданиях из перечня ведущих периодических изданий, определенных ВАК:

1. Казаков Л. Н., Ходунин А. В. Формирование синхронного хаотического отклика для системы фазовой автоподстройки частоты // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 7. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/420444.html> (дата обращения 18.08.2012).

2. Ходунин А. В. Разработка модема с хаотически изменяющейся тактовой частотой на базе ПЛИС Xilinx Spartan-3A DSP // Цифровая обработка сигналов и ее применение : Сборник докладов 14-ой международной конференции. М., 2012. С. 34–37.

3. Ходунин А. В., Казаков Л. Н. Хаотическая синхронизация каскадно-связанных систем фазовой автоподстройки частоты // Моделирование и анализ информационных систем. 2009. Т. 16, № 4. С. 117–131.

4. Ходунин А. В., Казаков Л. Н. Разработка алгоритма приема в системе передачи информации с хаотически изменяющейся тактовой частотой // Вестник ЯрГУ. Серия Естественные и технические науки. 2010. № 2. С. 49–54.

5. Ходунин А. В., Коточигов А. А. Применение вейвлет-преобразования для регистрации хаотической синхронизации связанных систем ФАПЧ // Цифровая обработка сигналов и ее применение : Сборник докладов 10-ой международной конференции. М., 2008. С. 82–85.

6. Ходунин А. В. Формирование синхронного хаотического отклика для системы ФАПЧ с астатизмом 2-го порядка с помощью расширенного фильтра Калмана // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях «СИНХРОИНФО 2012» : Сборник материалов международного научно-технического семинара. Йошкар-Ола, 2012. С. 141–143.

7. Коточигов А. А., Ходунин А. В. Хаотическая синхронизация каскадно-соединенных связанных систем ФАПЧ // Вестник ЯрГУ. Серия Физика. Радиотехника. Связь. 2008. Вып. 9, № 1. С. 82–86.

8. Ходунин А. В., Пестова А. В. Метод передачи информации с хаотически изменяющейся тактовой частотой // Цифровая обработка сигналов и ее применение : Сборник докладов 13-ой международной конференции. М., 2011. С. 81–84.

9. Ходунин А. В., Соловьев Д. М. Полунатурное моделирование системы передачи информации с хаотически изменяющейся тактовой частотой на базе пЛИС Xilinx Spartan-3a DSP // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях «СИНХРОИНФО 2011» : Сборник материалов международного научно-технического семинара. Одесса, 2011. С. 15–17.

10. Ходунин А. В., Пеньков Ю. М. Система передачи информации с хаотически изменяющейся тактовой частотой // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов для связи и вещания : Сборник материалов международного научно-технического семинара. Нижний Новгород, 2010. С. 155–157.

11. Ходунин А. В. Способ скрытной передачи информации с хаотической несущей на базе каскадно-связанных систем ФАПЧ // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов для связи и вещания : Сборник материалов международного научно-технического семинара. Воронеж, 2009. С. 108–110.

12. Коточигов А. А., Ходунин А. В., Коновалова Ю. Н. Синхронизация хаотических систем на основе алгоритма оптимальной нелинейной фильтрации // Цифровая обработка сигналов и ее применение : Сборник докладов 9-ой международной конференции. М., 2007. С. 72–75.

13. Ходунин А. В. Исследование хаотической синхронизации в системе скрытной передачи информации // Цифровая обработка сигналов и ее применение : Сборник докладов 11-ой международной конференции. М., 2009. С. 30–33.

14. Коточигов А. А., Ходунин А. В. Применение хаотических колебаний для скрытной передачи информации // Актуальные вопросы развития и внедрения информационных технологий двойного применения : Сборник докладов 9-ой всероссийской научно-практической конференции. Ярославль, 2008. С. 352–360.

15. Коновалова Ю. Н., Коточигов А. А., Ходунин А. В. Исследование хаотической синхронизации связанных систем фазовой автоподстройки частоты // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов для связи и вещания : Сборник материалов международного научно-технического семинара. Одесса, 2007. С. 41–45.

16. Коточигов А. А., Ходунин А. В. Хаотическая синхронизация каскадно-связанных систем ФАПЧ // Труды РНТОРЭС им. А.С. Попова. М., 2008. Вып. LXIII. С. 454–456.