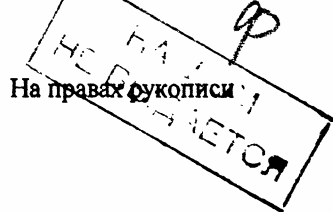


УДК 621.396



Аливвер Вячеслав Юрьевич

**Применение расширенного фильтра Калмана для демодуляции
хаотических колебаний**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

A handwritten signature in cursive script, which appears to be "В.А. Аливвер" (V.A. Alivver).

Работа выполнена в Московском Государственном
Техническом Университете им. Н. Э. Баумана

Научный руководитель –

Шахтарин Борис Ильич, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, Лауреат Государственной премии СССР

Официальные оппоненты:

д.т.н., проф. **Неусыпин Константин Авенирович**

к.т.н., **Голубев Сергей Владимирович**

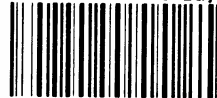
Ведущая организация – **6 ЦНИИ МО РФ**

Защита состоится «24» мая 2005 г. в 14 часов на заседании Специализированного совета Д 212.141.02 при Московском Государственном Техническом Университете им. Н. Э. Баумана (МГТУ им. Н. Э. Баумана) по адресу: 107005, Москва, 2-ая Бауманская, д. 5, МГТУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ.

Автореферат разослан «20» апреля 2005 г.

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1715911

Аливер В.Ю. Применение рас

Ученый секретарь
диссертационного совета

к.т.н., доц. **Иванов В. А.**

Актуальность темы. Возможность передачи информации с использованием хаотических сигналов давно привлекала внимание исследователей. Этому способствовали следующие важные обстоятельства.

Во-первых, динамический хаос – сравнительно недавно вошедшее в научную картину мира явление, главным образом, лишь в последней четверти XX века. Исследования, проведенные за этот период, позволили сформировать понимание природы динамического хаоса и заставили пересмотреть многие привычные представления об окружающем нас мире, о том, как могут вести себя различные объекты и процессы. Стало ясно, что благодаря новым, разработанным на основе этого явления теориям и подходам, появляются неизвестные ранее возможности в различных областях знаний и в освоении новых технологий. Встал вопрос о практическом применении динамического хаоса, и, прежде всего, о его применении в информационных технологиях и радиотехнике. Построение помехоустойчивых систем передачи информации с использованием хаотических сигналов даже только лишь с научно-методической точки зрения представляет огромный интерес, поскольку такие сигналы с полной уверенностью можно назвать новыми носителями информации для систем связи.

Во-вторых, хаотические колебания относятся к широкополосным сигналам, которые потенциально очень эффективны для передачи информации. Широкополосные сигналы могут обладать высокой помехоустойчивостью, скрытностью, большой информационной емкостью. Прежде всего привлекает то, что коммуникационные системы, использующие хаотическую модуляцию, уже сами по себе являются конфиденциальными, так как главными свойствами хаотических процессов являются: внешнее сходство с посторонними шумовыми процессами, экспоненциальное разбегание фазовых траекторий при малейшей разнице как в начальных условиях, так и в параметрах источников хаоса. Таким образом, изучаемые системы связи с хаотической модуляцией являются достойной альтернативой известным системам с расширением спектра для защиты информации, а также альтернативой применению известных криптографических методов.

В-третьих, давно известен и достаточно хорошо развит аппарат оптимальной линейной и нелинейной фильтрации. Динамические системы, в которых наблюдаются хаотические колебания, являются типичными представителями нелинейных систем. Возникает естественный интерес применить известные методы нелинейной оптимальной фильтрации к приему сигналов с хаотической несущей, выяснить, остаются ли такие методы адекватными в данном случае и при необходимости развить их и адаптировать к приему хаотических колебаний, если такое окажется возможным. Также интересен тот факт, что теория оптимальной фильтрации сформировалась раньше, чем современная теория динамического хаоса, и развитие методов оптимального приема шло, по-видимому, без принятия во внимание хаотических явлений.

Существует достаточно много работ по системам передачи информации с использованием хаотических колебаний. Были предложены различные варианты введения информационного сигнала в хаотический на передающей стороне и его выделения на приемной, но, тем не менее, вплоть до настоящего времени имеется определенная неудовлетворенность от существующих работ по таким системам передачи информации,

связанная с тем, что выделение информационного сигнала из хаотической несущей является сложной, требующей особого подхода задачей.

Первые работы по определению структуры приемников основывались на идее декомпозиции уравнений, описывающих генератор хаотических колебаний – работа Пекоры Л. М. и Кэрролла Т. Л., 1990, а позднее работы группы Дмитриева А. С., 1997. Одно из интересных предложений состояло в использовании на приемной стороне алгоритма, обратного алгоритму введения информации в хаотическое колебание на передающей – Волковский А. Р., Рульков Н. В., 1993, Фелдман и др., 1995. Также имеются работы, в которых приемное устройство строилось как генератор хаотического колебания, идентичный генератору передатчика и управляемый сигналом ошибки между принятым сигналом и его копией в приемнике – Хаслер М., 1994. Такая структура наиболее близка к структуре оптимального приемника. Существует работа, в которой представлена система передачи информации, где информация закладывается в начальные условия передаваемых в канал связи фрагментов хаотических реализаций, а на приемной стороне осуществляется корреляционная обработка принятых сообщений совместно с созданными в приемнике точными копиями элементарных хаотических сигналов передатчика – Кулешов В. Н. и др., 1997.

Среди работ исследователей регулярной и хаотической динамики радиотехнических систем, помимо перечисленных выше, следует выделить работы Тихонова В. И., Тратаса Ю. Г., Шалфеева В. Д., Капранова М. В., Шахтарина Б. И., Собиски Д., Эндо Т., Чуа Л. О., Холмса Дж. и др.

Основу нелинейной динамики и методов исследования хаотических систем создали А. Пуанкаре, Э. Лоренц, Ю. И. Неймарк, П. С. Ланда, В. С. Анищенко, А. С. Дмитриев, Г. Шустер, Г. Кэрролл, Л. Пекора и др.

В настоящее время в России есть несколько научно-исследовательских групп, занимающихся хаотической динамикой, среди которых следующие: Институт Радиотехники и Электроники РАН (А. С. Дмитриев, А. И. Панас), Саратовский Государственный Университет (В. С. Анищенко), Нижегородский Государственный Университет (В. Д. Шалфеев, В. Н. Белых), Московский Энергетический Институт (Технический Университет) (М. В. Капранов, В. Н. Кулешов, Н. Н. Удалов), Московский Технический Университет Связи и Информатики (Пестряков А. В.), Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана (Шахтарин Б. И., Губанов Д. А., Голубев С. В. и др.).

Тем не менее, несмотря на интенсивное изучение вопроса применения хаоса для передачи информации, многие проблемы остаются нерешенными. Эти проблемы являются следствием свойств динамического хаоса и заключаются, в основном, в следующих ограничениях:

- 1) передача информационного сигнала ведется при слишком большом отношении сигнал/шум (ОСШ), как правило, не достижимом в реальных ситуациях;
- 2) даже при достаточно большом ОСШ периодически наблюдается явление временной десинхронизации передаваемой и приемной систем;
- 3) накладываются значительные ограничения на допуск разброса параметров передатчика и приемника, погрешность значений параметров обычно не должна превышать 1 – 2 %.

Кроме того, такие известные методы передачи информации, как нелинейное подмешивание и хаотическая маскировка, приводят к тому, что в канале связи наряду со «случайной» хаотической компонентой, по сути дела, присутствует и само полезное сообщение. Следовательно, можно предположить, что существует, по крайней мере, потенциальная возможность отфильтровать это сообщение без обладания информацией об используемом в коммуникационной системе генераторе хаоса. Это может свести на нет всю конфиденциальность. Другой известный способ взаимодействия сообщения с хаотической несущей – модуляция параметра нелинейной системы – обладает тем существенным недостатком, что, во-первых, модулируемый параметр должен очень медленно меняться по сравнению с изменением несущей, во-вторых, он может меняться лишь в определенном нешироком диапазоне, что приводит к низкой энергетической эффективности такого метода. Этот способ сильно ограничивает возможности цифровой обработки сигналов и применим, в основном, в радиодиапазоне.

Таким образом, исходя из вышесказанного, необходимо продолжать исследования, касающиеся разработки систем связи, использующих хаотические колебания в качестве носителя информационных сообщений и, по-возможности, не обладающих перечисленными недостатками.

Цель и задачи диссертации. Причиной указанных недостатков является слишком малое внимание достижениям в области статистического синтеза оптимальных приемных устройств. Целью настоящей работы является повышение помехоустойчивости демодуляторов хаотических колебаний за счет применения и адаптирования методов теории оптимальной фильтрации сигналов для данного случая.

В связи с поставленной целью задачами диссертации являются следующие.

- 1) Показать применимость методов теории оптимальной фильтрации для случая приема хаотических сигналов. При этом считается, что по каналу связи передается хаотическая несущая, а информационное сообщение является некоторым, причем, в общем случае, произвольным (в отличие от работ Тратаса Ю. Г., 1997 – 1998), параметром хаотического сигнала. Кроме того, в общем случае, не делается допущение о том, что спектр полезного сигнала лежит в области значительно более низких частот, чем спектр хаотической несущей (в отличие от работы Дмитриева А. С. (2002), когда речь шла о модуляции параметра). Полученное в результате синтеза приемное устройство должно быть представлено в виде наглядной математической модели.
- 2) Провести анализ помехоустойчивости модели приемного устройства для случая аддитивного гауссова белого шума (ГБШ) в канале связи.
- 3) Разработать (конкретизировать, формализовать уже существующие) методику анализа качества (устойчивости) хаотических режимов генераторов хаоса. На основе этой методики провести сравнительный анализ источников хаоса. При этом необходимо создать соответствующее программное обеспечение.

Методы исследования. Современными методами синтеза приемных устройств для сложных сигналов являются методы теории обработки сигналов, и, в частности, методы оптимальной фильтрации. С другой стороны, методами исследования нелинейных динамических систем являются известные методы теории нелинейных колебаний и методы анализа хаотического поведения. В соответствии с этим, в диссертации:

- при синтезе устройств приема сигналов с хаотической модуляцией применялись алгоритм расширенного фильтра Калмана (РФК) и численное моделирование;
- при сравнительном анализе непрерывных генераторов хаоса применялись методы теории устойчивости динамических систем, метод Ляпунова, метод Пуанкаре, метод бифуркаций и методы численного интегрирования.

Научная новизна.

- 1) Исследован вопрос применимости и адаптации известных методов нелинейной оптимальной фильтрации к построению систем передачи информации с использованием хаотических колебаний. Показаны работоспособность моделей таких систем и их преимущества перед другими моделями, которые не являются оптимальными.
- 2) Получена новая обобщенная математическая модель, описывающая структуру квазиоптимальных демодуляторов хаотических сигналов.
- 3) Проведен анализ помехоустойчивости представленной модели приемного устройства в системе связи с хаотической модуляцией. При этом проведено сравнение случаев с разными моделями полезных сообщений и разными параметрами.
- 4) Развит и формализован в виде методики и прикладного программного обеспечения подход к исследованию режимов генераторов хаотических сигналов. На базе теории устойчивости, теории бифуркаций и метода Ляпунова получены и представлены графически плоскости параметров различных генераторов хаоса, разбитые на области с регулярным и хаотическим режимами, а также сечения этих плоскостей. Сделаны выводы в пользу выбора таких устройств и их параметров.

Основные результаты, выносимые на защиту:

- 1) математические модели приемных устройств, реализованных на базе РФК;
- 2) рабочие характеристики – зависимости относительной среднеквадратической ошибки (СКО) от ОСШ, а также зависимости относительной СКО от отношения несущая/сообщение (ОНС) для случая приема сигнала на фоне аддитивного ГБШ;
- 3) получившая дальнейшее развитие методика анализа непрерывных генераторов хаоса;
- 4) диаграммы режимов поведения генераторов хаоса: осциллятор Дuffинга, система Лоренца, генератор Чуа.

Практическая значимость. В соответствии с целью диссертации решены поставленные и перечисленные выше задачи. Практическое значение полученных результатов заключается в следующем.

- 1) Предложенные и проанализированные модели устройств приема сигналов с хаотической модуляцией дают основу для практического конструирования таких устройств в соответствующих системах связи. Такие коммуникационные системы обладают, прежде всего, повышенной стойкостью к перехвату передаваемой информации. При этом их помехоустойчивость, как установлено автором, сопоставима с помехоустойчивостью систем связи, использующих другие несущие сигналы.
- 2) Полученные в диссертации результаты введены в учебный процесс кафедры «Автономные информационные и управляющие системы» МГТУ им. Н. Э. Баумана, а именно, в лабораторные работы и лекционный курс.

- 3) Разработано программное обеспечение, позволяющее исследовать генераторы хаоса, в результате чего можно давать практические рекомендации по выбору их параметров. При этом используется предложенная в диссертации методика.

Достоверность полученных автором результатов.

Достоверность математических моделей устройств приема хаотических сигналов подтверждается результатами численного моделирования. При этом численная модель, составленная в пакете “MatLab”, является имитационной. Модель работоспособна для широкого диапазона значений большинства ее параметров.

Достоверность анализа хаотических режимов в нелинейных динамических системах подтверждается совпадением результатов, полученных разными методами.

Реализация результатов исследования. Результаты диссертационной работы внедрены в ряд НИР [20, 21], а также используются в учебном процессе кафедры СМ-5 МГТУ им. Н. Э. Баумана (издано два учебных пособия [18, 19]), что подтверждено актами о внедрении.

Апробация работы. Материалы диссертации обсуждались на LVII и LVIII научных сессиях НТОРЭС им. А. С. Попова, посвященных Дню радио (14 – 16 мая, 2002 и 2003 г., Москва); научно-техническом семинаре «Синхронизация, формирование и обработка сигналов» (3 – 5 июля 2003 г., Ярославль); международной научной конференции к 95-летию академика В. А. Котельникова (29 – 30 октября 2003 г., Москва); на семинарах кафедры СМ-5 МГТУ им. Н. Э. Баумана (2000 – 2003г.); а также XXX научно-технической конференции МГТУ им. Н. Э. Баумана, посвященной 65-летию факультета «Специальное машиностроение» и памяти профессора Николая Андреевича Лакоты (2003 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано более 20 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из **Введения**, четырех **Гла****в**, **Заключения**, списка литературы и десяти **Приложений**. Объем диссертации составляет 231 страницу. Из них 117 страниц основного текста, 60 страниц иллюстраций, 13 страниц списка литературы (180 наименований), 40 страниц приложений (не считая иллюстраций).

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Введение содержит актуальность темы диссертации вместе со ссылками на литературные источники, цель и задачи диссертации, научную новизну. Перечислены методы исследования, основные положения, выносимые на защиту, кратко изложено содержание работы.

Глава 1 посвящена исследованию вопроса применимости и адаптации известных методов нелинейной оптимальной фильтрации к построению систем передачи информации с использованием хаотических колебаний. Показана работоспособность модели приема-передающей системы с использованием хаотической несущей для случая, когда в качестве приемного устройства использовался РФК. Такая система обладает рядом преимуществ по сравнению с другими, не являющимися оптимальными, системами. Структура демодуляторов получена для радиотехнических моделей трех генераторов хаоса: системы Лоренца, осциллятора Дуффинга и генератора Чуа.

Рассматриваются два вопроса. Первый вопрос – синхронизации хаотических систем. Синхронизация осуществляется по принципу «ведущая система» (передатчик) – «ведомая система» (приемник). Модуляция несущего сигнала при этом не осуществляется. Под синхронизацией в данном случае понимается достижение приемником того же состояния, в котором пребывает передатчик. Второй вопрос – передача информационного сигнала, модулирующего хаотическую несущую. В этом случае, по сути дела, так же необходима синхронизация передатчика с приемником, но при этом передатчик и приемник усложняются тем, что в передатчике в хаотический сигнал некоторым образом вводится информационное сообщение, а в приемнике это сообщение должно восстанавливаться. И в случае синхронизации, и в случае передачи информации использовался алгоритм РФК.

Опорный фундамент для проведения исследований был почерпнут из работ Тихонова В. И. по основам теории обработки сигналов, статистической радиотехнике, и, в частности, по теории марковских процессов, анализу и синтезу узлов радиоаппаратуры и автоматики, оптимальной фильтрации. Также были особо приняты во внимание работы Тратаса Ю. Г. по изучению и использованию хаотическим систем.

Ниже приведены основные результаты.

1. Показано, что методы оптимальной фильтрации и, в частности, РФК остаются адекватными при демодуляции хаотических колебаний. Кроме того, эти методы необходимы для эффективного приема сообщения, переданного на хаотической несущей.

2. Показано, что две нелинейные динамические системы с хаотическими колебаниями, взаимодействующие по принципу ведущая-ведомая, можно синхронизировать, если ведомая система входит в состав РФК и играет роль формирующего фильтра, а по линии связи отдельно и независимо друг от друга передаются все хаотические компоненты. Приемное устройство – РФК – восстанавливает все эти компоненты и в результате ведомая хаотическая система пребывает в том же состоянии, что и ведущая. В тех случаях, когда по каналу передается лишь часть хаотических компонент, или одна хаотическая компонента, или их аддитивная взвешенная сумма, синхронизация наблюдалась в подавляющем большинстве случаев. В любом из рассмотренных автором генераторов хаоса была хотя бы одна хаотическая компонента, передача которой (и только лишь ее одной) по каналу приводила к синхронизации.

3. Начальные состояния передатчика и приемника могут значительно различаться, по крайней мере, в том случае, если параметры обеих систем идентичны. При моделировании задавались самые разные начальные условия, и оцениваемые компоненты всегда восстанавливались в приемнике, если они при прочих равных условиях восстанавливались при одинаковых или близких начальных состояниях. Следует отметить, что это происходит несмотря на то, что в алгоритме РФК используется допущение о малой величине ошибки оценки.

4. Наличие синхронизации двух хаотических систем указывает на принципиальную возможность передачи информации с использованием этих систем. Для реализации такой возможности при моделировании был применен следующий подход: система дифференциальных уравнений (ДУ), описывающая генератор хаоса, модифицировалась с учетом наличия одного или нескольких информационных сообщений. Модификация заключалась, во-первых, в дополнении исходной системы ДУ уравнениями сообщений, во-вторых, хаотические компоненты в уравнениях исходной системы становились за-

висимыми от вводимых сообщений некоторым, в общем случае, произвольным образом. В результате сделанного обобщения получается, что разница между различными способами взаимодействия несущей и сообщения (модуляция параметра, нелинейное подмешивание, хаотическая маскировка) исчезает. По-сути, все сводится к оценке параметров модифицированной хаотической системы совместно с оценкой хаотических компонент. Показана работоспособность модели таких систем передачи и защиты информации.

5. При использовании РФК два разных способа взаимодействия хаотического и информационного сигналов – модуляция параметра и нелинейное подмешивание в целом дают примерно одинаковое качество связи (ошибку фильтрации).

На рис. 1 представлены результаты работы демодулятора хаотических колебаний. В качестве исходного генератора хаоса выбрана система Лоренца, которая описывается дифференциальными уравнениями:

$$\begin{aligned} dx/dt &= p(y - x), \\ dy/dt &= rx - y - xz, \\ dz/dt &= xy - bz, \end{aligned}$$

где x, y, z – переменные состояния, a, p, b – параметры. Модель хаотического передатчика, соответствующая рисунку 1, имеет вид

$$\begin{aligned} dx/dt &= py - p(x + \lambda), \\ dy/dt &= r(x + \lambda) - y - (x + \lambda)z, \\ dz/dt &= (x + \lambda)y - bz, \\ d\lambda/dt &= -\alpha\lambda - \omega_0\mu + n_1 \cos \omega_0 t + n_2 \sin \omega_0 t, \\ d\mu/dt &= -\alpha\mu + \omega_0\lambda + n_1 \sin \omega_0 t - n_2 \cos \omega_0 t, \end{aligned}$$

где первые два уравнения описывают генератор хаоса с учетом ввода полезного сообщения $\lambda(t)$, а последние два задают модель информационного сигнала – двухкомпонентного марковского случайного процесса. α и ω_0 – параметры сообщения, n_1 и n_2 – ГБШ с двусторонней спектральной плотностью $N_\lambda/2$. По каналу связи передается хаотическая компонента $x(t)$, и наблюдение имеет вид

$$\xi(t) = x(t) + n(t),$$

где $n(t)$ – ГБШ с двусторонней спектральной плотностью $N_0/2$. Алгоритм РФК в общем виде можно найти во многих работах по статистическому синтезу, например, в работах Тихонова В. И. (1991 – 2004). Модель приемного устройства для данного случая согласно [1] имеет вид

$$\begin{bmatrix} d\hat{x}/dt \\ d\hat{y}/dt \\ d\hat{z}/dt \\ d\hat{\lambda}/dt \\ d\hat{\mu}/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p\hat{y} - p(\hat{x} + \hat{\lambda}) \\ r(\hat{x} + \hat{\lambda}) - \hat{y} - (\hat{x} + \hat{\lambda})\hat{z} \\ (\hat{x} + \hat{\lambda})\hat{y} - b\hat{z} \\ -\alpha\hat{\lambda} - \omega_0\hat{\mu} \\ -\alpha\hat{\mu} + \omega_0\hat{\lambda} \end{bmatrix} + \frac{2}{N_0} \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{31} \\ R_{41} \\ R_{51} \end{bmatrix} (\xi - \hat{x}),$$

$$\frac{d\mathbf{R}}{dt} = \frac{N_s}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -p & p & 0 & -p & 0 \\ r-\hat{z} & -1 & -\hat{x}-\hat{\lambda} & r-\hat{z} & 0 \\ \hat{y} & \hat{x}+\hat{\lambda} & -b & \hat{y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\alpha & -\omega_0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_0 & -\alpha \end{bmatrix} \mathbf{R} +$$

$$+ \mathbf{R} \begin{bmatrix} -p & r-\hat{z} & \hat{y} & 0 & 0 \\ p & -1 & \hat{x}+\hat{\lambda} & 0 & 0 \\ 0 & -\hat{x}-\hat{\lambda} & -b & 0 & 0 \\ -p & r-\hat{z} & \hat{y} & -\alpha & \omega_0 \\ 0 & 0 & 0 & -\omega_0 & -\alpha \end{bmatrix} - \frac{2}{N_0} \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{31} \\ R_{41} \\ R_{51} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \\ R_{31} \\ R_{41} \\ R_{51} \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & R_{14} & R_{15} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & R_{24} & R_{25} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & R_{34} & R_{35} \\ R_{41} & R_{42} & R_{43} & R_{44} & R_{45} \\ R_{51} & R_{52} & R_{53} & R_{54} & R_{55} \end{bmatrix},$$

где обозначение вида $\hat{x}$ соответствует оценке переданного сигнала x , полученной в демодуляторе.

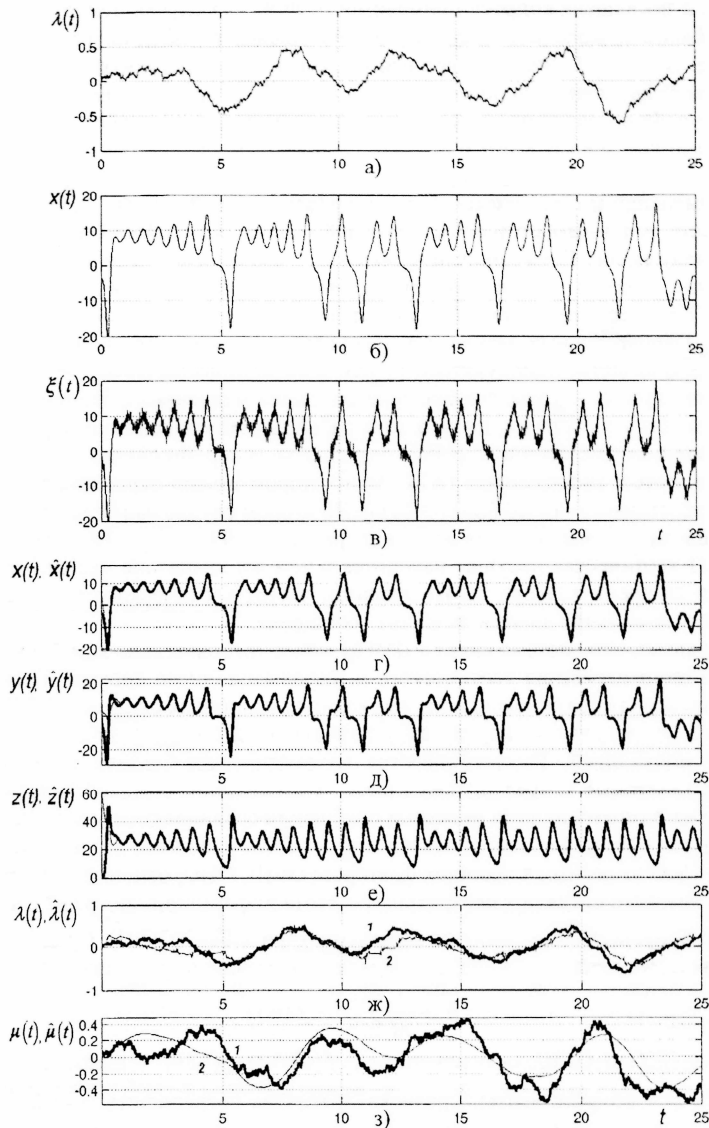


Рис. 1. Результаты работы хаотического демодулятора, построенного на модели уравнений Лоренца. ОСШ в канале связи $\eta = 17$ дБ, ОСН $\eta_{x/\lambda} = 33$ дБ. Передаваемое сообщение $\lambda(t)$, (а), хаотический сигнал на выходе передатчика $x(t)$, (б), наблюдение на входе приемника $\xi(t)$, (в). 1 – переменные состояния передатчика и 2 – их соответствующие оценки в приемнике, (г) – (з).

Глава 2 посвящена вопросу применимости РФК для случая демодуляции хаотических колебаний и модели сообщения, отличающейся от модели, рассмотренной в первой главе. В Главе 1 информационный сигнал представлял собой двухкомпонентный марковский случайный процесс (СП), а в Главе 2 он представляет собой квазипостоянную случайную величину, т. е. в Главе 2 рассматривается простейший случай – оценка приемником постоянного или очень медленно меняющегося (по сравнению с хаотической несущей) параметра передатчика. Согласно изначальному предположению в случае применения модели системы связи, представленной в Главе 2, должна значительно возрасти ее помехоустойчивость («ценой» снижения скорости передачи информации по каналу связи). Проведенный в Главах 2, 3 анализ подтвердил первоначальное предположение. Вторым, хотя и менее значительным, преимуществом модели сообщения в Главе 2 является ее простота и, как следствие, некоторое снижение количества вычислений и аппаратных затрат для восстановления информационного сигнала в демодуляторе. В качестве демодулятора в Главе 2 использовался РФК.

В обоих случаях – и когда сообщение считается медленно меняющимся процессом (ММП), и когда сообщение представляет собой двухкомпонентный марковский СП (ДМСП) – получены достаточно хорошие результаты. В первом случае помехоустойчивость увеличивается: минимальное ОСШ, при котором можно осуществлять передачу информации, составляет –10 дБ (СКО = 25%). Во втором случае наименьшее ОСШ, при котором передача информации еще возможна, равно 10 дБ (СКО = 27%, рис. 2а). Зато в случае ДМСП хаотическая несущая находится в том же диапазоне частот, что и само сообщение, в то время как при ММП диапазон частот хаотического сигнала должен быть несопоставимо выше диапазона частот сообщения.

Установлено, что система связи с ДМСП менее требовательна к выбору конкретного способа взаимодействия хаотического и информационного сигнала и выбору передаваемых по каналу связи компонент, чем коммуникационная система с ММП.

Глава 3 посвящена анализу помехоустойчивости систем передачи информации с хаотической модуляцией. Рассматриваются математические модели приемных устройств, представленные в предыдущих главах. Учитываемой помехой является ГБШ. Модели с двумя разными видами полезных сообщений сравниваются между собой.

Критерием качества является относительная СКО. Рабочими характеристиками – зависимости СКО от разных влияющих факторов: ОСШ, ОНС, отношение центральной частоты хаотического сигнала к центральной частоте информационного ($\omega_{\text{хаос}}/\omega_{\text{сообщение}}$).

На рис. 2 представлены рабочие характеристики – СКО(ОСШ). Средний квадрат погрешности аппроксимаций на рис. 2 определялся согласно выражению

$$\overline{\delta^2} = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^M [\delta_i - f(\eta_i)]^2,$$

где δ_i и η_i – СКО и ОСШ i -го измерения, $f(u) = a \exp(-bu)$ – аппроксимирующая функция, a и b – коэффициенты. Среднеквадратичная погрешность $\overline{\delta} = 0.22$ для кривой 1 и $\overline{\delta} = 0.27$ для кривой 2 на рис. 2а, $\overline{\delta} = 0.30$ для кривой 1 и $\overline{\delta} = 0.27$ для кривой 2 на рис. 2б.

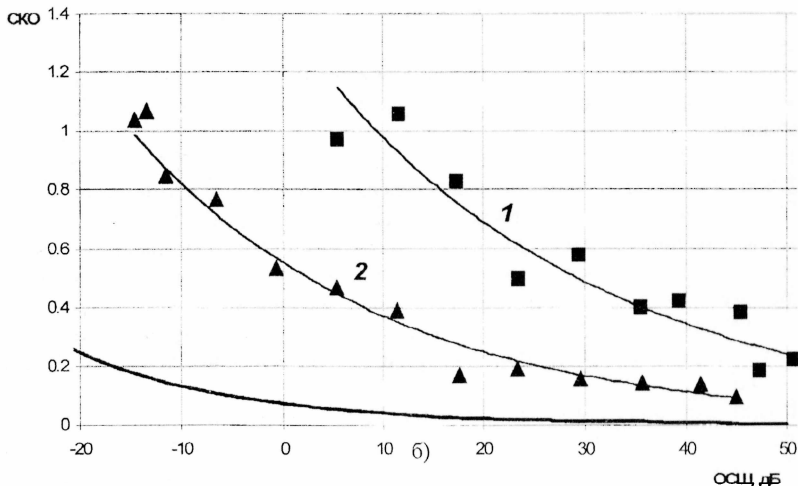
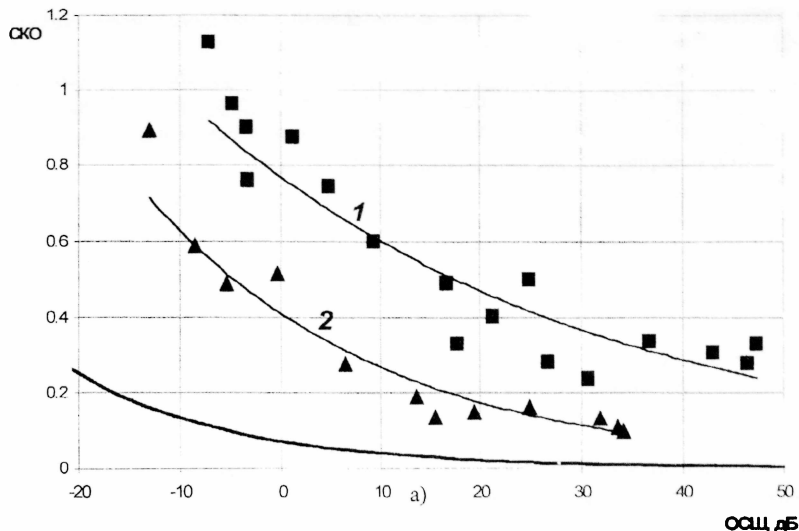


Рис. 2. Зависимость относительной СКО от ОСШ при хаотической модуляции. В качестве исходного генератора хаоса используется система Лоренца. Сообщение представляет собой ДМСП. По каналу связи передается несущая $x(t)$, 1 – ОНС велико, $\eta_{x/\lambda} = 34$ дБ, 2 – ОНС мало, $\eta_{x/\lambda} = 3$ дБ, (а). Передается несущая $y(t)$, 1 – ОНС велико, $\eta_{y/\lambda} = 27$ дБ, 2 – ОНС мало, $\eta_{y/\lambda} = 1$ дБ, (б). Точки – данные моделирования, сплошные линии – аппроксимация данных экспоненциальной функцией. Самая нижняя линия – зависимость СКО от ОСШ для случая непосредственной передачи сообщения по каналу связи – без модуляции.

Основные выводы для случая, когда модель сообщения представляет собой ДМСП следующие.

1. Удовлетворительное качество связи достигается при ОСШ 10 – 20 дБ и более для случая малых ОНС. При больших ОНС требуется большее ОСШ. Например, при нелинейном подмешивании и передаче по каналу хаотической несущей $y(t)$ относительная СКО, меньшая 0.2, достигается при ОСШ 25 дБ.

2. СКО растет с увеличением ОНС, причем во всех рассмотренных случаях, как при наличии информационного сигнала в канале связи (нелинейное подмешивание), так и при его отсутствии (модуляция параметра). Удовлетворительное качество связи достигается, когда ОНС составляет не более 10 – 20 дБ. При ОНС свыше 40 дБ связь практически невозможна: даже при больших ОСШ относительная СКО составляет более 0.5.

3. Два способа ввода полезного сообщения в хаотический сигнал – модуляция параметра и нелинейное подмешивание – сравнивались между собой. В целом качество связи для этих способов сопоставимо. Однако при разных конкретных комбинациях взаимодействий сигналов в хаотическом модуляторе получаются разные результаты: иногда значительно лучше (СКО меньше) модуляция параметра, а иногда нелинейное подмешивание. При примерно одинаковых условиях модуляция параметра предпочтительней, когда по каналу передается переменная состояния $x(t)$. Нелинейное подмешивание предпочтительней, когда по каналу передается переменная состояния $y(t)$ (структура модулятора при этом не меняется).

Ниже приведены основные выводы для случая, когда модель сообщения – медленно меняющийся процесс и заключения, сделанные на основе сравнения двух моделей сообщений.

1. СКО экспоненциально уменьшается при увеличении ОСШ, выраженном в дБ.

2. Как и следовало ожидать, энергетические потери при хаотической модуляции ДМСП более значительны, чем при хаотической модуляции ММП.

3. СКО экспоненциально растет при увеличении ОНС, выраженном в дБ. В случае медленно меняющегося сообщения допустима очень малая глубина модуляции (большое ОНС): относительная СКО составляет 0.2 при ОНС 45 дБ для большого ОСШ и 20 дБ для малого ОСШ. В то же время при модуляции двухкомпонентного марковского СП она составляет 0.2 при ОНС 20 дБ для большого ОСШ и при ОНС 0 дБ для малого ОСШ.

4. При переходе от модели сообщения ДМСП к модели сообщения ММП выигрыш в помехоустойчивости при всех прочих одинаковых условиях зависит от ОСШ (от СКО). Так, при большой СКО ($СКО = 0.4$) этот выигрыш составляет ≈ 13 дБ, а при малой ($СКО = 0.08$) – ≈ 26 дБ.

5. В случае модели сообщения ДМСП диапазон частот сообщения может лежать значительно выше (в несколько раз) центральной частоты спектра хаотического сигнала, и при этом алгоритм еще остается работоспособен. При средних ОСШ и ОНС относительная ошибка составляет примерно 50%, когда отношение центральных частот $\omega_{хаос} / \omega_{сообщение} = 0.2$ раза. Однако воздействие высокочастотного внешнего сигнала, так же как и сигнала большой мощности, приводит к «упорядочиванию» генерируемой модулятором хаотической несущей.

6. Существует некоторое пороговое значение отношения центральных частот $\omega_{\text{хаос}}/\omega_{\text{сообщение}}$, при котором использование двух видов сообщений, ДМСП и ММП, дает одинаковое качество связи. При меньших $\omega_{\text{хаос}}/\omega_{\text{сообщение}}$ предпочтительнее ДМСП, а при больших – ММП. На примере системы передачи информации, основанной на уравнениях Лоренца, установлено, что при средних ОСШ и ОНС это отношение составляет ≈ 70 раз. При $\omega_{\text{хаос}}/\omega_{\text{сообщение}} > 70$ можно условно считать информационный сигнал медленно меняющимся и использовать модель сообщения ММП, а при $\omega_{\text{хаос}}/\omega_{\text{сообщение}} < 70$ более корректным будет применение модели сообщения ДМСП.

Глава 4 посвящена анализу режимов генераторов хаоса. Предложена и опробована соответствующая методика. При этом разработано необходимое программное обеспечение. В результате на базе теории устойчивости, теории бифуркаций и метода Ляпунова получены и представлены графически плоскости параметров различных генераторов хаоса, разбитые на области с регулярным и хаотическим режимами, а также сечения этих плоскостей. Определены области значений параметров для различных систем, при которых наблюдается хаотический режим.

Установлено, что величина максимального показателя Ляпунова в областях с хаотическим поведением следующая: $\lambda_{\text{max}} \approx 2$ – для системы Лоренца, $\lambda_{\text{max}} \approx 0.3$ – для генератора Чуа, $\lambda_{\text{max}} \approx 0.2$ – для осциллятора Дуффинга, $\lambda_{\text{max}} \approx 0.2$ для всех ФАП 3-го порядка и $\lambda_{\text{max}} \approx 0.2$ для ФАП 2-го порядка. Следовательно, по критерию наибольшего λ_{max} предпочтительнее всего система Лоренца.

Наиболее «протяженные» области значений параметров имеет система Лоренца. Кроме того, у этого генератора хаоса в отличие от всех других (осциллятор Дуффинга, генератор Чуа, ФАПы) число «вкраплений» с регулярным поведением невелико. Также следует учесть, что система Лоренца имеет малое число параметров и проста для схемотехнической реализации. Следовательно, в первую очередь, именно систему Лоренца можно предложить в качестве основы построения приемо-передающих систем с хаотической модуляцией.

Установлено, что нелинейные динамические системы 3-го порядка, как системы ФАП, так и прочие автоколебательные контуры, используемые в качестве генераторов хаоса, более предпочтительны, чем системы 2-го порядка. Области существования хаотического режима для всех систем 2-го порядка имеют значительно большее число «вкраплений» – участков с регулярным движением и переходных участков, и, следовательно, системы 2-го порядка допускают меньшее отклонение параметров от номинального значения.

Заключение содержит основные результаты и выводы.

Приложения 1 – 8 содержат используемые методы статистической теории передачи информации и методы теории нелинейной динамики, которые применялись при подготовке диссертации, а также некоторые промежуточные расчеты и исследования, которые в виду их «громоздкости» было целесообразно поместить именно в Приложения. **Приложение 9** содержит рисунки с результатами работы моделей приемных устройств, реализованных в пакете “MatLab”. В конце диссертации прилагаются копии

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные и представленные в данной работе результаты расширяют представление о закономерностях динамики нетрадиционных широкополосных систем приема. Результаты и рекомендации могут быть использованы при расчете и построении коммуникационных систем с хаотической модуляцией. В соответствии с целью диссертации и поставленными задачами получены следующие основные результаты.

1. Показана применимость теории методов оптимальной фильтрации для случая приема хаотических сигналов – показана работоспособность модели системы передачи информации с хаотической модуляцией для случая, когда в качестве приемного устройства используется РФК, а полезное сообщение представляет собой двухкомпонентный марковский случайный процесс. Такая система обладает рядом преимуществ по сравнению с другими, не использующими методы оптимальной фильтрации и представленными, в частности, в работе Дмитриева А. С. и др. (2002), системами.

2. Проведен анализ помехоустойчивости модели приемного устройства для случая аддитивного ГБШ в канале связи. Определены наихудшие условия, для которых передача информации при хаотической модуляции еще возможна при использовании в качестве приемного устройства РФК. Получены минимально допустимые ОСШ и ОНС, при которых еще сохраняется работоспособность. Рассмотрены и сравнены между собой случаи с двумя разными моделями сообщения: ДМСП и ММП. Исследования проводились на примере, когда в качестве базового генератора хаоса использовалась система Лоренца.

3. Разработана методика анализа поведения динамических систем, позволяющая определять границы диапазонов значений параметров, соответствующих хаотическому поведению систем, для чего было создано и отлажено необходимое программное обеспечение. Методика и написанная программа Sysviever отработаны на классических генераторах хаоса – осцилляторе Дуффинга, системе Лоренца и схеме Чуа. На основе анализа, выполненного согласно описанной методике, получены области значений параметров для нескольких динамических систем, при которых наблюдается хаотический режим. Даны практические рекомендации по выбору генераторов хаоса и конкретных значений их параметров для получения того или иного режима работы.

Основные выводы, сделанные на основе полученных результатов, следующие.

- Минимальное ОСШ, при котором еще возможен прием, составляет -10 дБ: $СКО = 25\%$, когда сообщение представляет собой медленно меняющийся процесс, и $СКО = 60\%$, когда сообщение – двухкомпонентный марковский процесс (рис. 2а).
- Применение расширенного фильтра Калмана позволяет легко синхронизировать хаотические колебания: при ОСШ 17 дБ длительность переходного процесса составляет долю периода центральной частоты хаотического сигнала (рис. 1).
- Нелинейное подмешивание и модуляция параметра дают сопоставимое качество связи (рис. 2).

- Диапазон частот полезного сообщения может лежать выше диапазона частот хаотической несущей: при отношении центральных частот $\omega_{\text{сигн}}/\omega_{\text{несущей}} = 0.2$ раза относительная ошибка фильтрации составляет примерно 50%.

По теме диссертации имеются следующие труды

1. Аливер В. Ю. Использование расширенного фильтра Калмана для демодуляции хаотических колебаний // Вестник МГТУ им. Баумана. Приборостроение. – 2005. – № 1. – С. 100 – 122.
2. Аливер В. Ю. Квазиоптимальные демодуляторы хаотических сигналов // Цифровая обработка сигналов и ее применение: Сборник трудов 7-ой Международной Конференции и Выставки; В 2 т. – Москва, 2005. – Т. 2. – С. 358 – 361.
3. Аливер В. Ю., Сидоркина Ю. А., Шахтарин Б. И. Приемники частотно-модулированных сообщений и их анализ // Радиофизика и электроника на пороге 21-го века, школа-семинар: Сборник трудов молодых ученых, аспирантов и студентов. – Ярославль, 2001. – С. 3 – 11.
4. Аливер В. Ю., Шахтарин Б. И. Анализ цифровой системы фазовой автоподстройки первого порядка с неравномерной дискретизацией // 57-ая Международная Научная сессия, посвященная Дню радио: Сборник трудов; В 2 т. – Москва, 2003. Т. 2. – С. 132 – 135.
5. Аливер В. Ю., Сидоркина Ю. А., Шахтарин Б. И. Приёмники сигналов с частотной манипуляцией и их анализ // Вестник МГТУ ГА. Радиофизика и радиотехника. – 2002. – № 54. – С. 132 – 139.
6. Аливер В. Ю., Петрухина О. С., Шахтарин Б. И. Статистические характеристики цифровых систем синхронизации // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 2002. – Т. 49, № 4. – С. 62 – 74.
7. Аливер В. Ю., Сидоркина Ю. А., Шахтарин Б. И. Статистические характеристики цифровых систем синхронизации // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2003. – Т. 8, №2. – С. 59 – 74.
8. Тихонов В. И., Шахтарин Б. И., Аливер В. Ю. Режекция помехи фильтром Калмана // Радиотехника и электроника. – 2003. – Т. 48, №4. – С. 420 – 428.
9. Шахтарин Б. И., Сидоркина Ю. А., Аливер В. Ю. Хаос в системе фазовой автоподстройки частоты третьего порядка // 58-ая Международная Научная сессия, посвященная Дню радио: Сборник трудов; В 2 т. – Москва, 2003. – Т. 2. – С. 32 – 34.
10. Шахтарин Б. И., Аливер В. Ю. Применение фильтра Калмана для режектирования помехи // 58-ая Международная Научная сессия, посвященная Дню радио: Сборник трудов; В 2 т. – Москва, 2003. – Т. 2. – С. 52 – 54.

11. **Регулярные и хаотические колебания в трех генераторах хаоса** / Б. И. Шахтарин, Ю. А. Сидоркина, В. Ю. Аливер и др. // Синхронизация, формирование и обработка сигналов. Материалы всероссийского научно-технического семинара. – Ярославль, 2003. – С. 107 – 110.
12. **Хаотические колебания в системах ФАП 3-го порядка** / Б. И. Шахтарин, Ю. А. Сидоркина, В. Ю. Аливер и др. // Современная радиоэлектроника в ретроспективе идей В. А. Котельникова: Международная научная конференция к 95-летию академика В. А. Котельникова: Программа и тезисы докладов. – М., 2003. – С. 61 – 63.
13. **Исследование режимов генераторов хаоса** / Б. И. Шахтарин, Ю. А. Сидоркина, В. Ю. Аливер и др. // Радиотехника и электроника. – 2003. – Т. 48, №12. – С. 1471 – 1483.
14. **Шахтарин Б. И., Аливер В. Ю. Эквивалентность двух подходов к задаче оптимальной фильтрации** // Вестник МГТУ. Машиностроение. – 2003. – Т. 53, № 4. – С. 25 – 32.
15. **Шахтарин Б. И., Сидоркина Ю. А., Аливер В. Ю. Исследование хаотических режимов в системе фазовой автоподстройки частоты третьего порядка** // Научный вестник МГТУ ГА. Радиофизика и радиотехника. – 2003. – № 61. – С. 100 – 110.
16. **Шахтарин Б. И., Аливер В. Ю. Режекция помехи фильтром Калмана** // Проектирование систем: Тезисы докладов XXX всероссийской научно-технической конференции. – М., 2003. – С. 15 – 20.
17. **Оценка качества демодуляторов сигналов с фазовой манипуляцией** / В. Ю. Аливер, Ю. А. Сидоркина, Б. И. Шахтарин и др. // Научный вестник МГТУ ГА. Радиофизика и радиотехника. – 2003. – № 61. – С. 187 – 190.
18. **Дискретные системы фазовой синхронизации и методы их анализа: Учебное пособие** / Шахтарин Б. И., Казаков Л. Н., Аливер В. Ю. и др. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 72 с.
19. **Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Статистическая радиотехника»** / Б. И. Шахтарин, В. В. Сизых, В. Ю. Аливер и др. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 28 с.
20. **Методы анализа и синтеза цифровых радиотехнических систем: Отчет о НИР по теме Г2-2Г/99 / МГТУ. НИИ СМ; Руководитель Б. И. Шахтарин; Исполн.: В. Ю. Аливер, Ю. А. Сидоркина, Д. А. Святный и др.; № ГР 02.200205536; Инв. № 200205820. – М.: 2002. – 157 с.**
21. **Методы анализа и синтеза радиотехнических систем: Отчет о НИР по теме СМ2-285 / МГТУ. НИИ СМ; Руководитель Б. И. Шахтарин; Исполн.: В. Ю. Аливер, Ю. А. Сидоркина, Д. А. Святный и др.; № ГР 02.200307281; Инв. № 200305821. – М.: 2003. – 89 с.**

Подписано к печати 13.04.2005. Зак. 106. Объем 1.0 п.л. Тир. 100 экз.

Типография МГТУ им. Н. Э. Баумана