

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.396

Дубровский
Василий Викторович

**ГЕНЕРАЦИЯ СИГНАЛОВ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ
НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ХАОСА**

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.03 – «Радиофизика»

Минск 2007

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель: *Чердынцев Валерий Аркадьевич*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехнических устройств учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: *Аксенчик Анатолий Владимирович*, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры вычислительных методов и программирования учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Ярмолик Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент, начальник цикла – профессор кафедры радиолокации и радиоприёмных устройств учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь»

Оппонирующая организация: Белорусский государственный университет

Защита состоится 20 декабря 2007 г. в 14⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.05 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013 Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В последние десятилетия наметилась тенденция к созданию высокоскоростных и информационно защищённых средств связи и передачи данных. Особое место среди информационных систем занимают системы, которые используют сигналы, формируемые нелинейными динамическими системами. Такие сигналы называются *хаотическими* или *хаос-сигналами*. Применение хаос-сигналов представляет интерес по причине их высокой алгоритмической сложности, что положительно влияет на защищённость канала от несанкционированного доступа. Однако сверхвысокая чувствительность таких устройств к отклонениям параметров и начальных условий существенно снижает возможность практического использования хаос-сигналов в информационных системах, работающих в канале с помехами.

В диссертационной работе предлагается комплексный подход к решению проблемы передачи хаотических сигналов по каналу с аддитивными помехами, базирующийся на использовании теории сигналов, теории динамических систем и марковской теории нелинейной фильтрации. Ключевыми понятиями в работе являются: хаотические последовательности; хаотическая модуляция радиосигналов; обратная связь по дискретным и непрерывным параметрам; синхронизация и демодуляция хаотических радиосигналов.

Связь работы с крупными научными программами и темами

Результаты диссертационной использовались в госбюджетных НИР, выполнявшихся на кафедре радиотехнических устройств БГУИР: «Разработать теорию, алгоритмы и программные средства формирования и приёма хаос-сигналов в нелинейных каналах с негауссовскими помехами» (ГБ № 01-2010, гос. регистрация № 20064304); «Разработать теорию, алгоритмы, методологию структурно-функциональной схемотехники и программно-аппаратные средства формирования, приёма и обработки сигнально-кодовых конструкций в помехозащищённых радиоинформационных системах» (ГБ № 06-2010, гос. регистрация № 20066154); «Перестановочные алгоритмы и обработка шумоподобных сигналов» (ГППИ «Приборостроение» на 2004-2005 г.г. гос. регистрация № 20021222).

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является создание методов генерации сигналов на основе динамического хаоса и их оптимальной обработки, которые позволяют обеспечить помехоустойчивую, скрытную и защищённую передачу информации по каналам с помехами.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- определение методов генерации хаотических сигналов на основе нелинейных динамических систем и их характеристик, обеспечивающих заданное стохастическое поведение системы;

- анализ статистических, спектральных и корреляционных свойств хаотических сигналов, формируемых нелинейной динамической системой с одномерным отображением;

- решение задачи нелинейной фильтрации радиосигналов с *дискретно-непрерывными случайными и хаотическими параметрами* в условиях действия помех, обеспечивающее помехоустойчивую синхронизацию и демодуляцию радиосигнала;

- конкретизация общих уравнений фильтрации для различных видов функциональной связи между информационным сообщением и хаотическим сигналом;

- анализ помехоустойчивости приёма радиосигналов с хаотической амплитудно-фазовой и фазовой модуляциями; сложных фазоманипулированных сигналов с псевдослучайной перестройкой радиочастоты; сложного фазоманипулированного сигнала с хаотической модуляцией по задержке псевдослучайной последовательности;

- создание численных моделей устройств генерации и фильтрации сигналов, максимально приближенных к реальным условиям работы радиофизических систем.

Объектом исследования является информационная система в условиях действия мультипликативных и аддитивных помех. *Предметом исследования* являются задачи генерирования, модуляции, синхронизации и демодуляции радиосигналов с хаотическими компонентами в условиях действия помех.

Положения, выносимые на защиту

1. Классификация, методы генерирования сложных радиосигналов с хаотической модуляцией параметров и их модели. Сложные *радиосигналы с большой базой и хаотической модуляцией параметров* позволяют существенно снизить требования к отношению сигнал/шум в канале с помехами при обработке информации на основе динамического хаоса.

2. Впервые полученные уравнения обобщённой синхронизации и демодуляции радиосигналов с хаотическими и дискретно-непрерывными марковскими параметрами в условиях действия аддитивных гауссовских и негауссовских марковских помех. Полученные уравнения отличаются от известных тем, что *фильтрации подвергается объединённый процесс* $X(t) = \{h, \lambda\}$, включающий наряду с вектором сопутствующих параметров $\lambda(t)$ хаотические компоненты $h(t)$.

3. Уравнения фильтрации и структурно-функциональные схемы обработки хаотических радиосигналов: с фазовой модуляцией; сложных сигналов с псевдослучайной перестройкой частоты; фазоманипулированных сигналов с хаотической модуляцией по задержке.

4. Результаты численного моделирования формирователей и устройств обобщённой синхронизации радиосигналов с хаотическими компонентами: статистические зависимости выходного отношения сигнал/шум от отношения сигнал/шум на входе устройств обработки информации.

Минимальное входное отношение сигнал/шум в случае обработки сложного фазоманипулированного сигнала с модуляцией по задержке псевдослучайной последовательности и выходном отношении сигнал/шум 20 дБ составляет 14,3 дБ при базе 15. При одинаковых условиях в случае обработки фазоманипулированного сигнала минимальное входное отношение сигнал/шум составляет 23 дБ.

Личный вклад соискателя

Подход к повышению качественных показателей информационных систем на основе динамического хаоса, цель и задачи определены научным руководителем доктором технических наук, профессором В. А. Чердынцевым. Личным вкладом соискателя являются разработка критериев применимости хаотических сигналов, синтез алгоритмов обработки применительно к конкретным, используемым на практике, видам сигналов, а также численное моделирование разработанных систем.

Апробация результатов диссертации

Материалы, вошедшие в диссертационную работу докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях.

VI-ая Международная летняя школа-семинар аспирантов и студентов «Современные информационные технологии». Браслав, 2003 г. II Белорусско-российская научно-техническая конференция «Технические средства защиты информации». Минск – Нарочь, 17...21 мая 2004 г. III Белорусско-российская научно-техническая конференция «Технические средства защиты информации». Минск – Нарочь, 23...27 мая 2005 г. IX Международной научно-технической конференции «Современные средства связи». Нарочь, 2004 г. X Международной научно-технической конференции «Современные средства связи». Нарочь, 2005 г. Совместная школа-семинар кафедр РТУ и РТС БГУИР 25 апреля 2005 г. Доклад на тему: «Методы обработки сигналов в цифровых каналах связи». Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и учёных «Молодёжь и современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2006». Севастополь, 17...21 апреля 2006 г.

Опубликованность результатов диссертации

Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 14 печатных работах общим объёмом 102786 печатных знаков на 51 странице в том числе 9 статей в рецензируемых научных журналах (87419 печ. зн.), 4 статьи в сборниках материалов конференций и 2 тезиса докладов в сборнике тезисов докладов (15367 печ. зн.).

Результаты диссертационного исследования реализованы в *полезных моделях*: патент Республики Беларусь № 1823 «Система передачи дискретной информации с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты при фазовой информационной манипуляции сигнала», заявка № u20040312 и патент

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из общей характеристики работы, четырёх глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Первая глава посвящена обзору современных радиоинформационных систем. Обсуждены возможности и особенности использования сигналов на основе динамического хаоса для передачи информации по каналу с помехами. Во второй главе рассматриваются методы генерации хаос-сигналов и радиосигналов на их основе. В третьей главе на основе марковской теории оптимальной нелинейной фильтрации решены задачи выделения из радиосигнала хаотических компонент в условиях действия как гауссовских, так и коррелированных марковских помех. Четвёртая глава посвящена конкретизации полученных в главе 3 общих уравнений для сигналов с различными видами функциональной взаимосвязи между сообщением и хаотическим радиосигналом. Общий объём работы составляет 144 страницы, в том числе: 107 страниц машинописного текста, 47 рисунков на 35 страницах, 4 таблицы на 4 страницах, библиография из 87 наименований на 7 страницах и 4 приложения на 26 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава содержит обзор используемых в настоящее время сигнальных конструкций. Проведена их строгая классификация. Показана целесообразность применения сигналов на основе динамического хаоса в системах передачи сообщений. Указаны проблемы достижения синхронного отклика при передаче хаотических сигналов через радиоканал и определено направление диссертационной работы.

Вторая глава посвящена вопросам генерации хаоса в радиофизике, а также методам генерации радиосигналов с хаотическими компонентами.

Следует различать три класса схем генерации хаос-процессов:

- 1) схемы на основе так называемого «чистого» хаоса, фазовое пространство которого представляет континуум значений;
- 2) схемы, формирующие континуальный хаос-процесс с фиксированными временными отсчётами;
- 3) схемы, формирующие значения процесса в фиксированные моменты времени и квантованные по уровню.

Применение первого типа хаос-процесса предполагает создание на приёмной и передающей сторонах строго идентичных генераторов хаос-процессов, что с учётом континуальности значений процесса затрудняет надёжный приём в условиях реального радиоканала.

Второй тип хаос-процесса предполагает обработку его *абсолютных значений*, основная идея которой состоит в анализе текущего и нескольких

предыдущих состояний системы. Эти значения взаимосвязаны детерминированной нелинейной функцией, которая определяет характеристики сигнала [3-А, 10-А]. Использование различных нелинейных функций в формирователе хаос-процесса позволяет управлять типом сигнала, его корреляционными и статистическими свойствами. Однако, если в качестве формирующей используется функция одной переменной, то в случае относительно мало зашумлённого канала появляется возможность проанализировать одну реализацию принимаемого процесса и определить вид нелинейности, что негативно сказывается на защищённости канала от перехвата. Поэтому в целях улучшения эффективности системы предпочтительнее в качестве формирующих выбирать более сложные функциональные зависимости. При наличии в канале релеевских замираний необходима нормировка сигнала.

Третий тип хаос-процессов наиболее приемлем для сильно зашумлённых каналов, так как воздействие помехи будет нивелироваться защитным интервалом, равным половине уровня квантования хаос-процесса.

Перспективным является кодирование состояний хаос-процесса ортогональными последовательностями такими как функции Уолша. Это позволяет сохранить положительные качества непрерывного хаос-процесса и осуществлять передачу сигнала в условиях значительных помех.

Приведены в наиболее общей матричной форме методы наложения вектора аналогового сообщения λ , содержащегося в функции $S(t, \lambda)$, на вектор хаотического колебания $h(t)$. **Первый вариант** объединяет системы, в которых имеется генератор хаотического колебания с заданными параметрами, а объединение состоит в сложении сигнала $S(t, \lambda)$ с хаос-процессом $h(t)$ на выходе генератора. Передаваемый по каналу связи хаос-сигнал $H(t)$ представляется в виде

$$H(t) = A^T h(t) + S(\lambda, t). \quad (1)$$

Вектор A показывает, какая компонента хаотического колебания передаётся по каналу связи. В рассматриваемом случае колебание $h(t)$ играет роль хаотической маскировки.

Во втором варианте осуществляется нелинейное подмешивание, что предполагает изменение выходного колебания генератора хаоса за счёт введения сигнала $S(t, \lambda)$:

$$\frac{dh}{dt} = f(h) + BC^T S(t, \lambda). \quad (2)$$

Здесь матрица C определяет компоненту вектора $S(t, \lambda)$, управляющую работой генератора хаоса, а матрица B определяет компоненты хаотических колебаний, с которыми складывается сигнал. Канальное колебание (хаос-сигнал) определяется компонентой хаос-процесса:

$$H(t) = A^T h. \quad (3)$$

Третий вариант предполагает нелинейное подмешивание (2) с наложением: сигнал вводится в генератор хаотических колебаний и, кроме того, взаимодействует с выходным колебанием. Уравнения работы

генератора хаотических колебаний имеет вид (2). Передаваемый хаос-сигнал в канале связи представляется в виде

$$\mathbf{H}(t) = \mathbf{A}^T \mathbf{h} + \mathbf{C}^T \mathbf{S}(t, \lambda). \quad (4)$$

В качестве модели сигнала $\mathbf{S}(t, \lambda)$ рассматривается комбинация компонент некоторого векторного марковского процесса

$$\mathbf{S}(t) = \mathbf{C}^T s(t), \quad (5)$$

где

$$\frac{ds(t)}{dt} = \mathbf{f}_s(s) + \mathbf{n}_s(t), \quad (6)$$

$\mathbf{f}_s(s)$ – нелинейная векторная функция; $\mathbf{n}_s(t)$ – векторный белый гауссовский шум (БГШ) с заданной матрицей спектральных плотностей \mathbf{N}_s .

На основе указанных моделей удаётся построить алгоритмы обработки хаос-сигналов в канале с белым гауссовским шумом $\mathbf{n}(t)$. Наблюдаемый процесс $\mathbf{Y}(t)$ представляет аддитивную смесь хаос-сигнала $\mathbf{H}(t)$ и белого гауссовского шума:

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{H}(t) + \mathbf{n}(t). \quad (7)$$

В качестве нелинейного преобразования можно использовать операцию перемножения:

$$\mathbf{H}(t) = \mathbf{A}^T \mathbf{h}(t) \mathbf{S}(t, \lambda). \quad (8)$$

В данном случае хаос-процесс $\mathbf{h}(t)$ выступает в качестве энергетического параметра сигнала $\mathbf{S}(t, \lambda)$ и входит в хаос-сигнал линейно.

Ещё один вариант предполагает осуществление нелинейного преобразования на основе модуляции параметров сигнала $\mathbf{S}(t, \lambda)$:

$$\mathbf{H}(t) = \mathbf{S}(t, \lambda, \mathbf{h}). \quad (9)$$

В зависимости от способа генерации сигнала $\mathbf{S}(t, \lambda)$ количество параметров, варьируемых хаос-процессом, может быть различным. Для простых сигналов, у которых база $B = FT \cong 1$ (F – полоса спектра, T – продолжительность сигнала), варьируемыми параметрами могут быть амплитуда (случай (8)), фаза и частота.

Для сложных сигналов с манипуляцией фазы несущего колебания псевдослучайной последовательностью (ПСП) $g(t)$ база $B \gg 1$, помимо указанных параметров, можно управлять задержкой ПСП $g(t - \tau)$.

Установлена взаимосвязь между нелинейной функцией $f(h)$ и одномерной плотностью распределения $W(h)$ хаотического процесса:

$$\frac{d}{dh} [f(h)W(h)] = -\varepsilon \frac{N_h}{4} \frac{d^2 W(h)}{dh^2}, \quad (10)$$

где $N_h/2$ – спектральная плотность формирующего белого гауссовского шума, ε – малый параметр.

При кусочно-линейной функции $f(h)$ уравнение (10) сводится к системе дифференциальных уравнений второго порядка относительно

функции $W(h)$. При генерации радиосигналов с хаотическими параметрами важно, чтобы одномерная плотность распределения модулирующего хаос-процесса была равномерной в заданном диапазоне. Показано, что для этого необходимо применять кусочно-линейные функции.

Для качественного выделения хаос-сигналов их принимаемой смеси сигнала и шума целесообразно их формировать в зонах значений, отдалённых от нулевых. С этой целью предложен метод локализации хаос-сигналов и их обработки на основе накопления данных о фазовой плоскости отображения.

Рассмотренные методы генерации хаос-сигналов обеспечивают передачу и приём дискретных $\theta(t)$ и непрерывных $\lambda(t)$ сообщений, содержащихся в радиосигнале $s(t, \theta, \lambda)$. Для оптимизации алгоритмов приёма и выделения информационных параметров предлагается использовать *статистическую теорию нелинейной фильтрации*.

В третьей главе рассмотрены уравнения фильтрации дискретно-непрерывных процессов содержащихся в радиосигнале с хаотической модуляцией, отличающиеся от известных тем, что *фильтрации подвергается объединённый процесс* $\mathbf{X}(t) = \{\mathbf{h}, \lambda\}$, включающий наряду с синхропараметрами $\lambda(t)$ хаотические компоненты $\mathbf{h}(t)$ [5-А]. В общем случае, дискретный информационный параметр θ с k состояниями оценивается по критерию максимума апостериорной вероятности состояния $P_i(\cdot)$.

$$P_i(t, \mathbf{X}, h) = \frac{P_i(t_k + 0 | \mathbf{X}) \exp \int_{t_k}^t F_i(\tau, \mathbf{X}, h) d\tau}{\sum_{j=1}^k P_j(t_k + 0 | \mathbf{X}) \exp \int_{t_k}^t F_j(\tau, \mathbf{X}, h) d\tau} \quad (11)$$

Здесь

$$P_i(t_k + 0 | \mathbf{X}) = \sum_{i=1}^k \pi_{ij}(t_{k+1}) P_i(t_k - 0 | \mathbf{X}), \quad (12)$$

где $\pi_{ij}(t_{k+1})$ – вероятность перехода дискретного параметра из состояния i в состояние j в момент времени t_{k+1} .

Компонента $F(\cdot)$, содержащая наблюдаемый процесс, усредняется с учётом апостериорных вероятностей состояний дискретного процесса, а в качестве текущих значений вектора $\mathbf{X}(t)$ берутся его оценки $\mathbf{X}^*(t)$. Такой алгоритм предполагает постоянство процесса $\mathbf{X}(t)$ на интервале генерации процесса $P_i(\cdot)$. Если вышеуказанное условие не выполняется, то совместная апостериорная плотность распределения вероятности дискретно-непрерывных процессов представляется в виде произведения условной плотности распределения непрерывных компонент на безусловную апостериорную вероятность состояния дискретного процесса. Такое

представление приводит к алгоритму переприсвоения значений оценок непрерывных компонент, сформированных в конце интервала генерации P_i , соответствующему каналу обработки. Алгоритм реализуется в виде многоканального фильтра, число каналов которого определяется числом состояний дискретного параметра θ .

Уравнения фильтрации непрерывных процессов выводятся из уравнения Р. Л. Стратоновича методом гауссовской аппроксимации апостериорной плотности $W(t, \mathbf{X} | Y_0')$:

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{A}_x(t, \lambda) + \mathbf{K}_x \left[\frac{\partial F_\theta(t, \lambda, h)}{\partial \mathbf{X}} \right]_{\lambda=\lambda^*}^T; \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{K}_x}{dt} = & \mathbf{B}_{xx}(t, \mathbf{X}) + \frac{\partial \mathbf{A}_x(t, \mathbf{X}^*)}{\partial \mathbf{X}} + \mathbf{K}_x \left[\frac{\partial \mathbf{A}_x(t, \mathbf{X}^*)}{\partial \mathbf{X}^*} \right] + \\ & + \mathbf{K}_x \left[\left(\frac{\partial}{\partial \lambda} \right)^T \frac{\partial F_\theta(t, \mathbf{X}^*)}{\partial \mathbf{X}^*} \right]_{\mathbf{X}=\mathbf{X}^*} \cdot \mathbf{K}_x; \end{aligned} \quad (14)$$

$$F_\theta(t, \mathbf{X}) = \sum_{i=1}^k F_i(t, \mathbf{X}) P_i(t, \mathbf{X}), \quad (15)$$

где апостериорная вероятность $P_i(t, \mathbf{X})$ определяется из (11) с учётом $\mathbf{X} = \mathbf{X}^*$. \mathbf{B} и \mathbf{A} – матрицы диффузии объединённого процесса $\mathbf{X}(t)$. Для компонент хаотического процесса $h(t)$ диффузионная матрица $\mathbf{B}_{xx} = 0$.

Согласно (13) и (15) формирование текущих оценок объединённого процесса $\mathbf{X}^*(t)$ осуществляется с учётом апостериорных вероятностей P_i состояний дискретного процесса $\theta(t)$, что означает включение обратной связи по дискретному параметру (ОСДП) в алгоритм фильтрации.

Впервые получены общие уравнения фильтрации дискретно-непрерывных параметров хаос-сигналов для коррелированных помех марковского типа [9-А], описываемых нелинейными стохастическими дифференциальными уравнениями. Уравнения фильтрации трактуются аналогично случаю помехи в виде белого гауссовского шума (БГШ). Алгоритм фильтрации предполагает операцию «выбеливания» помехи, что изменяет процедуру формирования оценок хаос-сигнала по сравнению с помехой БГШ.

Решение задачи обобщенной синхронизации заключается в формировании апостериорной плотности вероятности (АПВ) объединённого вектор-столбца $\mathbf{X} = \{\lambda, \mathbf{h}\}$ размерности $l + n = p$, включающего синхропараметры λ и хаос-процессы $\mathbf{h}(t)$: $\mathbf{X} = [\lambda_1, \dots, \lambda_n, h_1, \dots, h_l]^T$. Оценки компонент этого вектора определяются в соответствии с критерием максимума АПВ.

Векторно-матричная форма записи уравнений обобщённой синхронизации для математических ожиданий $\mathbf{X}^*(t)$ и корреляционной

матрицы ошибки оценки $R(t)$ имеет вид аналогичный (13), где вместо $F_\theta(\cdot)$ вводится функция $F(t, X^*)$:

$$\frac{dX^*(t)}{dt} = A(t, X^*) + R(t)F_1(t, X^*), \quad (16)$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = N_0 + A(t, X^*)R(t) + R(t)F_2(t, X^*)R(t). \quad (17)$$

Здесь введено обозначение:

$$F_2(t, X) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 F(t, X)}{\partial X_1} & \frac{\partial^2 F(t, X)}{\partial X_1 \partial X_2} & \dots & \frac{\partial^2 F(t, X)}{\partial X_1 \partial X_p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial^2 F(t, X)}{\partial X_p \partial X_1} & \frac{\partial^2 F(t, X)}{\partial X_p \partial X_2} & \dots & \frac{\partial^2 F(t, X)}{\partial X_p} \end{bmatrix}.$$

Техническая реализация приведенных уравнений сопряжена с трудностями. При $p > 2$ общее количество уравнений определяется p уравнениями для оценок X_i^* и $p(p+1)/2$ уравнениями для элементов корреляционной матрицы $R_{ij}(t) = R_{ji}(t)$.

Существенное упрощение алгоритма синхронизации возможно путем усреднения зависящих от времени членов уравнения (17). При этом периодические функции времени заменяются их средними за период значениями. Для стационарного решения задачи синхронизации можно считать $dR(t)/dt = 0$. При указанных условиях уравнения (17) переходят в систему алгебраических и могут быть решены.

Приведённые общие уравнения фильтрации позволяют получить и реализовать конкретные алгоритмы и структурные схемы *нелинейных адаптивных фильтров* для конкретных радиосигналов с хаотическими компонентами.

Четвертая глава посвящена конкретизации уравнений фильтрации, полученных в главе 3, для различных типов хаотических радиосигналов: с амплитудно-фазовой хаотической модуляцией; с хаотической фазовой модуляцией; с амплитудной хаотической модуляцией и псевдослучайной перестройкой радиочастоты; с псевдослучайной фазовой манипуляцией и хаотической модуляцией задержки.

Структурные схемы устройств приёма сигналов определяются уравнениями для оценок $X^*(t)$:

$$\frac{dX^*(t)}{dt} = \tilde{A}(t, X^*, Y) + \tilde{K} \left[\frac{\partial F(t, X^*, Y)}{\partial X^*} \right]^T, \quad (18)$$

где \tilde{K} – матрица усредненных моментов второго порядка; локальная характеристика $\tilde{A}(t, X^*, Y)$ – определяется соотношением

$$\begin{aligned} \bar{A}(t, \mathbf{X}^*, \mathbf{Y}) = & \mathbf{A}_X(t, \mathbf{X}^*) + \mathbf{B}_{XY} \mathbf{B}_{YY}^{-1} \left(\frac{d\mathbf{Y}}{dt} - \mathbf{A}_Y \right) - \\ & - \frac{1}{2} \left[\left\{ \mathbf{B}_{XY}^T \left(\frac{\partial}{\partial \mathbf{X}} \right)^T \right\}^T \mathbf{B}_{YY}^{-1} \mathbf{B}_{XY}^T \right]^T - \frac{1}{2} \left[\left\{ \mathbf{B}_{YY} \left(\frac{\partial}{\partial \mathbf{Y}} \right)^T \right\}^T \mathbf{B}_{YY}^{-1} \mathbf{B}_{XY}^T \right]^T. \end{aligned} \quad (19)$$

Здесь \mathbf{Y} – вектор наблюдаемых процессов.

Квазиоптимальный алгоритм нелинейной фильтрации непрерывных сообщений, определяемый СДУ (18) и соотношением (19), конкретизируется для построения структурных схем квазиогерентной обработки сигналов в каналах с негауссовскими марковскими помехами.

Показано, что при наличии помех эффективность простых сигналов снижается, поэтому рассмотрен вопрос синхронизации и демодуляции сложного радиосигнала с хаотическими компонентами.

Генерация хаотического процесса и введение в него сообщений осуществляется в низкочастотной области путем нелинейного подмешивания или переключения хаотических режимов. Выделение сообщений при этом осуществляется на основе синхронного отклика или зонального декодирования соответственно. При обобщенной синхронизации качество синхронного отклика определяется точностью оценивания *случайно изменяющихся параметров радиосигнала – переносчика хаос-процесса*. Их можно назвать *синхропараметрами*. К таким параметрам относятся фаза, частота, амплитуда несущего колебания, а также задержка псевдослучайной последовательности (ПСП). На качество выделения сообщения помимо аддитивного канального шума влияют помехи, вызванные ошибками оценивания указанных синхропараметров радиосигнала. Для снижения взаимного влияния ошибок в передаваемый сигнал $s(t, \lambda, h)$ вводится аддитивная компонента, т. е. пилот-сигнал $s_n(t, \lambda)$:

$$s(t, \lambda, h) = s_n(t, \lambda) + s_h(t, \lambda, h), \quad (20)$$

где $\lambda \equiv \bar{\lambda}(t)$ – вектор синхропараметров радиосигнала; $\mathbf{h} \equiv \bar{h}(t)$ – вектор хаос-процесса с нелинейно подмешанным сообщением. Хаос-процесс \mathbf{h} , содержащий сообщение, выделяется коррелятором, в котором выделенный пилот-синхросигнал используется в качестве опорного.

Согласно (16), в котором следует принять $\mathbf{R}(t) = \mathbf{R} = \text{const}$, и с учетом априорной независимости синхропараметра λ и хаос-процесса \mathbf{h} смешанные моменты $R_{h\lambda} \cong 0$. Если при этом генерация сигнала осуществляется в соответствии с (20), то оценки $\lambda^*(t)$ могут формироваться на основе укороченных уравнений, определяемых компонентами $s_n(t, \lambda)$ и $s_h(t, \lambda)$ сигнала (20):

$$\frac{d\lambda^*(t)}{dt} = \mathbf{K}(t, \lambda^*) + \mathbf{R}_{\lambda\lambda} \mathbf{F}_1(t, \lambda^*), \quad (21)$$

$$\frac{d\mathbf{h}'(t)}{dt} = \mathbf{K}(t, \mathbf{h}') + \mathbf{R}_{hh} \mathbf{F}_1(t, \mathbf{h}', \lambda'); \quad (22)$$

В уравнении (22) используются оценки $\dot{\mathbf{g}}'(t)$, сформированные в (21). Таким образом, исключаются перекрестные связи из блока оценки $\mathbf{h}(t)$ в блок оценки $\lambda(t)$.

Структурные схемы приёма и обработки хаос-сигналов с амплитудно-фазовой модуляцией несущего колебания отличаются от известных инвариантностью приёма к значениям случайной начальной фазы и сравнительно высокой помехоустойчивостью, приближающейся к потенциальной [4-А]. Обработка таких сигналов основана на накоплении компонент, содержащих случайную начальную фазу, и формировании опорных значений фазы для синхронного выделения хаотического процесса.

Псевдослучайная перестройка рабочей частоты хаос-сигнала с амплитудно-фазовой модуляцией позволяет не только избежать негативного влияния узкополосных помех на верность воспроизведения сообщения, но и эффективно их подавить за счёт оптимального безынерционного преобразования и фильтрации [2-А, 15-А].

При оптимальном приёме хаос-сигналов с фазовой модуляцией колебания оценивание фазы на тактовом интервале хаос-процесса позволяет решить проблему нормировки оцениваемого процесса и сформировать синхронный отклик [7-А]. Зависимость отношения сигнал/шум на выходе устройства обобщённой синхронизации от отношения сигнал/шум на его входе приведена на рисунке 1. Для достижения выходного отношения сигнал/шум в 20 дБ, требует входного отношения сигнал/шум, равного ~ 23 дБ, 26 дБ и 32 дБ для формирующих нелинейных функций $f(x_n) = \sin(1,5\pi x_{n-1})$, $f(x_n) = \sin(2\pi x_{n-1})$, $f(x_n) = \sin(6\pi x_{n-1})$ соответственно.

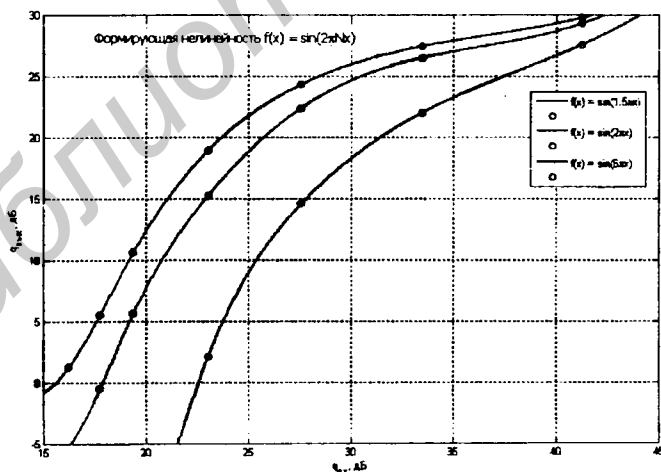


Рисунок 1 – Зависимость отношения С/Ш на выходе устройства обработки ФМн сигнала с хаотической модуляцией от отношения С/Ш на входе

Применение сложных сигналов с хаотической модуляцией по задержке [1-А, 1б-А] позволяет снизить требования к качеству радиоканала. В разделе 4.5 подробно рассмотрена задача выделения хаотического процесса с нелинейно-подмешанным сообщением. Полученные решения конкретизированы для шумоподобного сигнала (20). Для передачи объединенного хаос-процесса через радиоканал предлагается помимо информационной компоненты вводить ортогональный ей *пилот-радиосигнал*. Это позволяет обеспечить устойчивую синхронизацию по фазе несущего колебания и задержке ПСП, что, в свою очередь, приводит к возможности получения *синхронного отклика* на выходе схемы обработки в условиях действия сосредоточенных как по времени, так и по частоте, помех. Результаты моделирования схемы обобщенной синхронизации (рисунок 2) для различных формирующих нелинейностей приведены на рисунке 3.

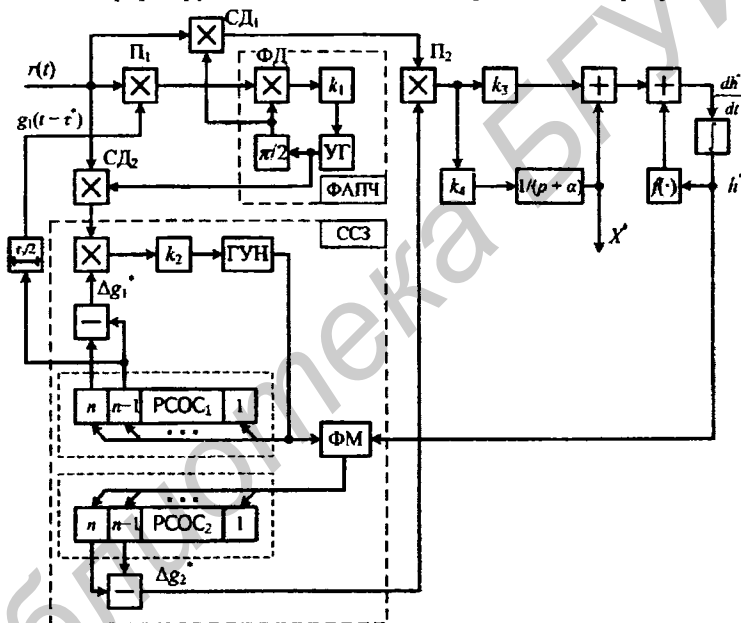


Рисунок 2 – Функциональная схема синхронизации и выделения информации для широкополосного сигнала

В качестве носителя хаос-сигнала была выбрана М-последовательность длиной 15 элементов. Формирующая нелинейная функция, как и в случае моделирования сигнала с ФМн, была взята в виде гармонической с разным количеством периодов на области её определения.

По сравнению с известными работами предложенные решения обеспечивают большую устойчивость как к флуктуационным, так и сосредоточенным помехам и их работоспособность менее зависима от точности аппаратной реализации устройств.

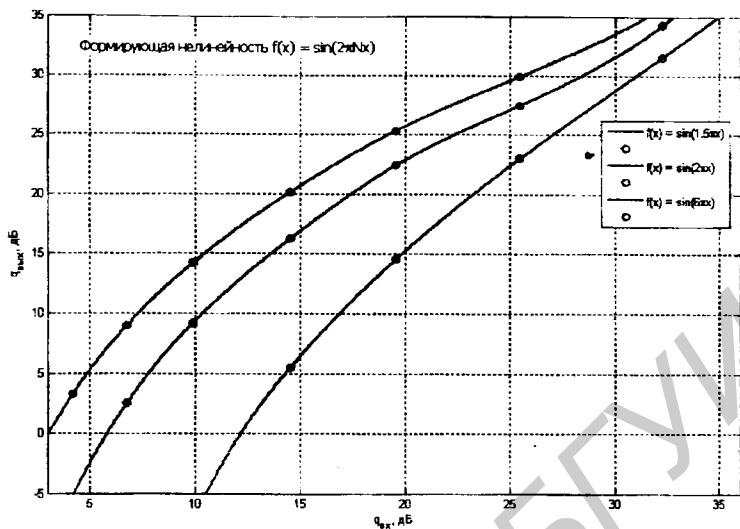


Рисунок 3 – Зависимость отношения С/Ш на выходе устройства обработки широкополосного сигнала с хаотической модуляцией по задержке от отношения С/Ш на его входе

В Приложении даны результаты численного моделирования корреляционных свойств хаос-процессов для отображения в виде гармонической функции, статистических характеристик модулированного хаоса. Даны оценка степени влияния аддитивного шума на разбегаемость фазовых траекторий хаос-процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертационной работы

1. Расширена область применения методов хаотической модуляции применительно к сложным радиосигналам, обеспечивающих повышение скрытности и помехоустойчивости радиоинформационных систем на основе динамического хаоса [7-А, 11-А] по сравнению с известными. Определены требования к нелинейным характеристикам формирователей хаотических процессов, при которых обеспечивается устойчивость и апериодичность колебаний.

2. Определена зависимость между характером нелинейности в генераторе хаоса и плотностью распределения мгновенных значений хаос-процессов, что обеспечивает генерацию хаос-процесса с заданными статистическими характеристиками.

3. Предложен новый метод информационной манипуляции хаос-процессов с последующей их обработкой на основе *накопления данных по определённым зонам отображения* [10-А].

4. Впервые проведена классификация радиосигналов с хаотической модуляцией и выделен новый класс сложных хаос-радиосигналов, которые формируются на основе *радиосигналов с расширенным спектром* (псевдослучайной угловой манипуляцией или псевдослучайной перестройкой рабочей частоты). При этом информационные и сопутствующие синхропараметры хаотических радиосигналов рассматриваются как *дискретно-непрерывные процессы* [7-А, 9-А].

5. На основе марковской теории нелинейной фильтрации впервые получены уравнения *оптимальной синхронизации и оценивания дискретных и непрерывных информационных параметров радиосигналов с хаотической модуляцией* на фоне белого шума и марковского негауссовского коррелированного шума [1-А, 7-А]. Отличительной особенностью уравнений является то, что фильтрации подвергается объединённый процесс, содержащий в себе *сообщение, хаотический процесс и синхропараметры*.

6. Конкретизированы уравнения нелинейной фильтрации сообщений для радиосигналов с хаотической фазовой манипуляцией [7-А], построены структурные схемы их обработки. Определена вероятность ошибки воспроизведения информационных символов. Впервые получены уравнения фильтрации и построены структурные схемы обработки радиосигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией и псевдослучайной перестройкой рабочей частоты [2-А, 6-А, 15-А]; радиосигналов с псевдослучайной фазовой манипуляцией и хаотической модуляцией по задержке [8-А, 9-А, 16-А]. Работоспособность схем обобщённой синхронизации подтверждена численным моделированием с учётом действия аддитивного шума.

Рекомендации по практическому использованию результатов диссертационной работы

1. В качестве формирующих функций желательно выбирать кусочно-линейные; при этом плотность распределения вероятностей хаос-сигнала будет равномерной на области допустимых значений.

2. При выборе формирующей нелинейной функции $x_k = F(x_{k-1})$ необходимо учитывать два противоречивых фактора. С одной стороны, формируемый хаотический процесс должен быть в статистическом и спектральном смысле похож на случайный, что определяется сложностью и квазипериодичностью функции F на области определения. С другой стороны, желателен выбор более гладкой функции для осуществления синхронного отклика. Выбор той или иной функции F должен осуществляться в зависимости от требований к конкретной радиоинформационной системе.

3. При передаче бинарной информации с точки зрения помехоустойчивости целесообразно использовать манипуляцию отображений с последующей зональной обработкой.

4. Все алгоритмы, предложенные в главе 4, реализуемы на сигнальных процессорах. Для обеспечения синхронного отклика и выделения информационных символов необходимо осуществлять нормировку обрабатываемых хаос-процессов на основе генерации и синхронизации пилотных сигналов.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах

1-А. Чердынцев, В. А. Квадратурная обработка сигналов в системах телекоммуникаций / В. А. Чердынцев, В. В. Дубровский // Известия Белорусской инженерной академии. – 2003. – № 2(16). – С. 56-61.

2-А. Дубровский, В. В. Система передачи сообщений на основе сигналов с псевдослучайной перестройкой частоты / В. В. Дубровский, В. А. Чердынцев, Ю. Э. Яцковский // Известия Белорусской инженерной академии. – 2004. – № 1(17). – С. 32-37.

3-А. Чердынцев В. А. Корреляционный различитель хаос-сигналов / В. А. Чердынцев, В. В. Дубровский // Известия Белорусской инженерной академии. – 2004. – № 1(17)/4. – С. 56-61.

4-А. Чердынцев, В. А. Квадратурная обработка сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией / В. А. Чердынцев, А. В. Варвашеня, В. В. Дубровский // Известия Белорусской инженерной академии. – 2004. – № 2(18). – С. 11-15.

5-А. Чердынцев, В. А. Квадратурная обработка сигналов в системах передачи дискретно-непрерывных сообщений / В. А. Чердынцев, В. В. Дубровский // Известия Белорусской инженерной академии. – 2005. – № 1(19). – С. 4-9.

6-А. Дубровский, В. В. Формирование и обработка многочастотных сигналов в системах цифровой радиосвязи / В. В. Дубровский, В. А. Чердынцев, Ю. Э. Яцковский // Инженерный вестник. – 2005. – № 1(20). – С. 19-21.

7-А. Дубровский, В. В. Обработка сигналов с хаотической фазовой модуляцией / В. В. Дубровский // Доклады БГУИР. – 2006. – № 2(14). – С. 80-84.

8-А. Далабаев, С. Формирование и обработка фазоманипулированных сигналов с псевдослучайной перестройкой частоты в помехозащищённых системах радиосвязи / С. Далабаев, В. А. Чердынцев, В. В. Дубровский // Доклады БГУИР. – 2006. – № 4(16). – С. 34-41.

9-А. Дубровский, В. В. Синхронизация сложных радиосигналов с хаотической модуляцией параметров / В. В. Дубровский, В. А. Чердынцев // Доклады БГУИР. – 2007. – №1(17). – С. 34-41.

Материалы научных конференций

10-А. Чердынцев, В. А. Различение хаос-процессов на основе их отображений / В. А. Чердынцев, В. В. Дубровский // Материалы IX международной научно-технической конференции «Современные средства связи». Известия Белорусской инженерной академии. – Минск, 2004. – № 2(18)/1. – С. 66-68.

11-А. Дубровский, В. В. Некогерентный алгоритм обработки шумоподобного сигнала в совмещённой системе передачи информации / В. В. Дубровский // Материалы III Белорусско-российской научно-технической конференции Минск – Нарочь. Технические средства защиты информации. 23-27 мая 2005 г. – Минск, 2005.

12-А. Главинский, Б. О. Алгоритмы защиты информации в системах видеонаблюдения. / Б. О. Главинский, Н. А. Деев, В. В. Дубровский, В. А. Чердынцев // Материалы III Белорусско-российской научно-технической конференции «Технические средства защиты информации» 23-27 мая 2005 г. – Минск, 2005. – № 5.

13-А. Дубровский, В. В. Некогерентная фильтровая схема слежения за задержкой шумоподобного сигнала / В. В. Дубровский // Молодёжь и современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2006»: материалы международной молодёжной научно-практической конференции студентов, аспирантов и учёных 17-21 апреля 2006 г. – Севастополь, 2006. – С. 31.

14-А. Дубровский, В. В. Цифровая квадратурная схема синхронизации системы передачи информации с шумоподобными сигналами / В. В. Дубровский // Молодёжь и современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2006»: материалы международной молодёжной научно-практической конференции студентов, аспирантов и учёных 17-21 апреля 2006 г. – Севастополь, 2006. – С. 32.

Патенты Республики Беларусь

15-А. Система передачи дискретной информации с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты при фазовой информационной манипуляции сигнала: патент № 1823 / В. А. Чердынцев, В. В. Дубровский, Ю. Э. Яцковский – Патентовладелец: УО «БГУИР» ВУ 1823 у. Заявка № u20040312, приоритетные сведения: (22) 2004.06.29.

16-А. Система передачи дискретно-непрерывных сообщений: патент № 1975 / В. А. Чердынцев, Н. С. Мисюкевич, Н. А. Деев, В. В. Дубровский, Ю. Э. Яцковский – Патентовладелец: УО «БГУИР» ВУ 1975 у. Заявка № u20040510, приоритетные сведения: (22) 2004.11.11.

Дуброўскі Васіль Віктаравіч

ГЕНЕРАЦЫЯ СІГНАЛАЎ І АПРАЦОЎКА ІНФАРМАЦЫІ НА АСНОВЕ ДЫНАМІчнага ХАОСА

Ключавыя словы: нелінейная дынаміка, дынамічны хаос, хаос-працэс, хаатычная мадуляцыя, нелінейная фільтрацыя, дыскрэтна-неперарыўны працэс, зваротная сувязь па рашэнню; квадратурная апрацоўка прыём сігналаў, памеха.

Аб'ект даследвання: радыёінфармацыйная сістэма ва ўмовах дзеяння адытыўных і мультыплікатывных памех.

Прадмет даследвання: алгарытмы сінтэзу карыснага сігнала, які фарміруецца нелінейнымі дынамічнымі сістэмамі, і алгарытмы яго аптымальнай фільтрацыі у радыёканале з памехамі.

Мэта работы: распрацоўка метадаў генерацыі сігналаў на аснове дынамічнага хаоса, прыгодных для перадачы паведамленняў па радыёканалу. Вывад ураўненняў фільтрацыі дыскрэтна-неперарыўных параметраў хаатычных радыёсігналаў. Канкрэтызацыя ураўненняў фільтрацыі для сігналаў з псеўдавыпадковай перастройкай радыёчастаты.

Метады даследвання: метады статыстычнай радыётэхнікі, маркаўскай тэорыі нелінейнай фільтрацыі, тэорыі сігналаў, нелінейнай дынамікі, статыстычнага мадэліравання.

Вынікі працы: ураўненні аптымальнай апрацоўкі і ацэньвання дыскрэтных і неперарыўных інфармацыйных параметраў радыёсігналаў з хаатычнай мадуляцыяй на фоне белага шума і маркаўскага негаусаўскага карэляванага шума; ураўненні нелінейнай фільтрацыі паведамленняў для радыёсігналаў з хаатычнай амплітудна-фазавай маніпуляцыяй, хаатычнай фазавай мадуляцыяй і радыёсігналаў амплітудна-фазавай маніпуляцыяй і псеўдавыпадковай перастройкай радыёчастаты; структурныя схемы іх апрацоўкі; мадэліраванне ўраўненняў з улікам дзеяння адытыўнага шума; метады адаптыўнай кампенсацыі памехаў; метады інфармацыйнай маніпуляцыі хаос-працэсаў з далейшай апрацоўкай на аснове накаплення дадзеных па вызначаным зонам адображання.

Вынікі, атрыманыя у рабоце, могуць быць выкарыстаны пры стварэнні устойлівых да памехаў і скрытных радыёінфармацыйных сістэм новага тыпу.

Дубровский Василий Викторович

ГЕНЕРАЦИЯ СИГНАЛОВ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ХАОСА

Ключевые слова: нелинейная динамика, динамический хаос, хаос-процесс, хаотическая модуляция, нелинейная фильтрация, дискретно-непрерывный процесс, обратная связь по решению, квадратурная обработка, приём сигналов, помеха.

Объект исследования: радиоинформационная система в условиях действия мультипликативных и аддитивных помех.

Предмет исследования: алгоритмы синтеза полезного сигнала, формируемого нелинейными динамическими системами и алгоритмы его оптимальной фильтрации в радиоканалах с помехами.

Цель работы: разработка методов генерации сигналов на основе динамического хаоса, пригодных для передачи сообщений по радиоканалу. Вывод уравнений фильтрации дискретно-непрерывных параметров хаотических радиосигналов. Конкретизация уравнений фильтрации для сигналов с фазовой, амплитудно-фазовой модуляцией и сигналов с псевдослучайной перестройкой радиочастоты.

Методы исследования: методы статистической радиотехники, марковской теории нелинейной фильтрации, теории сигналов, нелинейной динамики, статистического моделирования.

Полученные результаты: уравнения оптимальной обработки и оценивания дискретных и непрерывных информационных параметров радиосигналов с хаотической модуляцией на фоне белого шума и марковского негауссовского коррелированного шума; уравнения нелинейной фильтрации сообщений для радиосигналов с хаотической амплитудно-фазовой манипуляцией, хаотической фазовой модуляцией и радиосигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией и псевдослучайной перестройкой рабочей частоты; структурные схемы их обработки; моделирование уравнений с учётом действия аддитивного шума; вероятность ошибки воспроизведения информационных символов; метод адаптивной нелинейной компенсации помех; метод информационной манипуляции хаос-процессов с последующей их обработкой на основе накопления данных по определённым зонам отображения.

Результаты, полученные в работе, могут быть использованы при создании помехозащищённых и скрытых радиоинформационных систем нового типа.

SUMMARY

Dubrouski Vasil Viktaravich

SIGNAL GENERATION AND INFORMATION PROCESSING ON BASIS OF DYNAMIC CHAOS

Key words: nonlinear dynamics, dynamic chaos, chaotic process, chaotic modulation, nonlinear filtration, discrete-continuous process, backward decision link, quadrature processing, signal processing, disturbance.

Object of research: communicatory system under multiplicative and additive disturbances.

Subject of research: algorithms of efficient signal synthesis, generated by nonlinear dynamic systems and methods of optimal filtration in noisy channels.

Primary purpose of research: to develop signal generation methods based on dynamic chaos, which are suitable for information transmitting over radio channel. Equation development for discrete-continuous parameters filtration of chaotic radio signals. Concrete definition of the equation for phase modulated signals and amplitude-phase modulated signals with frequency hopping.

Research methods: statistic radio engineering method, Markov theory of nonlinear filtration, signal theory, theory of nonlinear dynamics, theory of statistical simulation.

The following results are obtained: optimal processing and estimation equations discrete and continuous informative parameters of chaotic modulated radio signals under white Gaussian noise and no Gaussian correlated Markov noise; nonlinear filtration equations for amplitude-phase modulated chaotic signals and amplitude-phase modulated chaotic signals with frequency hopping; structural schemes of processing; equation simulation subject to additive noise; estimation error probability; adaptive nonlinear noise compensation; method of information manipulation of the chaotic signals and their processing based on data gathering through maps area.

The obtained results may be exploited in the time of creation antijamming and secret communication systems of new type.

Научное издание

Дубровский Василий Викторович

**ГЕНЕРАЦИЯ СИГНАЛОВ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ
НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ХАОСА**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Специальность 01.04.03 – «Радиофизика»

Подписано в печать	12.11.2007.	Формат 60x84 ¹ / ₁₆ .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.		Усл. печ. л. 1,4.
Уч.-изд. л. 1,3.	Тираж 60 экз.		Заказ 663.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131666 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровки, 6.