

На правах рукописи

Андреев Юрий Вениаминович



НЕЛИНЕЙНАЯ И ХАОТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА
В ЗАДАЧАХ ОБРАБОТКИ И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

01.04.03 – Радиофизика

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН).

Научный консультант: **Дмитриев Александр Сергеевич**,
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Астахов Владимир Владимирович
доктор физико-математических наук, профессор,
зав.кафедрой «Радиоэлектроника и телекоммуникации»
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический
университет имени Гагарина Ю.А.»

Кашенко Сергей Александрович
доктор физико-математических наук, профессор,
первый проректор ФГБОУ ВО «Ярославский
государственный университет имени П.Г. Демидова»

Матросов Валерий Владимирович
доктор физико-математических наук, профессор,
декан радиофизического факультета ФГАОУ ВО
«Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

Защита состоится 15 февраля 2019 года, в 10-00, на заседании диссертационного совета Д 002.231.02 на базе ФГБУН Института радиотехники и электроники Российской академии наук (ИРЭ им В.А. Котельникова РАН) по адресу: 125009, г. Москва, ул. Моховая, д.11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и на сайте: <http://cplire.ru/rus/dissertations/Andreev/index.html>.

Автореферат разослан “___” _____ 201_ г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физ-мат. наук



Копылов
Юрий Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

С момента открытия явления динамического хаоса (сложного шумоподобного поведения относительно простых детерминированных нелинейных динамических систем) накоплен большой багаж знаний о хаосе, механизмах его возникновения, проявлении хаотической динамики в различных естественных и искусственных системах. В 1990-х гг. возник вопрос о практическом использовании хаотической динамики для решения актуальных научно-технических задач, и одним из интенсивно развивающихся направлений приложения хаоса стали информационные технологии.

Перспективность информационных приложений хаоса связывалась с таким ключевым свойством хаотических колебаний, как странный аттрактор в фазовом пространстве динамической системы, который можно использовать в новых способах хранения и обработки информации¹.

Побудительным мотивом исследований в области приложений хаоса к задачам обработки информации стало обнаружение хаотической динамики в «живых» системах обработки информации. В частности, существование детерминированных хаотических режимов в мозге было показано для ряда состояний активности человека на основе анализа электроэнцефалограмм (ЭЭГ)². Применение аппарата нелинейной динамики к сигналам ЭЭГ, оценка динамических показателей сигналов (корреляционная размерность, старший показатель Ляпунова и др.) позволило уверенно разделять различные состояния активности мозга³. В свою очередь, для описания хаотических систем эффективным оказался аппарат теории информации, например, энтропия Колмогорова может служить мерой скорости производства информации в хаотиче-

¹ Николис Дж. Динамика иерархических систем. – М.: Мир, 1989.

Nicolis J.S. Chaos and Information processing. A Heuristic Outline. – World Scientific, 1990.

Фримэн У.Дж. // В мире науки. 1991, №4, с. 26.

Grebogi C., Ott E., Yorke J. // Phys. Rev. Lett., 1983, v. 50, p. 935.

² Осовец С.М., Гинзбург Д.А. и др. // УФН, 1983, т. 141, № 1, с. 103.

³ Klonowski W., Ciszewski J., et al. // Proc. NOLTA-1999, 1999.

Silva C., Pimentel I.R., et al. // Brain Topogr. 1999. v. 11, no. 3, p. 201.

Dafilis M.P., Liley D.T., Cadusch P.J. // Chaos. 2001, vol. 11, no. 3, pp. 474-478.

ских системах⁴. Также показано, что хаотический аттрактор можно описать уникальным набором («скелетом») неустойчивых периодических траекторий (циклов) в его окрестности, поэтому хаотический аттрактор можно рассматривать как «резервуар» периодических движений, как счетное множество динамических объектов, которое можно использовать для кодирования информации⁵.

К моменту постановки работы в начале 1990-х гг. стало понятно, что богатая динамика хаотических систем может найти эффективное применение в приложениях обработки информации. К этому времени появились математические модели, в которых нелинейная динамика использовалась для решения задач обработки информации, однако информация ассоциировалась в них исключительно со *статическими* объектами (положениями равновесия). В качестве примера можно привести модель нейронной сети Хопфилда, в которой можно было записать несколько образов⁶. После «обучения», при предъявлении такой системе некоторого образа она сходилась к одному из равновесных состояний. Другими словами, динамика подобной системы представляла собой переходный процесс сходимости к одной из притягивающих точек в фазовом пространстве.

Для создания новых подходов к обработке информации актуальной представлялась идея использования структурно более простых (по сравнению с нейронными сетями), но способных демонстрировать богатое поведение нелинейных динамических систем с хаосом, в которых для хранения информации использовались бы *динамические* многообразия, такие, как циклы (периодические орбиты) и локальные хаотические аттракторы. При этом было необходимо проработать ряд существенных вопросов, связанных с вводом/извлечением информации, универсальностью, емкостью, реализацией различных функций

⁴ Шарковский А.Н., Майстренко Ю.Л., Романенко Е.Ю. Разностные уравнения и их приложения. – Киев: Наук. думка, 1986;

Шильников Л.П. // ДАН СССР, 1965, т. 160, № 3, с. 558;

Боуэн Р. Методы символической динамики. – М.: Мир, 1979;

Колмогоров А.Н. // Проблемы передачи информации, 1965, т. 1, с. 3.

⁵ Hammel S.M., Yorke J.A., and Grebogi C. // Bull. Amer. Math. Soc. (N.S.). 1988, v. 19, no. 2, p. 465.

So P., Francis J.T., et al. // Biophys J. 1998, v. 74, no. 6, p. 2776.

⁶ Hopfield J.J. // Proc. Nat. Acad. Sciences USA, 1982. v. 79. no. 8, p. 2554.

обработки информации, возможностями работы с различными типами информации (текстовой, графической, звуковой) и т.д. Кроме того, важной представлялась задача реализации, на основе разработанных подходов, экспериментальных вариантов информационно-поисковых систем с новыми возможностями поиска информации. Разработке этих вопросов посвящена первая половина диссертационной работы.

Другие ключевые свойства динамического хаоса – быстро спадающая автокорреляционная функция и естественно широкий спектр – открывают новые возможности в задачах передачи информации. К настоящему времени предложено немало схем связи с использованием хаотических сигналов, однако в плане эффективности они пока уступают традиционным решениям. Поэтому актуальным остается вопрос поиска тех свойств хаотических систем и сигналов, а также тех задач передачи информации, в которых хаос способен обеспечить уникальные характеристики.

Для систем передачи информации с хаотической несущей актуальным является вопрос доступа к каналу связи для нескольких систем, одновременно работающих в общей полосе частот. Из такой постановки вытекает задача разделения по форме сигналов хаотических несущих. Представляется, что эффективными могут быть решения, опирающиеся на использование ключевых свойств разделяемых сигналов и порождающих их хаотических динамических систем. Так, для разделения суммы хаотических сигналов предлагались решения, основанные на явлении хаотической синхронизации⁷, однако ввиду того, что данное явление крайне чувствительно к искажениям и шуму в канале связи, оказалось, что, несмотря на теоретическую работоспособность, для реального воплощения эти решения требуют практически идеальных каналов связи в плане отношения сигнал/шум.

В диссертационной работе предложены другие принципы разделения суммы зашумленных хаотических колебаний на составляющие. Как известно,

⁷ Tsimring L.S., Sushchik M.M. // Phys. Lett. A, 1996. v. 213, no. 3, p. 155.

одним из ключевых свойств хаотической динамики является экспоненциально быстрое разбегание близких траекторий в фазовом пространстве. Из этого следует, что при итерировании хаотической системы в обратном времени близкие траектории экспоненциально быстро сходятся, а значит, так же быстро уменьшается и ошибка восстановления исходной траектории. Поэтому существенный интерес представляет исследование этого подхода, в котором непосредственно используется динамика (знание уравнений) нелинейных систем, порождающих хаотические колебания.

С начала 2000-х гг. развитие систем связи с хаотическими сигналами получило новый толчок в связи с разрешением использования сверхширокополосных (СШП) сигналов и систем в задачах массовой радиосвязи. Ранее, в Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН была предложена концепция так называемых прямохаотических систем передачи информации, в которых информация передавалась потоком хаотических радиоимпульсов, формируемых непосредственно в полосе частот канала связи⁸. В силу естественной широкополосности, СШП хаотические колебания оказались хорошим вариантом сигналов для СШП связи. СШП прямохаотические системы связи получили признание отечественного и международного научно-технического сообщества и вошли в международные стандарты СШП связи IEEE 802.15.4a и 802.15.6.

С введением в практику радиосвязи нового, сверхширокополосного типа беспроводного носителя информации, возник вопрос о характеристиках распространения таких сигналов. Несмотря на то, что подобная тематика является традиционной для радиофизики, использование СШП сигналов потребовало новых исследований характеристик распространения. Эти исследования проводились путем *гармонических* измерений в различных многолучевых средах⁹.

⁸ Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Максимов Н.А. и др. // Радиотехника, 2000, № 3, с. 9.

Дмитриев А.С., Панас А.И., Старков С.О. и др. // РЭ, 2001, т. 46, №2, с. 224.

Dmitriev A.S., Kyarginsky B.Ye., Panas A.I. et al. // Int. J. Bifurcation and Chaos, 2003, v. 13, no. 6, p. 1495.

⁹ Cassioli D., Win M.Z., Molisch A.F. // IEEE J. Selected Areas in Communications, 2002, v. 20, p. 1247.

Molisch A.F. IEEE 802.15.4a Channel Modeling Sub-committee Report Final. 2005.

Однако сверхширокополосные хаотические колебания имеют существенные особенности, и поэтому характеристики их распространения требуют специального изучения. В частности, существенное влияние на характеристики распространения оказывает быстропадающая автокорреляционная функция хаотических сигналов, благодаря которой сигналы, приходящие в приемник с разных направлений, оказываются некогерентными (некоррелированными) и складываются по мощности. Это заметно отличает СШП хаотические сигналы, как от традиционных узкополосных, так и от других типов СШП сигналов (сверхкороткие импульсы, OFDM-радиоимпульсы, короткие радиоимпульсы и др.¹⁰). Кроме того, база СШП хаотических радиоимпульсов (произведение длительности импульса на полосу частот) существенно больше единицы и может меняться в широких пределах. Поэтому исследование характеристик распространения СШП хаотических радиоимпульсов в многолучевой среде является актуальным и практически важным.

В силу ограничений стандартов СШП связи на мощность передачи одного СШП устройства, дальность действия систем беспроводной СШП радиосвязи составляет десятки метров. Увеличение этого расстояния способно значительно расширить круг возможных приложений СШП систем и сетей связи. В этой связи, значительный научный и практический интерес представляет исследование возможности увеличения дальности передачи за счет согласованного коллективного излучения ансамбля СШП прямохаотических передатчиков, а также исследование пространственной структуры излучения такого ансамбля.

Поставленные вопросы определяют цели и задачи диссертации.

Цели диссертационной работы:

- разработка новых принципов обработки информации на основе нелинейной и хаотической динамики;
- исследование возможности разделения суммы хаотических сигналов с использованием хаотической динамики источников сигналов;

¹⁰ Андреев Ю.В., Дмитриев А.С., Кузьмин Л.В., Мохсени Т.И. // Радиотехника, 2008, №8, с. 83.

- исследование особенностей распространения сверхширокополосных хаотических сигналов в многолучевой среде;
- исследование ансамбля сверхширокополосных прямохаотических излучателей в режиме коллективной передачи.

Основные задачи, решаемые в работе:

- разработка и исследование принципов и алгоритмов записи и хранения информации на динамических аттракторах динамических систем с дискретным временем;
- реализация функций обработки информации на основе динамических аттракторов динамических систем;
- решение задачи разделения суммы хаотических сигналов на компоненты как задачи одновременной передачи информации по единому каналу, с использованием уравнений, описывающих динамику систем, порождающих эти сигналы;
- исследование характеристик распространения сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов в многолучевой среде;
- исследование энергетических характеристик коллективного режима излучения ансамбля сверхширокополосных прямохаотических передатчиков.

Научная новизна состоит в том, что в работе впервые:

- предложен и исследован метод записи конечных скалярных и векторных информационных последовательностей на динамических аттракторах одномерных и многомерных отображений, основанный на синтезе кусочно-линейных отображений заданной размерности, в фазовом пространстве которых заданному набору информационных последовательностей соответствует набор периодических траекторий, при этом для каждой информационной последовательности обеспечивается взаимно-однозначное соответствие между фрагментами последовательности и точками соответствующей траектории;
- реализованы различные функции обработки информации на основе нелинейной динамики отображений с информацией, записанной на динамических аттракторах;

- предложен и исследован метод разделения зашумленной суммы хаотических сигналов на компоненты с использованием уравнений порождающих эти сигналы одномерных отображений;
- исследованы особенности распространения сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов в многолучевой среде, связанные с быстроспадающей автокорреляционной функцией хаотических сигналов; показано, что сложение лучей происходит некогерентным образом, что приводит, в частности, к отсутствию замираний;
- обнаружено, исследовано и экспериментально верифицировано явление многолучевого усиления хаотических радиоимпульсов при распространении в многолучевой среде, заключающееся в том, что мощность сигнала на входе приемника в многолучевой среде оказывается выше, чем в свободном пространстве; изучены механизмы и условия наблюдения данного явления; получены оценки коэффициента усиления для ряда типичных многолучевых сред;
- исследованы энергетические характеристики излучения ансамбля некогерентных сверхширокополосных хаотических излучателей; определена структура поля излучения, получены оценки энергетических характеристик направленности излучения.

Достоверность научных выводов работы определяется использованием обоснованных методов проведения теоретических и экспериментальных исследований, согласованностью результатов математического и физического моделирования, воспроизводимостью экспериментальных данных, полученных в различных сериях измерений, а также непротиворечивостью известным из литературы данным (в тех случаях, когда такое сопоставление возможно).

На защиту выносятся следующие положения:

1. Принципы и методы записи информации на динамических аттракторах нелинейных динамических систем, включая принципы и алгоритмы синтеза кусочно-линейных отображений заданной размерности, в фазовом пространстве которых для заданного набора конечных информационных последова-

тельностью формируется набор периодических траекторий, таких, что для каждой информационной последовательности обеспечивается взаимно-однозначное соответствие между фрагментами последовательности и точками соответствующей траектории.

2. Совокупность принципов и алгоритмов обработки информации с использованием динамических аттракторов отображений, позволяющие реализовать, в том числе, функции ассоциативной памяти, распознавания, хаотического сканирования памяти, долговременной и кратковременной памяти, фильтра новизны.

3. Метод разделения суммы хаотических сигналов в канале с белым шумом на компоненты на основе совместного решения уравнений хаотических источников в обратном времени, непосредственно использующий динамику порождающих эти сигналы нелинейных хаотических систем и позволяющий восстанавливать сигналы с заданной точностью.

4. Явление многолучевого усиления хаотических радиоимпульсов при беспроводном распространении в многолучевой среде, приводящее к увеличению отношения сигнал/шум на входе приемника по отношению к свободному пространству.

5. Многоэлементный ансамбль сверхширокополосных прямохаотических передатчиков, позволяющий реализовать некогерентное сложение мощности излучения его элементов в пространстве и соответственно увеличить дальность связи.

6. Комплекс результатов исследования энергетических характеристик поля излучения некогерентного ансамбля СШП хаотических излучателей, в том числе, аналитически полученные и подтвержденные численным моделированием характеристики мощности, энергетической диаграммы направленности излучения, границы дальней зоны.

Научно-практическое значение работы состоит в том, что впервые решена задача записи информационных последовательностей на периодических

траекториях и хаотических аттракторах одномерных и многомерных отображений. На основе разработанного метода записи реализованы различные функции обработки информации, включая функции ассоциативной памяти, фильтра новизны, распознавания, классификации, автоматической рубрикации и др. Созданы экспериментальные информационно-поисковые системы, предоставляющие, помимо традиционных видов поиска возможности поиска «по содержанию».

Разработан метод разделения суммы хаотических сигналов на компоненты, открывающий новые подходы к одновременной передаче информационных сигналов на нескольких хаотических несущих в общем канале связи.

Проведено комплексное исследование особенностей распространения сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов в многолучевой среде. Обнаружено практическое отсутствие замираний этих сигналов при многолучевом распространении. Обнаружено и исследовано явление многолучевого усиления, проявляющееся в усилении мощности сигнала на входе приемника в многолучевой среде по отношению к свободному пространству.

Предложено решение проблемы увеличения дальности беспроводной передачи информации с помощью сверхширокополосных прямохаотических систем связи в условиях ограничений на спектральную плотность мощности излучения одного устройства. Разработан и апробирован метод увеличения дальности сверхширокополосной прямохаотической связи за счет использования коллективного режима некогерентной передачи информации многоэлементным ансамблем прямохаотических передатчиков. Определена пространственная структура поля мощности излучения ансамбля. Указанные результаты позволят, в конечном итоге, решить проблему создания сверхширокополосной беспроводной инфраструктуры локального и более широкого уровня.

Апробация работы, публикации, внедрение и использование: материалы диссертационной работы были представлены на: III, V, VII, VIII (2009, 2011, 2013, 2014 гг.) Всероссийской научно-технической конференции «Радиолока-

ция и радиосвязь», Москва; 20-й, 23-й, 26-й межд. Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо 2010, 2013, 2016)», Севастополь; на IV и V Всероссийской микроволновой конференции, Москва, Россия (2016, 2017); на Всероссийской научной конференции «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике», Муром, в 2003, 2006 гг.; V Всероссийской научной конференции «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред», Муром, Россия, 2012 г.; Всероссийской научной конференции III, V, VII и VIII «Всероссийские Армандовские чтения», Муром, Россия (2013, 2015, 2017, 2018); научной школе «Нелинейные волны» г. Нижний Новгород в 2002, 2004, 2006, 2010, 2015, 2018 гг.; 9-ой межд. конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» (ARMIMP-2017), Суздаль, Россия; межд. конференциях «Nonlinear Dynamics of Electronic Systems (NDES)» в 1995 г. (Dublin, Ireland), в 1996 г. (Seville, Spain), в 1997 г. (Москва), в 1998 г. (Budapest, Hungary), в 1999 г. (Ronne, Denmark), в 2001 г. (Delft, Netherlands), в 2015 г. (Como, Italy); межд. научно-технической конференции «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов» СИНХРОИНФО-2018 (Минск, Беларусь); межд. науч. конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» (ИРЭМВ-2013), Таганрог-Дивноморское, Россия, 2013 г.; межд. форуме «Progress In Electromagnetics Research Symposium» в Москве (PIERS-2009) и С.-Петербурге (PIERS-2017); 15-й межд. IEEE конференции «Electronics, Circuits, and Systems» (ICECS-2008), 2008 г., Malta; 1-й межд. конференции «Сверхширокополосные сигналы и сверхкороткие импульсы в радиолокации, связи и акустике», Суздаль, Россия, 2005 г.; 5-й и 8-й межд. школе «International school on chaotic oscillations and pattern formation», Саратов, Россия, 1998 и 2007 гг.; межд. конференции «Dynamics Days Europe 2006», Crete, Greece; 2-й межд. конференции «IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications» (ICCSC-2004), Москва, Россия, 2004 г.; межд. симпозиуме «Int. Symp. Signals, Circuits and Systems» (SCS-2003), Iasi, Romania, 2003 г.; 2-й и 6-й межд. конференциях

“Cellular Neural Networks and their Applications» в 1992 г. (Munich, Germany) и в 1996 г. (Seville, Spain); межд. семинаре «Nonlinear Circuits and Systems», Москва, Россия, 1992 г.; европ. конференции «Circuit Theory and Design» EC-CTD'97, Budapest, Hungary, 1997 г.; межд. IEEE симпозиуме «Circuits and Systems» (ISCAS-2000), Geneva, Switzerland, 2000 г.; межд. конференции «Control of Oscillations and Chaos» (COC-2000), С.-Петербург, Россия, 2000 г.; межд. конференции «Progress in Nonlinear Science/Nonlinear Oscillations, Control and Information», Н. Новгород, Россия, 2001 г.; межд. конференции «Applied Non-Linear Dynamics», Thessaloniki, Greece, 2001 г.

Всего по теме диссертации опубликовано 76 научных работ, из них 27 статей, 14 работ в сборниках трудов отечественных конференций, 22 работы в сборниках трудов международных конференций, 3 препринта, 9 патентов, 1 статья в коллективной монографии. Основные результаты диссертации изложены в 28 работах, из которых: 24 статьи входят в Перечень изданий, определенных ВАК Минобрнауки (из них 15 входят в международную реферативную базу данных SCOPUS), 1 статья – в коллективной монографии, 3 статьи – в реферируемых журналах, не входящих в перечень ВАК. Объем опубликованных по теме диссертации научных работ в журналах, рекомендованных ВАК – 294 мп. страницы, общий объем опубликованных работ – 600 мп. страниц.

Личный вклад автора заключается в выборе направления исследований, формулировке и постановке задач, определении методов и подходов к их решению, проведении теоретических исследований и расчётов, проведении моделирования, постановке и проведении экспериментов, анализе и интерпретации полученных результатов. Все вошедшие в диссертацию результаты получены либо автором лично, либо при его непосредственном участии.

Структура и объем работы: диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, приложения и списка цитированной литературы. Содержит 326 страниц текста, 134 рисунка, 6 таблиц. Список цитированной литературы содержит 413 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель и задачи исследований, изложены положения, выносимые на защиту, и краткое содержание работы.

Первая глава представляет собой обзор научных результатов, посвященных исследованию роли хаоса и нелинейной динамики в естественных и искусственных системах обработки информации. Наличие хаотической динамики в работе мозга в настоящее время является общепринятым фактом. В частности, показано, что мозговую активность, фиксируемую в виде электроэнцефалограмм, электрических сигналов отведений или томографических данных, можно рассматривать как непрерывное чередование различных динамических мод, перемежающихся переходным хаосом. При этом хаос рассматривается как базовое движение, из которого мозг может легко переключаться в те или иные динамические режимы, соответствующие предъявляемым стимулам. Исследования динамики головного мозга показали, что использование динамических показателей и характеристик (корреляционная размерность, показатели Ляпунова, энтропия) может с успехом применяться для выявления различных функциональных состояний головного мозга.

Анализ современных моделей ментальной активности свидетельствует о переходе от статических представлений к динамическим. В частности, согласно современным подходам информационным образам соответствуют динамические (низкоразмерные) моды, кроме того подчеркивается важная роль переходной динамики.

Исследование модельных динамических систем с детерминированным хаосом свидетельствует также о тесной связи между теорией динамических систем и информационными процессами. Ряд основополагающих результатов динамической теории формулируется применительно к объектам, так или иначе связанным с информацией (например, производство информации хаотиче-

скими системами). Анализ представлений о механизмах обработки информации с использованием сложной динамики, а также о принципах записи и хранения информации в динамических системах позволил сделать вывод об общности закономерностей информационных процессов в нелинейных системах со сложной динамикой и о возможности реализации рассмотренных механизмов обработки информации в динамических системах другой природы.

Также проанализированы результаты работ, посвященных исследованиям возможности создания искусственных интеллектуальных систем. Утверждается, что на основе вычислителя (машины Тьюринга) невозможно построить интеллектуальную машину, и что построение интеллектуальных систем должно базироваться на принципах работы человеческого мозга, который не является вычислительным устройством, а скорее системой памяти со сложной системой выборки¹¹. В этих исследованиях построена иерархическая модель мозга, в которой информационные потоки от первичных сенсоров движутся вверх по иерархии и взаимодействуют с информационными потоками предсказаний, движущимися вниз. Информация в этой модели представлена динамическими паттернами, а сложность обработки перенесена в обширную систему разнонаправленных связей.

Таким образом, анализ экспериментальных данных и современных теоретических представлений показал, что многие явления и процессы в системах с динамическим хаосом используются живыми организмами и могут применяться в искусственных системах для обеспечения их функционирования в изменяющейся окружающей среде, что означает эффективность систем с хаосом при обработке информации в широком смысле. Это дает основания полагать, что идеи нелинейной динамики открывают возможность построения простых и эффективных искусственных динамических систем, реализующих различные процессы обработки информации с использованием хаоса.

¹¹ Hawkins, J., Blakeslee, S. On Intelligence (1st ed.). Times Books. 2004

Во второй главе созданы основы теории записи информации на динамических аттракторах нелинейных динамических систем с дискретным временем, т.е. отображениях вида $x_{n+1} = f(x_n)$.

Под записью информации понимается синтез динамической системы (отображения), в фазовом пространстве которой сформированы предельные циклы, соответствующие записанным информационным блокам (число циклов в фазовом пространстве равно числу информационных блоков; каждому блоку соответствует свой цикл); при этом точки цикла взаимно-однозначно связаны с фрагментами соответствующего записанного информационного блока. Устойчивостью циклов можно управлять с помощью параметра (рис. 1).

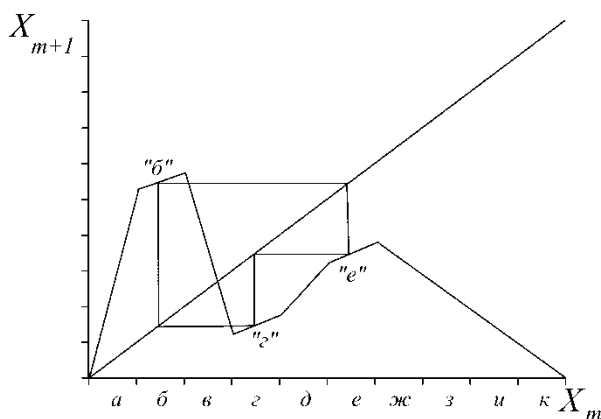


Рис. 1. Отображение с одним циклом, несущим слово «бег»

Выполнены оценки информационной емкости системы памяти на основе циклов отображения и проанализированы ограничения метода записи. Показано, что информационная емкость C при размере алфавита N на уровне записи q пропорциональна N^q . Так как размер информативного интервала составляет $\Delta x = N^{-q}$, с увеличением уровня записи возрастают требования к точности вычислений, что ставит технические пределы ее увеличению. В качестве вариантов решения предложено использование многомерных отображений, а также специального кодирования записываемых информационных блоков.

Разработана регулярная процедура синтеза кусочно-линейных многомерных отображений для записи информации на предельных циклах, с возможностью регулирования устойчивости циклов. Предложено обобщение метода на

запись многомерных сигналов (векторных последовательностей) в многомерных отображениях, позволяющее синтезировать многомерные кусочно-линейные динамические системы с требуемыми предельными циклами с регулируемой устойчивостью.

Проведен анализ возможных способов извлечения записанной информации из динамических систем. Предложены три подхода к извлечению информации: по начальным условиям, путем управления устойчивостью информационных циклов и с помощью синхронизации. Определены условия, при которых предпочтительно применять эти подходы. Так, для извлечения информации путем формирования начальных условий информационные многообразия динамической системы должны быть устойчивы. Во втором способе, наоборот, все информационные предельные циклы динамической системы изначально должны быть неустойчивы, а по предъявленному запросу функция отображения модифицируется таким образом, что становится устойчив только соответствующий цикл, что приводит к сходимости к нему фазовой траектории после переходного процесса. При извлечении информации с помощью синхронизации информационные циклы могут быть как устойчивыми, так и неустойчивыми, но период внешнего синхронизирующего сигнала должен совпадать с периодом требуемого информационного цикла.

Разработан метод специального кодирования записываемой информации, позволяющий гарантированно производить запись любых информационных блоков. Данный метод основан на расширении алфавита и замене повторяющихся фрагментов новыми символами. «Побочным» эффектом разработанного метода является устранение избыточности (сжатие информации) в записываемых информационных блоках и уменьшение их длины. Характеристики метода кодирования в плане сжатия информации (до 5-7 раз для текстов) близки к показателям известных методов сжатия данных без потерь. Разработаны алгоритмы, позволяющие осуществлять поиск информации по запросу непосредственно в закодированных данных, без распаковки. Результатом такого поиска

являются начальные условия на предельном цикле отображения; соответственно, восстановление записанной информации осуществляется при последовательном расчете траектории (итерировании отображения) и декодировании получаемой символьной последовательности с помощью алфавита замен.

Предложено обобщение исходного метода записи информации на предельных циклах отображений, позволяющее осуществлять последовательную запись (дозапись) информации. Метод позволяет существенно ускорить процедуру записи информационных блоков, особенно при больших объемах записываемой информации. Так, если для исходного метода время записи пропорционально $T \sim M^2$, где M – объем записываемой информации, то для большого количества мелких информационных блоков время последовательной записи приближается к $T \sim M$. Определенной платой за это увеличение скорости является некоторое возможное ухудшение полноты поиска информации, а именно, могут быть не найдены вхождения запроса в ранее записанных информационных блоках. Предложено решение этой проблемы качества поиска за счет незначительного усложнения процедуры кодирования запроса.

Исследована динамика одномерных кусочно-линейных отображений с записанной информацией в зависимости от параметра s (наклона информативных участков функции отображения), регулирующего устойчивость информационных циклов. Мультипликатор цикла $M = s^n$, где n – длина цикла, поэтому циклы устойчивы при $|s| < 1$. Показано, что при увеличении параметра при $s = 1$ происходит бифуркация потери устойчивости предельных циклов отображения, которая сопровождается рождением устойчивых хаотических интервальных циклов в окрестности точечных информационных циклов (рис. 2). Интервальные циклы рождаются на краях информативных участков и при дальнейшем увеличении параметра сливаются, образуя интервальный цикл, охватывающий весь информативный интервал. При увеличении параметра s интервальные циклы теряют устойчивость и возникает хаотический режим, охваты-

вающий все фазовое пространство. Выявленные режимы используются в задачах обработки информации в следующей главе.

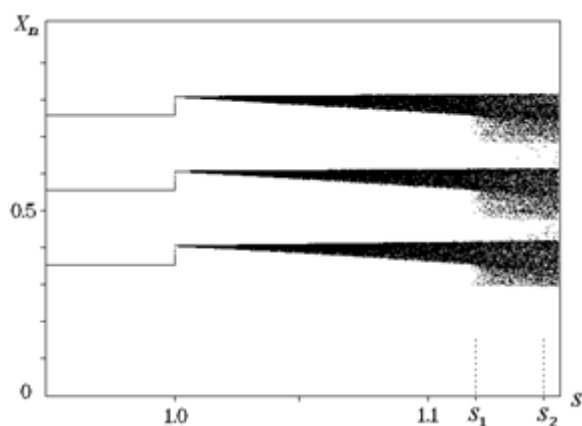


Рис. 2. Бифуркационная диаграмма отображения с одним циклом

Таким образом, во второй главе созданы основы теории записи информации на циклах отображений заданной размерности и реализованы базовые функции (запись, хранение, извлечение) обработки информации с помощью нелинейной динамики.

В третьей главе предложены и исследованы приложения теории записи информации на динамических аттракторах одномерных и многомерных отображений к задачам обработки информации.

Исследование механизма потери устойчивости информационных циклов отображений с записанной информацией показало, что в момент потери устойчивости цикла точек в окрестности информационного цикла рождается хаотический цикл интервалов, символическое описание которого совпадает с записанным информационным блоком, а значит эти хаотические аттракторы также можно использовать в качестве динамического носителя информации.

По мере увеличения параметра, управляющего устойчивостью циклов, циклы интервалов также теряют устойчивость, и в системе реализуется глобальный хаос. Однако фазовая траектория при этом много времени проводит в окрестности информационных циклов, что позволяет реализовать новый способ обработки информации – хаотическое сканирование памяти, основанный на явлении перемежаемости в хаотической системе.

Запись информации на неустойчивых предельных циклах и формирование глобального хаотического режима позволяет решать задачи распознавания образов, т.е. получать доступ к информации на основе неполной или искаженной информации. Предложена адаптивная модель распознавания, которая может также служить моделью «кратковременной» и «долговременной» памяти, характерной для живых систем.

Системы с информацией, записанной как на устойчивых, так и на неустойчивых циклах, могут работать как фильтр новизны, т.е. при предъявлении запроса отличать записанные информационные блоки от новых. При записи на устойчивых циклах, система либо немедленно выдает один из записанных информационных блоков, либо отвечает, что предъявленной информации недостаточно для однозначной идентификации. При записи на неустойчивых предельных циклах, система исходно находится в режиме глобального хаоса и при предъявлении нового образа остается в хаотическом режиме; если же предъявляется один из записанных образов, то либо путем перестройки функции отображения, либо в результате синхронизации система переходит в режим воспроизведения периодической траектории с записанным циклом.

Проведен анализ возможности использования метода записи в задачах классификации. Классификация связана с необратимым сжатием информации и переходом от исходного подробного описания образов к ограниченному дискретному пространству признаков. Отнесение близких образов к одному классу означает, что классификатор как система распознавания их не различает. Исследования показали, что метод записи информации на траекториях кусочно-линейных отображений в своем исходном виде обладает «высоким разрешением», поэтому для решения задач классификации его необходимо «загрубить». Предложены варианты модификации метода записи, позволяющие осуществлять запись и распознавание классов образов (запись «нечеткой» информации), что открывает возможность решения задач классификации информационных объектов.

«Внутренним форматом» представления записываемой информации является дискретная конечная последовательность элементов (символов), принадлежащих ограниченному упорядоченному дискретному множеству (алфавиту), поэтому наиболее органично разработанный метод применим для записи текстов. Однако возможности метода могут быть расширены и на другие виды информации. В главе 3 обсуждаются способы предварительной обработки (предварительного кодирования) мультимедийных образов, необходимые для приведения их к требуемому для записи формату. Рассмотрены такие мультимедийные объекты, как двумерные изображения и одномерные непрерывные сигналы (на примере речи и музыки).



Рис. 3. Экспериментальный вариант информационно-поисковой системы

Областями применения разработанной технологии обработки информации на основе метода записи на предельных циклах и хаотических аттракторах отображений являются информационно-поисковые системы, системы документооборота, информационно-аналитические службы, системы поиска плагиата, рубрикаторы (классификаторы), цифровые архивы неструктурированной информации, информационные серверы, издательское дело (электронные книги, учебники) и т.п. (рис. 3).

В конце главы, на основе полученных результатов и материалов обзорной главы 1 обсуждается эволюция представлений о роли нелинейной и хаотической динамики в процессах обработки информации в живых и искусственных системах. С начала 1990-х гг., когда была поставлена эта часть диссертационной работы, концепция динамических принципов обработки информации в мозге стала общепринятой. Простота базовой математической модели (одно- и многомерные отображения), выбранной в диссертационной работе, позволила построить эффективные функциональные модели памяти и реализовать широкий набор функций обработки информации.

В четвертой главе исследуется задача разделения суммы хаотических сигналов, которая возникает, когда наблюдатель получает определенную комбинацию сигналов двух и более хаотических источников. Чтобы изучить сигнал каждого из источников, необходимо разделить наблюдаемый сигнал на составляющие его компоненты. На пути к наблюдателю хаотические сигналы этих источников могут не только складываться, но и затухать, подвергаться фильтрации или претерпевать другие преобразования. Однако прежде чем решать задачу в общей постановке, имеет смысл выяснить, имеет ли она решение в более простом случае. Этим обусловлены постановка задачи, выбор количества источников, их динамики, размерности и сложности. В диссертационной работе исследована проблема разделения хаотических сигналов из зашумленной суммы, а в качестве источников хаотических сигналов рассмотрены динамические системы с дискретным временем (одномерные отображения).

Подход, предложенный в данной работе, основан на ключевом свойстве любых хаотических систем – положительности показателя Ляпунова. Эта характеристика означает, что близкие траектории в фазовом пространстве экспоненциально быстро разбегаются (происходит «растяжение» фазового пространства) при итерировании (интегрировании) динамических систем и, соответственно, также быстро сходятся при итерировании этих систем в обратном времени.

Однако помимо «растяжения» механизм возникновения хаоса включает в себя также «складывание» фазового пространства, поэтому при итерировании в обратном времени функция динамической системы становится неоднозначной: одному состоянию системы $x(k)$ в момент времени k может соответствовать несколько прообразов $x(k-1)$. Для выделения нужной траектории из пучка возможных направлений обратной эволюции каждой из динамических систем, требуется эффективный алгоритм выбора нужной ветви.

Предложен и исследован метод разделения хаотических сигналов, основанный на знании динамики источников, порождающих хаотические колебания. В нем применяется итерирование уравнений, обратных к уравнениям, описывающим динамику хаотических источников. Метод характеризуется экспоненциальной сходимостью (рис. 4), и обеспечивает эффективное разделение хаотических сигналов не только при отсутствии, но и при наличии аддитивного гауссовского шума на пути суммарного сигнала к наблюдателю.

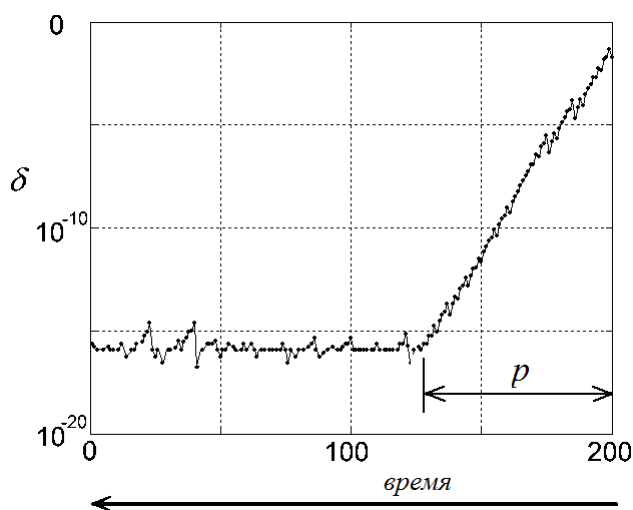


Рис. 4. Ошибка распознавания (итерирование в обратном времени)

Обнаружен пороговый эффект разделения, заключающийся в том, что существует значение отношения сигнал/шум в канале С/Швх, ниже которого сигналы не разделяются, а выше которого они могут быть разделены с заданной точностью.

Показано, что наличие такого порога является не «артефактом» метода, а принципиальным ограничением, связанным с информационным содержанием хаотических сигналов. Получена теоретическая оценка предельного порогово-

го значения отношения $C/\text{Ш}_{\text{вх}}$, которая может использоваться в качестве эталонного значения при численной оценке эффективности методов разделения хаотических сигналов.

Разработаны и исследованы алгоритмы, реализующие предложенный метод. Показано, что при использовании многоветочного алгоритма (в котором для каждой динамической системы отслеживается несколько вариантов фазовой траектории) обеспечивается эффективное разделение хаотических сигналов при отношении сигнал/шум в канале близком к теоретическому пределу. Также предложен алгоритм, обеспечивающий разделение сигналов в режиме реального времени, что может быть интересно для технических приложений.

Эффективность предложенного метода подтверждена путем численного моделирования на примере разделения сигналов хаотических источников, представленных логистическими отображениями. В частности, для задачи разделения сигналов двух логистических отображений с параметрами $\gamma_1 = 3,7$ и $\gamma_2 = 3,8$ получена теоретическая оценка порога по отношению сигнал/шум $C/\text{Ш}_{\text{вх}} = 20$ дБ, и показано, что алгоритм разделения, формирующий решение оптимальное на всем временном интервале, позволяет обеспечивать эффективное разделение при отношении сигнал/шум в канале $C/\text{Ш}_{\text{вх}} = 23$ дБ, что близко к теоретическому пределу.

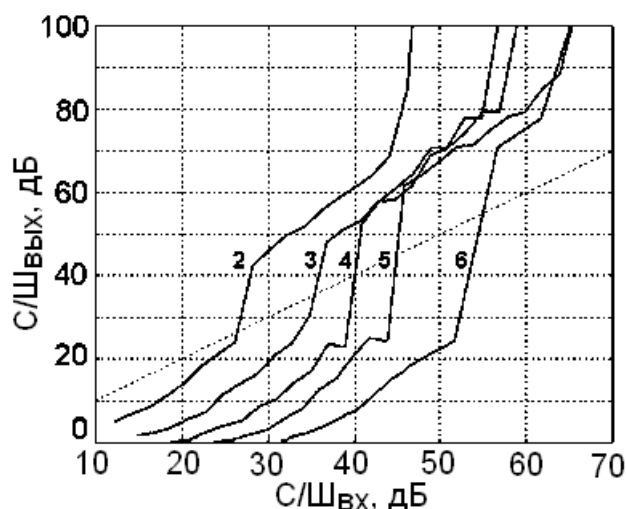


Рис. 5. Разделение суммы 2–6 хаотических сигналов.

Зависимость среднего отношения сигнал/шум $C/\text{Ш}_{\text{вых}}$ на выходе метода от уровня шума $C/\text{Ш}_{\text{вх}}$ суммарного сигнала

Также промоделирована задача разделения сигналов от $m = 2$ до $m = 6$ хаотических источников, представленных логистическими и tent map отображениями. Обнаружено, что добавление каждого нового источника сдвигает (увеличивает) пороговое значение отношения $C/\text{Ш}_{\text{вх}}$ на $5 \dots 10$ дБ (рис. 5).

Работы, посвященные очистке от шума хаотических сигналов динамических систем с непрерывным временем, очистке от шума хаотических сигналов отображений с размерностью больше единицы, а также идеологически близкие работы по синхронизации хаотических динамических систем путем передачи информации об их состоянии¹², позволяют рассчитывать, что рассмотренный подход может быть распространен и на задачи разделения хаотических сигналов многомерных отображений и систем с непрерывным временем.

Таким образом, в четвертой главе исследован метод разделения суммы хаотических сигналов на компоненты. Хотя это исследование дано на примере пары логистических отображений, изложенный в данной главе подход к разделению хаотических сигналов одномерных отображений является полным и последовательным и позволяет получать как теоретические оценки, так и практические результаты для любых одномерных динамических систем с дискретным временем.

В пятой главе рассмотрены особенности распространения сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов в многолучевой среде. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований интерференции, прохождения через препятствия и явления многолучевого усиления. Эти вопросы являются актуальными в плане практического применения хаотических сигналов в СШП беспроводных системах передачи информации в качестве несущих сигналов.

Для узкополосных сигналов интерференция является ключевой проблемой при многолучевом распространении, так как она приводит к крупномасштаб-

¹² Dmitriev A.S., Kassian G., Khilinsky A. // Int. J. Bifurcation and Chaos, 2000, v. 10, no. 4, p. 749.

Дмитриев А.С., Касьян Г., Хаслер М., Хилинский А. // Радиотехника и электроника, 2001, т. 46, №5, с. 566.

Дмитриев А.С., Касьян Г.А. и др. // Радиотехника, 2005, №3, с. 18.

ным (25-30 дБ) колебаниям мощности принятого сигнала при незначительном перемещении приемника относительно передатчика. Необходимость компенсации потерь качества связи вследствие интерференции вынуждает разработчиков узкополосных систем передачи информации обеспечивать запас по мощности передатчика не менее 10 дБ и применять сложные схемы приема, компенсирующие большой динамический диапазон сигнала.

Сверхширокополосные хаотические сигналы имеют совершенно иной характер распространения в многолучевой среде. Теоретически и экспериментально показано, что сложение СШП сигнала прямого луча с отраженными лучами не приводит к возникновению интерференции. Это связано с тем, что лучи в точке приема являются некоррелированными, благодаря быстроспадающей автокорреляционной функции хаотических сигналов. Время автокорреляции τ сигнала обратно пропорционально его ширине полосы ΔF , т.е. $\tau = 1/\Delta F$.

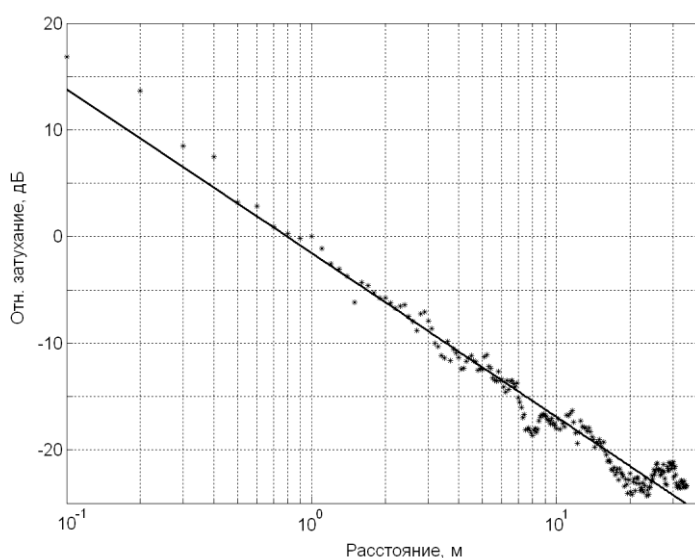


Рис. 6. Зависимость мощности сигнала на входе приемника СШП хаотических радиопульсов от расстояния при многолучевом распространении

Типичный график ослабления сигнала приемника с увеличением дальности связи приведен на рис. 6. Так как лучи в точке приема складываются по мощности, интерференционная картина практически отсутствует: размах колебаний мощности сигнала на входе приемника составляет 1,5-2 дБ по сравнению с 25-30 дБ для узкополосных сигналов (меньше на 2 порядка).

Помимо практического отсутствия интерференционной картины, существенной особенностью распространения сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов в многолучевой среде является более медленное ослабление мощности сигнала приемника с удалением от передатчика, чем в свободном пространстве: типичные значения показателя $n = 1,4 - 1,8$. В многолучевой среде сигнал затухает медленнее, так как на вход приемника за счет переотражений поступает больше энергии передатчика, чем в свободном пространстве, в котором энергия не прямых лучей безвозвратно теряется.

Вопрос прохождения СШП хаотических радиосигналов через препятствия (стены зданий) также рассмотрен с позиций многолучевого распространения. Предложена простая качественная модель, в которой прохождение сигнала через препятствие рассматривается как два одновременных процесса: зависящее от частоты ослабление электромагнитной волны в строительном материале (дающее почти экспоненциальный тренд) и рассеяние волны на неоднородностях материала стены. В случае узкополосного сигнала, сложение множества рассеянных лучей, которые являются когерентными, объясняет быстрые осцилляции показателя ослабления на экспериментальных графиках зависимости $S_{21}(f)$. В случае СШП сигналов, рассеянные лучи с относительной задержкой Δt , превышающей время автокорреляции τ , некогерентны и складываются по мощности, поэтому прохождение СШП сигналов должно сопровождаться меньшим ослаблением по сравнению с узкополосными сигналами. Для оценки показателя ослабления $S_{21,UWB}$ СШП сигнала можно ориентироваться на среднее по диапазону значение показателя ослабления $S_{21}(f)$, измеренное с помощью узкополосных сигналов, что подтверждается и численным моделированием на этой качественной модели.

Проведены натурные измерения ослабления СШП сигналов в кирпичной стене. Сравнение результатов СШП измерений с известными из литературы данными для узкополосных сигналов показало меньшее ослабление СШП сигналов. Поскольку экспериментальные и литературные измерения проводились

на разных материалах, делать однозначный вывод о преимуществе СШП сигналов преждевременно. Тем не менее, полученные экспериментальные данные (2-5 дБ для кирпичной стены толщиной 35 см) могут быть использованы при разработке СШП аппаратуры связи диапазона $F = 3-5$ ГГц.

Теоретически предсказано, численно и экспериментально исследовано явление многолучевого усиления хаотических сигналов (усиления мощности сигнала на входе приемника) в многолучевой среде. Коэффициент многолучевого усиления сигнала K_M определяется как отношение мощности сигнала на входе приемника P_M к мощности сигнала P_1 , доставляемого одним, самым сильным лучом:

$$K_M = P_M/P_1.$$

Выполнены численные оценки величины многолучевого усиления с помощью моделей СШП многолучевого канала Комитета по стандартизации IEEE 802.15.4a. Оценки составили $K_M = 5-9$ дБ для каналов с прямым лучом и $K_M = 5-14$ дБ для каналов без прямого луча.

Для верификации эффекта многолучевого усиления проведен ряд экспериментов в помещениях различного типа. На рис. 7 показаны усредненные импульсы огибающей хаотических радиоимпульсов на выходе логарифмического детектора приемника. По амплитуде импульсов на выходе логарифмического детектора можно судить о мощности сигнала на входе. Как видно из рисунка, в каждом помещении наблюдается разброс амплитуды импульса при перемещении измерительного стенда по помещению. Для конференц-зала и коридора этот разброс составляет около 3 дБ по мощности сигнала на входе приемника; на складе около 4,5 дБ. Что более важно, при переходе из конференц-зала, который можно рассматривать как приближение «свободного пространства», в многолучевую среду, т.е. в коридор или на склад, мощность сигнала на входе приемника ощутимо увеличивается: на 7–9 дБ в коридоре и на 7–14 дБ на складе. Эти экспериментальные результаты близки к теоретическим оценкам.

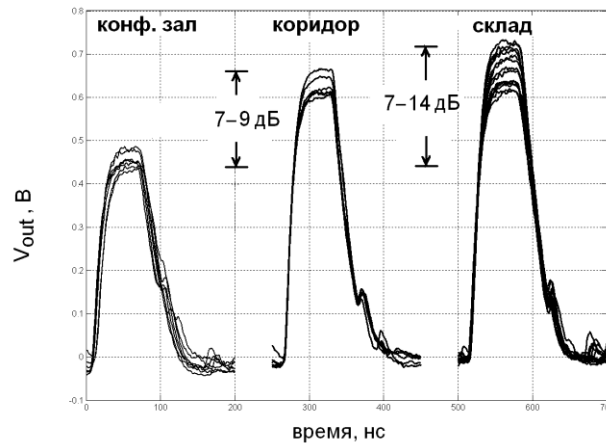


Рис. 7. Огибающие хаотических радиоимпульсов в помещениях разных типов

Таким образом, в ходе экспериментальных исследований были выявлены особенности распространения СШП хаотических радиосигналов в помещениях, такие, как практическое отсутствие интерференции, лучшее прохождение через препятствия, многолучевое усиление. В основе всех этих эффектов лежит отсутствие корреляции между отраженными, преломленными и т.п. лучами на входе приемника, обусловленное быстроспадающей автокорреляционной функцией хаотических сигналов.

Исследован вопрос, являются ли описанные свойства СШП хаотических радиоимпульсов уникальными, или же некогерентное сложение лучей возможно и для других типов СШП сигналов, и они также могут иметь подобные свойства. Выявлены условия наблюдения описанных эффектов:

- малое время автокорреляции сигналов: $\tau \ll t_{\text{мл}}$, где $t_{\text{мл}}$ – характерная длительность многолучевого «хвоста»;
- длительность радиоимпульса значительно больше времени автокорреляции: $t_{\text{и}} \gg \tau$, чтобы нашлось достаточно много некоррелированных лучей, энергия которых суммируется;
- длительность радиоимпульса больше длины многолучевого хвоста: $t_{\text{и}} > t_{\text{мл}}$, чтобы энергия задержанных лучей складывалась в основном с энергией главного луча, а не попадала на другие радиоимпульсы или защитные интервалы.

Анализ характеристик других СШП сигналов, включая сверхкороткие импульсы, OFDM-импульсы, ЛЧМ-импульсы, короткие радиоимпульсы и их пачки, показал, что описанные явления могут, по-видимому, наблюдаться только для ЛЧМ-импульсов (хотя и в меньшей степени, вследствие более медленного затухания автокорреляционной функции ЛЧМ-импульсов).

В шестой главе аналитически, путем численного моделирования и в физическом эксперименте исследованы характеристики ансамбля сверхширокополосных прямохаотических излучателей. Использование таких ансамблей позволяет решить актуальную проблему увеличения мощности и соответственно дальности передачи информации за счет организации коллективного режима излучения радиосигналов в системах связи на хаотических несущих.

Задача увеличения дальности СШП связи возникает из-за ограничений на спектральную плотность излучения, накладываемых стандартами¹³, в соответствии с которыми мощность излучения одного передатчика не может превышать нескольких сотен микроватт, вследствие чего дальность действия СШП устройств связи составляет порядка $d = 10\text{--}30$ м. Однако данные ограничения относятся только к отдельным передатчикам, при этом разрешается использование в одной области пространства совокупности передатчиков с некогерентными сигналами, что дает возможность применения ансамблей передатчиков в режиме коллективного излучения.

Особенность сверхширокополосного излучающего прямохаотического ансамбля заключается в том, что сигналы генераторов элементов ансамбля являются некоррелированными в силу их хаотической природы, поэтому электромагнитные поля, создаваемые излучателями, в точке приема являются некогерентными, а их мощности складываются. Благодаря этому энергетические характеристики излучения ансамбля СШП хаотических передатчиков существенно отличаются от характеристик как узкополосных ансамблей, так и СШП ансамблей, использующих другие типы СШП сигналов.

¹³ IEEE Standard 802.15.4a: MAC and PHY Specifications for Low-Rate WPANs 2007.
IEEE Standard 802.15.6: Wireless Body Area Networks. 2012.

Схема организации режима коллективного излучения изображена на рис. 8. В отличие от классических передатчиков с многоэлементными антенными системами, в прямохаотических передающих ансамблях синхронизация элементов производится не по несущему сигналу, а по информационному. Благодаря этому парциальные несущие сигналы являются независимыми и некоррелированными, при этом излучение хаотических радиоимпульсов отдельными передатчиками происходит одновременно.

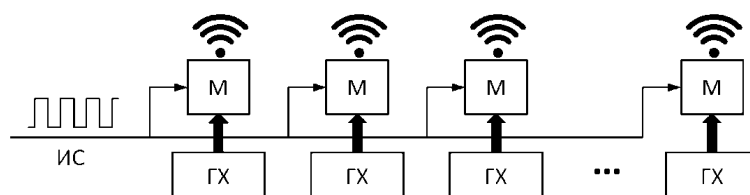


Рис. 8. Ансамбль прямохаотических излучателей
ИС – информационный сигнал, ГХ – генератор хаоса, М – модулятор

Характеристики излучения СШП прямохаотического передающего ансамбля исследованы аналитически. В скалярной модели сигналов в частотной области получены выражения для энергетических характеристик излучения ансамбля, включая мощность излучения, энергетическую диаграмму направленности (ЭДН) и границу дальней зоны.

Показано, что вдоль всех направлений в дальней зоне плотность мощности поля ансамбля в точке наблюдения равна сумме плотностей мощности полей, создаваемых в этой точке излучателями ансамбля. Если все излучатели ансамбля одинаковы, а их антенны одинаково ориентированы, то плотность мощности поля пропорциональна количеству элементов ансамбля N . Таким образом, для ансамбля отношение сигнал/шум в точке приема в N раз больше, чем для одного передатчика, поэтому применение ансамбля СШП хаотических передатчиков обеспечивает увеличение дальности передачи (в свободном пространстве) в \sqrt{N} раз по отношению к дальности одного передатчика.

Выведено выражение для энергетической диаграммы направленности (зависимость полного потока энергии от направления в пространстве) для единичного СШП излучателя

$$H(\theta, \alpha) = \frac{\int_{\omega_n}^{\omega_b} |S(\omega)|^2 F^2(\theta, \alpha, \omega) d\omega}{\int_{\omega_n}^{\omega_b} |S(\omega)|^2 d\omega},$$

где $S(\omega)$ – комплексная спектральная плотность сигнала на входе антенны, $F(\theta, \alpha, \omega)$ – нормированная диаграмма направленности по полю антенны излучателя, ω_n и ω_b – нижняя и верхняя граничные круговые частоты СШП сигнала. Как следует из этого выражения, ЭДН СШП излучателя зависит не только от свойств антенны, но и от спектра излучаемого сигнала.

Получено, что ЭДН ансамбля СШП прямохаотических излучателей является линейной комбинацией ЭДН парциальных излучателей ансамбля

$$H_{\Sigma}(\theta, \alpha) = \frac{\sum_{n=1}^N P_n H_n(\theta, \alpha)}{\sum_{n=1}^N P_n},$$

где P_n – интегральная мощность излучения n -го источника. Это свойство дает возможность построения ансамблей с произвольными ЭДН (с определенными ограничениями).

В дальней зоне волновой фронт излучения ансамбля с СШП изотропными излучателями является поверхностью сферы. По мере приближения к центру ансамбля эта поверхность начинает деформироваться. По геометрическим искажениям поверхности равной мощности поля, выведена оценка границы дальней зоны

$$r_{\text{дз, СШП}} \approx \frac{L}{2} \sqrt{\frac{3}{\delta}}.$$

где δ – степень искажений, например, отношение полуосей деформированной сферы, L – максимальный геометрический размер ансамбля. При $\delta = 10\text{-}20\%$ граница дальней зоны составляет $2\text{-}3 L$, что существенно меньше оценки для узкополосных антенных систем, для которых

$$r_{\text{дз}} \approx 2 \frac{L^2}{\lambda}.$$

Эту разницу можно объяснить хаотической природой используемого сигнала СШП ансамбля, которая обеспечивает некоррелированность волн разных элементов ансамбля в точке приема, поэтому фазовые соотношения и относительные задержки между волнами разных источников в точке приема при расчете интегральной мощности поля не существенны.

Построена и исследована модель СШП прямохаотического передающего ансамбля. Полученные расчетные результаты подтверждают теоретические результаты о суммировании мощности полей передатчиков ансамбля, о структуре поля излучения СШП ансамбля с направленными и ненаправленными антеннами, о границе дальней зоны ансамбля.

Методом численного моделирования также исследован вопрос межимпульсных помех, связанных с относительными задержками распространения СШП хаотических радиоимпульсов от излучателей ансамбля до точки приема. Показано, что помехи появляются при уменьшении длительности СШП хаотических радиоимпульсов T_p , когда пространственная длина радиоимпульсов cT_p становится сравнима с размерами ансамбля L (c – скорость света). Так как скорость передачи информации определяется длительностью радиоимпульсов, пространственная структура сверхширокополосного прямохаотического передающего ансамбля может накладывать ограничения сверху на скорость коллективной передачи информации. Для уменьшения этого эффекта необходимо уменьшать пространственные размеры ансамбля, например, путем двух- и трехмерной компоновки СШП излучателей.

Проведено сравнение характеристик направленности излучения СШП ансамблей излучателей хаотических радиоимпульсов с известными из литературы данными по СШП излучателям сверхкоротких импульсов и соответствующим антенным решеткам. Как следует из литературы, свойства ансамблей (антенных решеток) излучателей коротких и сверхкоротких импульсных СШП сигналов качественно близки к свойствам антенных решеток традиционных узкополосных систем. Суммирование в пространстве сигналов источников

СШП сверхкоротких и коротких импульсов приводит к появлению резко выраженных направленных свойств, даже при использовании ненаправленных антенн, что в корне отличает их от характеристик ансамблей излучателей СШП хаотических сигналов. Анализ показал, что направленные свойства решеток излучателей СКИ обусловлены коррелированностью излучаемых решеткой сигналов.

Именно отсутствие коррелированности сигналов независимых источников СШП хаотических колебаний является причиной уникальных свойств ансамбля СШП прямохаотических передатчиков, в том числе отсутствия направленности излучения при использовании ненаправленных антенн. Данный вывод проиллюстрирован на модельных примерах с когерентными ансамблями.

Другие типы СШП сигналов, такие, как сверхкороткие импульсы и ЛЧМ-сигналы, также имеют малое время автокорреляции, однако в силу их детерминированности (повторяемости) сигналы разных излучателей в точке приема оказываются когерентными, поэтому свойства ансамблей с этими СШП излучателями близки к свойствам узкополосных ансамблей.

На основе полученных данных создан экспериментальный макет СШП прямохаотического передающего ансамбля. Синхронизация передатчиков ансамбля по времени излучения осуществлялась по беспроводному каналу. Экспериментально подтверждены теоретические результаты в части мощности коллективной передачи (рис. 9). Как следует из рисунка, каждое удвоение числа излучателей N ансамбля приводит к увеличению мощности сигнала на входе приемника приблизительно на 3 дБ.

Таким образом, в шестой главе предложен и исследован ансамбль СШП прямохаотических передатчиков, который позволяет за счет некогерентного сложения мощности его элементов увеличивать излучаемую мощность пропорционально числу элементов ансамбля, не выходя за ограничения, накладываемые на нелицензируемые средства сверхширокополосной связи. Это свой-

ство может найти применение в многоэлементных системах (например, коллективах роботов) для увеличения дальности связи.

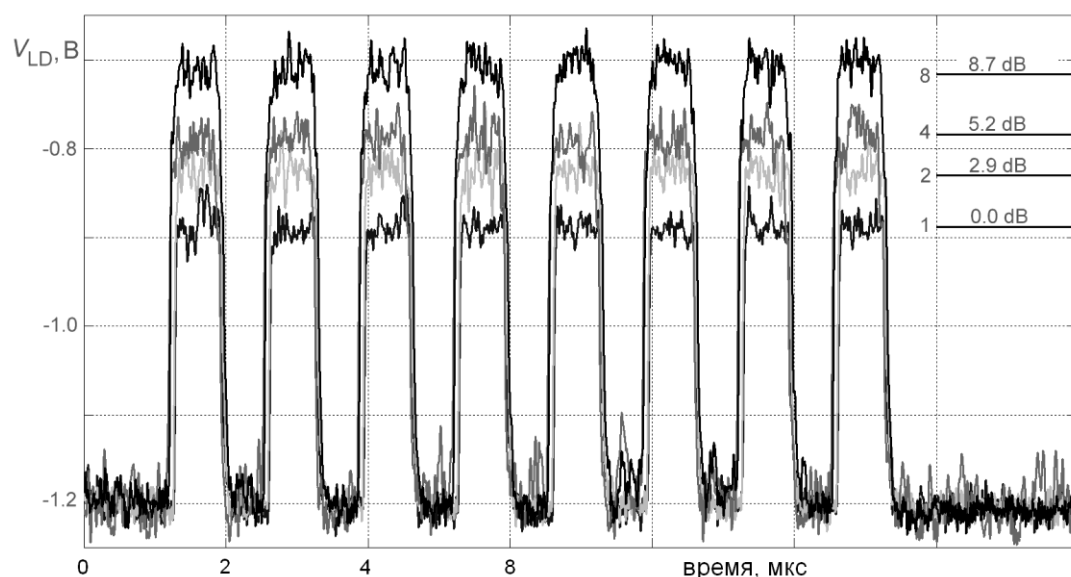


Рис. 9. Сигнал огибающей пачки хаотических радиоимпульсов V_{LD} в приемнике для ансамбля СШП хаотических излучателей с $N = 1, 2, 4$ и 8 элементами

В Заключение обсуждаются основные результаты, полученные в работе, и формулируются выводы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе рассмотрен комплекс вопросов, связанных с разработкой и исследованием принципов и методов обработки информации методами нелинейной динамики, а также с разработкой и исследованием принципов и методов передачи информации с помощью хаотических сигналов, в том числе сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов в беспроводных каналах связи. В ходе проведенных исследований получены следующие основные результаты:

1. Создана теория записи и обработки информации с помощью нелинейных динамических систем, в том числе:

- методы и алгоритмы синтеза нелинейных динамических систем с дискретным временем заданной размерности с динамическими аттракторами (циклы, хаотические аттракторы) заданной структуры в фазовом пространстве;

- методы записи конечных одномерных и многомерных информационных последовательностей в отображениях различной размерности и их извлечения.
2. При исследовании созданной теории записи и обработки информации:
- выполнены оценки предельной емкости записи, предложены и исследованы способы увеличения емкости, включая увеличение уровня записи, повышение размерности динамической системы, специальное кодирование записываемой информации;
 - исследованы динамические явления, сопровождающие потерю устойчивости информационных циклов; показано, что при изменении параметра устойчивости информационных предельных циклов переход к глобальному хаотическому режиму происходит через рождение хаотических интервальных циклов, которые также можно использовать в качестве носителей информации;
 - на основе исследования динамики отображений с записанной информацией, выделены режимы, позволяющие реализовать такие функции обработки информации, как ассоциативный поиск, фильтр новизны, распознавание, «кратковременная» и «долговременная» память, хаотическое сканирование памяти и др.
3. На основе разработанной теории реализованы экспериментальные варианты информационно-поисковых систем с развитыми поисковыми возможностями, способные осуществлять среди записанной информации поиск «по содержанию», поиск «похожих» документов, а также выполнять автоматическую рубрикацию.
4. Предложен и исследован метод разделения хаотических сигналов, основанный на знании динамики порождающих эти сигналы нелинейных динамических систем. Метод, основанный на итерировании уравнений динамических систем в обратном времени, характеризуется экспоненциальной сходимостью и обеспечивает эффективное разделение хаотических сигналов при наличии

аддитивного гауссовского шума. Обнаружено наличие порога разделения по величине отношения сигнал/шум. Показано, что существование порога связано с информационным содержанием хаотических сигналов, описана регулярная процедура оценки предельной величины порога.

5. Проведено исследование особенностей распространения сверхширокополосных хаотических сигналов в многолучевой среде. Показано, что при распространении СШП хаотических сигналов интерференционная картина в многолучевой среде практически отсутствует, размах колебаний мощности СШП сигнала на входе приемника составляет 1,5-2 дБ.

6. Теоретически обнаружено и экспериментально подтверждено явление многолучевого усиления. Выявлены условия наблюдения этого эффекта. Проведен сравнительный анализ возможности многолучевого усиления для различных типов сверхширокополосных импульсных сигналов, показавший, что данный эффект возможен почти исключительно для хаотических сверхширокополосных радиоимпульсов.

7. Предложен и исследован новый тип устройств передачи информации – многоэлементный ансамбль сверхширокополосных прямохаотических передатчиков, работающих в коллективном режиме излучения. Он позволяет реализовать некогерентное сложение мощности излучения элементов ансамбля в пространстве и соответственно увеличить дальность связи.

8. Аналитически получены энергетические характеристики излучения ансамбля (мощность, диаграмма направленности, границы ближней зоны), которые подтверждены при моделировании и в физическом эксперименте.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки для опубликования научных результатов диссертаций:

1. Andreyev Yu.V., Dmitriev A.S., Chua L.O. and Wu C.W. Associative and Random Access Memory Using One-Dimensional Maps // Int. J. Bifurcation and Chaos, 1992, vol. 3, pp. 483-504.

2. Андреев Ю.В., Бельский Ю. Л., Дмитриев А.С., Куминов Д.А. Динамические системы с хаосом как среда для записи, хранения и обработки информации // Изв. ВУЗов. Радиофизика, 1994, т. 37, с. 1003-1019.
3. Андреев Ю.В., Дмитриев А.С. Запись и восстановление изображений в одномерных динамических системах // Радиотехника и электроника, 1994, т. 39, вып. 1, с. 104-113.
4. Андреев Ю.В., Бельский Ю. Л., Дмитриев А.С. Запись и восстановление информации с использованием устойчивых циклов двумерных и многомерных отображений // Радиотехника и электроника, 1994, т. 39, вып. 1, с. 114-123.
5. Андреев Ю.В. Аттракторы и бифуркационные явления в одномерных динамических системах с записанной информацией // Изв. ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика, 1995, т. 3, №5, с. 3-15.
6. Andreyev Yu.V., Dmitriev A.S., D.A. Kuminov, Chua L.O., and Wu C.W. 1-D_Maps, Chaos and Neural Networks for Information Processing // Int. J. Bifurcation and Chaos, 1996, vol. 6, no. 4, pp. 627-646.
7. Andreyev Yu.V., Belsky Yu.L., Dmitriev A.S., and Kuminov D.A. Information processing using dynamical chaos // IEEE Trans. Neural Networks, 1996, vol. 7, pp. 290-299.
8. Andreyev Yu.V., Dmitriev A.S., and Starkov S.O. Information Processing in 1-D Systems with Chaos // IEEE Trans. Circuits and Systems, 1997, vol. 44, no. 1, pp. 21-28.
9. Andreyev Yu., Dmitriev A., and Ovsyannikov A. Chaotic Processors and Content-Based Search of Information in Unstructured Data Bases // Nonlinear Phenomena in Complex Systems, 1999, vol. 2, no. 4, pp. 48-53.
10. Андреев Ю.В., Дмитриев А.С. и др. Хаотические маркеры и асинхронная передача данных // Письма в ЖТФ, 2000, т. 26, вып. 14, с. 53-59.
11. Андреев Ю.В., Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Пустовойт В.И. Разделение хаотических сигналов // Доклады РАН, 2000, т. 372, № 1, с. 187-190.
12. Андреев Ю.В., Дмитриев А.С., Ефремова Е.В. Разделение хаотических сигналов при наличии шума // Радиотехника и электроника, 2001, т. 46, №12, с. 1346-1355.

13. Andreyev, Yu.V., Dmitriev, A.S. and Efremova E.V. Information approach to separation of chaotic signals // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*, 2002, vol. 5, no. 1, pp. 59-70.
14. Andreyev, Yu.V., Dmitriev, A.S. and Efremova E.V. Dynamic separation of chaotic signals in the presence of noise // *Phys. Rev. E*, 2002, vol. 65, p. 046220.
15. Andreyev Yu.V., Dmitriev A.S., Efremova E.V., Anagnostopoulos A.N. Chaotic signal processing. Information aspects // *Chaos, Solitons and Fractals*, 2003, vol. 17, no. 2-3, pp. 531-544.
16. Andreyev Yu.V., Dmitriev A.S., Efremova E.V., and Anagnostopoulos A.N., Separation of chaotic signal sum into components in the presence of noise // *IEEE Trans. Circuits and Systems-I*, 2003, vol. 50, no. 5, pp. 613-618.
17. Andreyev Yu.V., Dmitriev A.S., Efremova E.V., Khilinsky A.D., Kuzmin L.V. Qualitative theory of dynamical systems, chaos and contemporary communications // *Int. J. Bifurcation and Chaos*, 2005, vol. 15, no. 11, pp. 3639-3651.
18. Андреев Ю.В., Дмитриев А.С., Клецов А.В. Усиление хаотических радиоимпульсов в многолучевой среде распространения // *Радиотехника и электроника*, 2007, т. 52, №7, с. 838–846.
19. Андреев Ю.В., Дмитриев А.С., Кузьмин Л.В., Мохсени Т.И. Сверхширокополосные сигналы для беспроводной связи // *Радиотехника*, 2008, №8, с. 83–90.
20. Андреев Ю.В., Кузьмин Л.В., Морозов В.А., Старков С.О. Распространение и прием сверхширокополосных хаотических сигналов в условиях многолучевого распространения // *Успехи современной радиоэлектроники*, 2008, №1, с. 63-76.
21. Рыжов А.И., Лазарев В.А., Мохсени Т.И., Никеров Д.В., Андреев Ю.В., Дмитриев А.С., Чубинский Н.П. Ослабление сверхширокополосных хаотических сигналов диапазона 3–5 ГГц при прохождении через стены зданий // *Журнал радиоэлектроники*, № 5, 2012.
22. Мохсени Т.И., Рыжов А.И., Лазарев В.А., Андреев Ю.В. Эксперименты по прохождению СШП хаотических сигналов от датчиков, расположенных внутри автомобиля // *Успехи современной радиоэлектроники*, 2013, №3, с. 72-78.

23. Андреев Ю.В., Дмитриев А.С., Лазарев В.А., Рыжов А.И. Экспериментальное исследование распространения сверхширокополосных хаотических сигналов в помещениях // Успехи современной радиоэлектроники, 2013, №3, с. 55-66.

24. Андреев Ю.В., Дмитриев А.С., Лазарев В.А. Коллективная передача информации сверхширокополосным прямохаотическим ансамблем // Физические основы приборостроения, 2017, т. 6, №2 (24), с. 80-89.

Статья в коллективной монографии:

25. Andreyev Y.V., Dmitriev A.S., Miliou A.N., Anagnostopoulos A.N.: Chapter 9: “Non-linear Dynamics for Information Processing”, in: Applications of Chaos and Nonlinear Dynamics in Science and Engineering – Vol. 1, eds. S. Banerjee, M. Mitra, L.Rondoni, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2011, pp. 273–320.

Публикации в других журналах:

26. Андреев Ю.В., Дмитриев А.С., Куминов Д.А. Хаотические процессоры // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники, 1997, № 10, с. 50-79.

27. Андреев Ю.В., Дмитриев А.С. и др. Стратегии использования динамического хаоса в коммуникационных системах и компьютерных сетях. Разделение кодера источника и кодера канала // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники, 2000, №11, с. 4-26.

28. Andreyev Yu.V., Dmitriev A.S. Modeling 'cognition' with nonlinear dynamic systems // “Symmetries in genetic information and algebraic biology”, спец. вып. журн. “Symmetry: Culture and Science”, Guest ed. S. Petoukhov, 2012, vol. 23, no. 3-4, pp. 377-402.