

На правах рукописи



Измайлов Игорь Валерьевич

**ФОРМИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОСТИ
В КОЛЕБАТЕЛЬНО-ВОЛНОВЫХ И ПОТОКОВЫХ
СИСТЕМАХ: ПРИНЦИП, АНАЛИЗ, СИНТЕЗ, ПРИМЕНЕНИЕ**

специальности:

01.04.03 – Радиоп физика, 01.04.05 – Оптика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Томск – 2011

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет» на кафедре квантовой электроники и фотоники.

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук,
профессор Аникин Валерий Михайлович;
Доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Колосов Валерий Викторович;
Доктор физико-математических наук,
профессор Якубов Владимир Петрович,

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский государственный
университет информационных технологий,
механики и оптики (г. Санкт-Петербург).

Защита состоится « 27 » декабря 2011 г.

в 14 ч. 30 мин на заседании диссертационного совета
Д 212.267.04 при Национальном исследовательском Томском государственном университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, ауд. 119.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке ТГУ.

Автореферат разослан « 15 » ноября 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Пойзнер Б.Н.

Актуальность исследуемой проблемы. В настоящее время, как и ранее, на физику возложена миссия флагмана естествознания. Перед ней стоит проблема своевременной, обобщающей, методологически ёмкой, а потому плодотворной интеграции представлений и моделей, созданных в различных отделах знания о материальном мире. Примером способа решения этой проблемы является теория нелинейных колебаний и волн, а также кровнородственная ей нелинейная динамика (часто называемая синергетикой, *Nonlinear Science* – в англоязычной литературе), изучающая закономерности строения и поведения саморазвивающихся систем, явления самоорганизации, детерминированного хаоса как особого порядка etc.

Различные суждения на этот счёт сформулированы, например, такими учёными и методологами современной науки, как В.М. Аникин и А.Ф. Голубенцев, В.С. Анищенко, Т.Е. Вадивасова и В.В. Астахов, В.И. Аршинов, Р.Г. Баранцев, Б.П. Безручко и Д.А. Смирнов, И.И. Блехман, В.Г. Буданов, С.Н. Владимиров, Ю.А. Данилов, А.С. Дмитриев и В.Я. Кислов, Г.М. Заславский и Р.З. Сагдеев, С.П. Капица, М.В. Капранов, В.Н. Кулешов и Г.М. Уткин, Н.В. Карлов и Н.А. Кириченко, Ю.Л. Климонтович, Е.Н. Князева и С.П. Курдюмов, С.П. Кузнецов, Кл. Майнцер, Г.Г. Малинецкий, Ю.И. Неймарк и П.С. Ланда, Е.Б. Пелюхова и Э.Е. Фрадкин, А.А. Потапов, И.Р. Пригожин, М.И. Рабинович и Д.И. Трубецков, Н.Н. Розанов, А.Л. Санин, Э. Скотт, С.Д. Хайтун, Г. Хакен, Д.С. Чернавский, Л. Чуа, В. Эбелинг и др.

При этом синергетика обнимает – среди прочих её слагаемых – два относительно удалённых подхода. Один из них, обычно связываемый с именами А. Пуанкаре, А.А. Андропова, Л.И. Мандельштама, Э. Лоренца, Г. Хакена, делает упор на единство математических моделей колебательно-волновых и хаотических процессов самой различной природы. Другой, – предложенный школой И. Пригожина, подчёркивает открытость системы, через которую распространяется поток вещества либо тепловой энергии, либо их комбинация, благодаря чему возможна самоорганизация.

Потребность в сближении этих двух подходов, осознаваемая не менее двух десятилетий, приобретает сегодня особую остроту¹. В частности – в связи с быстрым развитием нанотехнонауки. Вооб-

¹ Аршинов В.И. Синергетика конвергирует со сложностью // Вопросы философии. – 2011. – № 4. – С. 73–83.; Буданов В.Г. Методология синергетики в постнеклассической науке и образовании. – М.: Изд-во ЛКИ, 2007. – 232 с.; Баранцев Р.Г. Синергетика в современном естествознании. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 144 с.; Синергетика и методы науки / Под ред. М.А. Басина. – СПб.: Науки, 1998. – 439 с.

ще же, к началу XXI в. становится всё более очевидной неоправданная удалённость от теории систем ряда традиционных разделов физики. Это относится к тем разнообразным научным направлениям, которые опираются на понятие потока и системы либо явно, либо латентно, как, например радиофизика и оптика. Одним из возможных путей сближения этих научных направлений является обращение к опыту построения аксиоматических схем исследования. Его классический пример – геометрия, в нелинейной динамике – аксиоматический принцип построения моделей e.g. активной (возбуждаемой) среды, восходящий к Н. Винеру и А. Розенблюту (1946).

Известно, что в научном познании проявляются, переплетаясь, две фундаментальные тенденции: всё более интенсивный *поиск единого* в разнообразном, а также дополнительная к ней и равно необходимая – *повышение разнообразия*, диверсификация. Первую тенденцию выражает, например, стремление физиков и других естествовладельцев применять теорию подобия. Тем самым, достигается унификация и генерализация представлений о самых разнородных объектах, скажем, о динамических системах (ДС), а также сближение исследовательских программ и позиций учёных в разных областях.

Вторая тенденция обеспечивает мнимую «избыточность» культурной продукции (и имеет параллель в биологической эволюции). Её легко обнаружить в росте разнообразия научно-технической продукции: идей, текстов, изданий, веществ, технических изделий и устройств etc. Применительно к области ДС вторая тенденция означает диверсификацию этих систем, например, в радиофизике, электронике, фотонике, оптике.

Функциональные свойства радиофизических, оптических и других систем едва ли не в первую очередь обуславливаются *нелинейностью* содержащихся в них материальных сред, а также, условно говоря, числом и топологией связей между частями целого. Согласно Ю.А. Данилову, категория нелинейности – одна из фундаментальных не только в физике и технике, но и во всём современном естествознании, которое, по слову Г.Г. Малинецкого, до сих пор переходит на «нелинейную» ступень познания. В этом плане Е.Н. Князева и С.П. Курдюмов говорят о нелинейности в мировоззренческом смысле, а многие другие современные исследователи, e.g. Кл. Майнцер – о нелинейном мышлении. Использование нелинейных математических моделей позволяет объединить и описать большой круг разрозненных явлений, показать их сущность.

Из-за многообразия нелинейных функций возникает «разношёрстность» вариантов нелинейности в природных, технических, социальных системах. Но если говорить о коллекции изученных, освоенных, т.е. «готовых», типов нелинейности (вроде функции $y_0(x) = a x + b x^2$) и их носителей в системах, то коллекция относительно немногочисленна. Действительно, традиционно ДС имеют одну «готовую» нелинейность. Примеры тому – использующиеся в радиофизике (часто в качестве эталонов при разработке новых моделей) генератор Ван дер Поля, генератор Теодорчика–Капцова–Анищенко–Астахова, система Лоренца, генератор Кияшко–Пиковского–Рабиновича, система Рёсслера, генератор Дмитриева–Кислова, схема Чуа, система Икеды.

Такое положение дел с «репертуаром» нелинейных функций, используемых в системах и их моделях, на наш взгляд, не отвечает их методологическому статусу, особенно в плане управления сложной динамикой, а тем более – самоуправления. Насколько можно судить по литературе последних лет, до сих пор нет работ, в которых ставился бы общий вопрос о способах формирования нелинейности ДС, скажем, в форме задачи об управлении её оператором эволюции либо о самоуправлении его (т.е. эволюции оператора эволюции). Между тем, такое устремление вполне в духе трансдисциплинарной инициативы научного сообщества Nano-Bio-Information-Cognitive-technology; проекта FACETS (Fast Analog Computing with Emergent Transient States), генетически восходящего к теории искусственных нейросетей, а также её ветви, развиваемой в трудах Р. Пенроуза, Е.Е. Слядникова и др., касающихся идеи «квантового вычислителя» на внутриклеточном уровне.

Но неверно было бы заявлять, что повышение разнообразия операторов эволюции не имеет места в творческой практике. Так, повышение разнообразия может достигаться интеграцией одно- либо разнотипных генераторов в единую систему. Этот способ диверсификации невольно осуществляется, когда ставится и решается задача синхронизации двух и более объектов. А когда этих объектов достаточно много, то всё большую роль в характере поведения играет структура связей их взаимодействия. Различными аспектами явления (хаотической) синхронизации занимались многие авторы. В дополнение к упомянутым выше именам нельзя не назвать, например, таких исследователей, как Г. Абарбанель, В.С. Афраймович, В.Н. Белых, С. Боккалетти, П. Грассбергер, В.Б. Казанцев, Л. Кокарев, А.А. Короновский, А.П. Кузнецов, Ю. Куртс,

В. Линдсей, В.В. Матросов, А.П. Напартович, В.И. Некоркин, Г.В. Осипов, А.Н. Павлов, А.И. Панас, У. Парлиц, Л. Пекора, А.С. Пиковский, К. Пирагас, В.И. Пономаренко, В.П. Пономаренко, Д.Э. Постнов, М.Г. Розенблюм, Н.Ф. Рульков, А.Г. Сухарев, А.Е. Храмов, В.Д. Шалфеев.

В случае объединения разнотипных генераторов, правомерно назвать их гибридами (скажем, синтез генераторов Ван дер Поля и Дуффинга). При создании же *многоэлементных* систем принято выражать особенности их строения терминами: цепочка, решётка, ансамбль, сеть связанных генераторов. Но указанные пути повышения разнообразия не предполагают перестройки вида оператора эволюции подсистемы (в частности – её нелинейности) в ходе эволюции, происходящей в системе, а также обычно не рассчитаны на его перестройку из-за изменения структуры связей других частей системы с этой подсистемой. Иногда же система ведёт себя так, словно подобная перестройка случается².

Перечисленные программы исследований составных ДС не имеют целью синтезировать новый вид нелинейности (в том числе самоуправляемой), хотя и не исключают такого исхода (например³). В то же время, «рождение» новой нелинейности может и не быть продуктом «скрещивания» систем, однако оно способно повлечь их диверсификацию. Но здесь встают вопросы: как обогащать пул известных нелинейностей; возможно ли этого достичь дистанционно, т.е. не изменяя физической конструкции частей устройства, охваченных обратными связями; какие ДС правомерно считать *различными*, а какие – одинаковыми?

Они возвращают к необходимости следовать *первой тенденции*: поиск единого в разнообразном, унификации описания систем. Подобный класс задач возникает, например, при выяснении эквивалентности так называемых динамических систем Дж. Спротта. При

² Владимиров С.Н. Динамические неустойчивости потоков и отображений. Взгляд радиофизика. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2008. – С. 44–86.

³ Балякин А.А., Рыскин Н.М. Переход к хаосу в нелинейном кольцевом резонаторе при возбуждении многочастотным сигналом // Изв. РАН Сер. физ. – 2001. – Т. 65. – № 12. – С. 1741–1744.; Измайлов И.В. Модель процессов в нелинейном кольцевом интерферометре, учитывающая запаздывание, потери, преобразование плотности энергии и многопроходимость немонахроматического поля / Ред. журн. «Изв. вузов. Физика». – Томск, 1997. – 15 с. – Деп. в ВИНТИ 31.12.97, № 3865-В97.; Ахмапов С.А., Воронцов М. А. // Нелинейные волны: динамика и эволюция: сб. ст. – М.: Наука, 1989. – С. 228–237.; Ikeda K. Multiple-valued stationary state and its instability of the transmitted light by ring cavity system // Opt. Comm. – 1979. – V. 30. № 2. – P. 257–260.

этом эквивалентность подразумевает замену переменных⁴. Здесь целесообразно и продуктивно сузить диапазон поиска и искать замену в некотором, заранее определённом, классе функций. Попутно надо уточнить: будет ли эквивалентностью в строгом смысле сводимость одной системы к другой, обратная сводимость, требование наличия их обеих; применимы ли к паре ДС, кроме эквивалентности, другие отношения, например – порядка? Характер заданных вопросов косвенно указывает на междисциплинарный характер обсуждаемой проблемы.

Что касается *практических* сторон и последствий её решения, то повышение разнообразия колебательно-волновых систем, их частот либо их параметров непосредственно отвечает интересам и целям создания информационно безопасных систем, использующих режим детерминированного хаоса (например⁵). Речь здесь может идти как о стеганографических, так и криптографических стратегиях. Повышение разнообразия это особенно необходимо при осуществлении криптографических стратегий, поскольку устойчивость криптосистемы к «взлому» её противником, в значительной мере определяется количеством ключей. Последнее же связано с числом «далеко отстоящих» друг от друга хаотических режимов.

В плане стеганографической и даже физической стойкости канала конфиденциальной связи прикладную значимость получает вопрос о передаче данных с помощью лазерных пучков с оптическими вихрями (винтовыми дислокациями волнового фронта). Здесь для кодирования и обработки информации предлагается использовать топологический заряд V_d вихря, но пока нет работоспособных прин-

⁴ Кузнецов С.П. Динамический хаос (курс лекций). – М.: Издательство Физико-математической литературы, 2001. – С. 79.

⁵ Короновский А.А., Москаленко О.И., Попов П.В., Храмов А.Е. Устройство для секретной передачи информации: Патент на полезную модель n 57538. Изобретение. Полезные модели: Официальный бюллетень ФС по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – М.: ФИПС, 2006. 10.10.2006. № 28.; Shigaev A.M., Ryskin N.M. Direct Chaotic Communications System on the Basis of a Delayed Feedback Klystron Oscillator // Sixth International Vacuum Electronics Conf. / IVEC 2005 (April 20–22, 2005, Noordwijk, the Netherlands). – Noordwijk, 2005. – P. 313–316.; Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. – М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2002. – 252 с.; Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н., Шулёпов М.А. Модуляция и демодуляция оптических сигналов с использованием нелинейного кольцевого интерферометра / Ред. журн. «Изв. вузов. Физика». – Томск, 2000. – 6 с. – Деп. в ВИНТИ 04.07.00, № 1865-B00.; Garcia-Ojalvo J., Roy R. Spatiotemporal communication with Synchronized Optical Chaos // <http://xxx.lanl.gov/abs/nlin.CD/0011012>. – 2000. – 6 Nov. – 4 p.; Хаслер М. Достижения в области передачи информации с использованием хаоса // Успехи современной радиоэлектроники. – 1998. – № 11. – С. 33–43.

ципов. Поэтому требуется разработка быстродействующего и надёжного устройства регистрации значения V_d , изучение влияния на работоспособность его (и системы связи в целом) искажений пучка, накладываемых атмосферой (например⁶), а также шумов фотоприёмника etc. Кодирование величиной заряда V_d есть процесс манипуляции параметром передатчика, и если его определение в приёмнике достижимо некоторой нелинейной операцией, то здесь – пересечение с задачей формирования нелинейности.

Диссертация выполнялась в рамках хоздоговорной и двух госбюджетных НИР СФТИ при ТГУ: НИР «Гамма» (2001–2003 гг.) и Госконтракт от 25.08.2008 № 02.513.12.3027; АВЦП Рег. № 2.1.2/6551. Актуальность избранной темы диссертации подтверждается поддержкой исследований автора: МНТЦ № 2631 (2004–2007, ведущая организация: ФГУП РФЯЦ ВНИИЭФ, г. Саров); РФФИ № 09-02-90452-Укр_ф_a (2009–2010, ИОА СО РАН). Кроме того, соискатель шесть раз являлся руководителем НИР по грантам (или получателем грантов): ФЦП «Интеграция науки и высшего образования России на 2002–2006 г.» (2004); ФАО Минобрнауки № 60321 (2005); РФФИ 05-02-27127-з; Президента РФ МК-4701.2006.9 (2006–2007); РФФИ № 08-01-07119-д, РФФИ № 08-01-02009-э_д.

Отсюда вытекают цели исследования. 1) Обоснование и построение аксиоматической схемы исследования систем. 2) Разработка принципов диверсификации систем, их сравнения и упорядочения. 3) Теоретическое описание нелинейных ДС с эволюционирующим оператором эволюции. 4) Разработка принципов применения полученных результатов для совершенствования генераторов хаоса и устройств конфиденциальной связи, для детектирования и пеленгации оптического вихря.

Задачи исследования. Реологическая интерпретация систем произвольной природы, уточнение роли «наблюдателя», расширение поня-

⁶ Канев Ф.Ю., Лукин В.П. Адаптивная оптика. Численные и экспериментальные исследования. – Томск: Изд-во Ин-та оптики атмосферы СО РАН, 2005. – 250 с.; Волновая и лучевая пространственная динамика светового поля при рождении, эволюции и аннигиляции фазовых дислокаций / В.П. Аксёнов, И.В. Измайлов, Б.Н. Пойзнер, О.В. Тихомирова // Оптика и спектроскопия. – 2002. – Т. 92, № 3. – С. 452–461.; Мощные лазерные пучки в случайно-неоднородной атмосфере / В.П. Аксенов, В.А. Банах, В.В. Валуев, В.Е. Зуев, В.В. Морозов, И.Н. Смалихо, Р.Ш. Цык; Под ред. В.А. Банаха. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. – 341 с.; Berry M.V. Wave dislocation reactions in non-paraxial Gaussian beams // J. of Modern Optics. – 1998. – V. 45, № 9. – P. 1845–1858.; Колосов В.В. Линии тока энергии в окрестности дислокаций трёхмерного волнового поля // Оптика атмосферы и океана. – 1996. – Т. 9, № 12. – С. 1631–1638.

тийно-терминологической базы. Соотнесение понятий чёрного ящика, ДС и модификатора. Разработка принципов математического описания, понятий порядка, параметров порядка и способов управления ими. Построение отношений равносильности и уподобления систем, эволюций, функций, потоков, а также признаков их (не)сходства. Определение градаций подобия пар функций, потоков, передаточных характеристик и пар именных форм, а также нахождение условий (не)сходства ДС и преобразователей. Составление сценариев диверсификации ДС через смену нелинейности её подсистемы. Совершенствование алгоритмов восстановления фазы поля из гартманнограм, идентификации вихрей. Разработка принципов: детектирования вихрей, связи на его основе, расчёта вероятности ошибки передачи данных – и моделирование их действия. Разработка компьютерных программ как средств численного моделирования и визуализации. Разработка и создание макетов радио-электронных устройств для проверки теоретических выводов.

Методы исследования: методы теории колебаний и волн, бифуркаций; методы теории устойчивости Ляпунова; подходы и понятия, принятые в общей теории систем, теории множеств, математической логике, нелинейной и сингулярной оптике, топологии, криптологии; метод усреднения (осреднения) по периоду быстрых осцилляций; методы численного решения систем нелинейных алгебраических уравнений и дифференциальных уравнений в частных производных; техника вычислительного и радиофизического эксперимента (включая приёмы статистической обработки данных).

Кроме того, для решения поставленных задач предложены и применены: аксиоматическая схема исследования систем и относящийся к ней категориальный аппарат; способы управления порядком (включая вид нелинейности) и его параметрами, сценарии диверсификации ДС; критерии и приёмы упорядочивания и растожествления ДС, их экземпляров, эволюций, преобразователей потоков, признаки и условия их (не)сходства.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

I.1. Любой порядок (и его параметры) формализуем отождествлением его с некоторой именной формой (и переменными в ней).

I.2. Существует аксиоматическая схема исследования систем, где:

– любая система представима «наблюдателем» в виде пространственной конфигурации «условного потока», его «модификатора» и «аккумулятора», причём аккумулятор и некоторые модификаторы составляют в ней два семейства чёрных ящиков (в смысле Эшби): «снаружи» и «внутри» системы;

– постулируется корректность такого представления всех известных естественных и искусственных (физических, химических, эко-, био-, социальных, знаковых) систем;

– любое (естественно)научное положение есть (найденная «наблюдателем второго уровня») «передаточная характеристика наблюдателя первого уровня», например автора передаточной характеристики модификатора. Любая формулировка достоверности, новизны научной ценности и / или практической значимости полученного положения есть результат обсервации «наблюдателем третьего уровня» первых двух;

– эволюция (динамической) системы **Ds** невозможна – в противоположность эволюции в системе и подсистеме. Закон эволюции подсистемы $Ds_{sub2} \in Ds$ (например, нелинейная передаточная характеристика) есть динамическая переменная системы **Ds**, когда он изменяется медленно и / или редко (под действием $Ds_{sub1} \in Ds$) по сравнению с самой эволюцией в Ds_{sub2} (т.е. настолько, что эволюция в Ds_{sub2} состоит из отрезков, на каждом из которых её динамика обладает всеми основными свойствами динамики в некой системе Ds_{sub2}' (с неизменным оператором эволюции)). Такая эволюция подсистемы Ds_{sub2} (как указанное изменение закона эволюции в Ds_{sub2}) самоуправяема, если Ds_{sub2} действует на себя посредством Ds_{sub1} .

Здесь условный поток и модификатор – образы изменчивого и неизменного начал в комплексе «экспериментов», выделенных «наблюдателем», а аккумулятор – компонент системы, способный попеременно являться то воображаемым началом, то воображаемым окончанием условного потока.

(Тезисы в I.2. иллюстрируют рис. 1 и 2, в.)

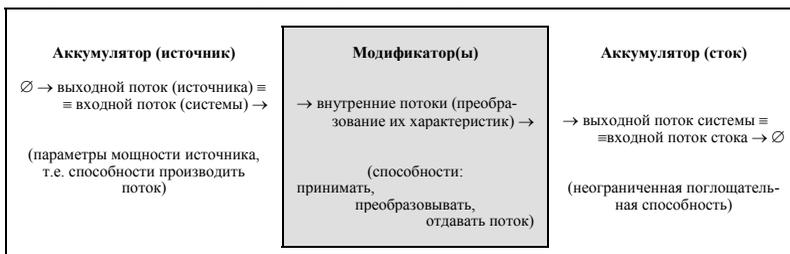


Рис. 1. Система в контексте аксиоматической схемы исследований. Символ пустого множества \emptyset обозначает «ничто». Аккумуляторы образуют границы системы

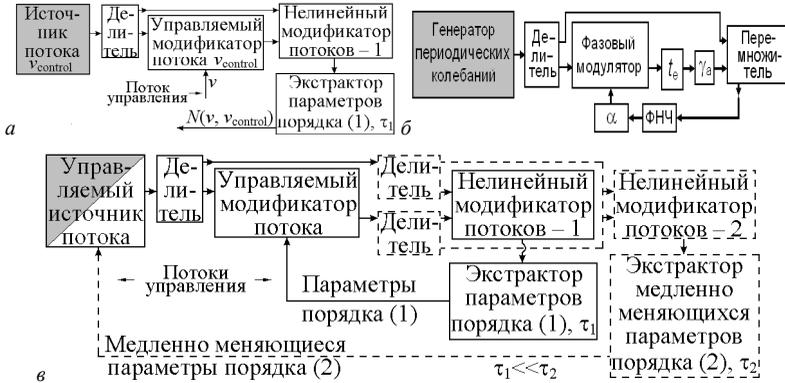


Рис. 2. Структурная схема: нелинейного элемента с нелинейностью $N(v)$, управляемого потоком v_{control} (а); примера радиоэлектронной ДС с управляемой нелинейностью (б) и ДС с самоуправляемой (в) нелинейностью. Фазовый модулятор вкпе с «крупномасштабной» линией задержки t_c и аттенуатором γ_a , перемножитель, ФНЧ вкпе с аттенуатором α выполняют функции гспр. управляемого модификатора входного потока, нелинейного элемента, экстрактора параметров порядка

П.1. Множество всех подмножеств $A \equiv \{\mathbf{D}s_i(\mathbf{p}_i(\mathbf{D}_{x_{p_i}}))\}_{\text{sub}}$ множества экземпляров (с номерами i) всевозможных динамических систем $\mathbf{D}s$ двояко частично «параупорядочиваемо»⁷, если за аналоги « \leq_F » и « \geq_F » отношений *не больше* и *не меньше* (« \leq » и « \geq ») принять условия определённости всюду и сюръективности⁸ бинарного отношения, которое:

– есть соотношение равносильности \mathbf{F} эволюций – отношение между двумя множествами $A_{\text{сип}dj}$ экземпляров (соответствующими двум сравниваемым $A_j, j \in \{1, 2\}$): эволюций $U_{ji}(\mathbf{D}_{x_{U_{ji}}})$, начальных условий $U_{ji}(\mathbf{D}_{x_{U_{ji}}}(t_{j i_0}))$, параметров $\mathbf{p}_i(\mathbf{D}_{x_{p_i}})$ динамических систем – вместе с их областями определения $\mathbf{D}_{x_{U_{ji}}}$ и $\mathbf{D}_{x_{p_i}}$;

⁷ Неологизм «парапорядок» и другие с приставкой пара- введены по необходимости: чтобы отразить отличие от привычных терминов. Так, по традиции отношение порядка: а) рефлексивно ($A_1 \leq A_1$), б) транзитивно ($A_1 \leq A_2 \leq A_3 \Rightarrow A_1 \leq A_3$), в) антисимметрично ($A_1 \leq A_2 \leq A_1 \Rightarrow A_1 = A_2$). Строгий же порядок есть ($A_1 < A_2 \equiv (A_1 \leq A_2) \wedge \text{ne}(A_1 = A_2)$), т.е. он обладает свойством б и в': ($A_1 < A_2$) и ($A_2 < A_1$) \equiv ложь. При этом отношение эквивалентности « \equiv » предполагается первичным по отношению к « \leq » и « $<$ ». А у нас первично отношение \mathbf{F} и утверждение п. 1, на основе которых постулируются в п. 3 отношения «параэквивалентности».

⁸ Бинарное отношение R между множествами A и B сюръективно, если R -образ A есть всё B ($\text{Im } R = B$), оно всюду определено, если прообраз B относительно R есть всё A ($\text{Dom } R = A$).

– в общем случае не являющееся симметричным и не транзитивное, следовательно, не рефлексивное, (а потому не есть обычное «=»).

(Здесь индекс i – «свой» для каждого j – обеспечивает различие экземпляров, а вовсе не означает счётности множества экземпляров всех ДС.)

II.2. Эти отношения *не больше и не меньше* (« \leq_F » и « \geq_F ») есть отношения включения между множествами $A_{\text{сипd}j}$ (соответствующих подмножествам A_j), устанавливаемые посредством «сравнения» пар экземпляров эволюций и др. с помощью соотношения **F**. И отношения « \leq_F » и « \geq_F » в общем случае не рефлексивны, не транзитивны.

II.3. На базе отношений *не больше и / или не меньше* (« \leq_F » и « \geq_F ») формируемы не транзитивные (в общем случае) отношения равносильности подмножеств A_j («параэквивалентности»): одно (в общем случае) не являющееся симметричным (« $=_F$ ») и три симметричных (« $\leq_F \geq$ », « $=_F =$ », « $\geq_F \leq$ »)

$$(A_1 =_F A_2) \equiv (A_1 \leq_F A_2) \text{ и } (A_1 \geq_F A_2), \quad (A_1 \leq_F \geq A_2) \equiv (A_1 \leq_F A_2) \text{ и } (A_2 \leq_F A_1), \\ (A_1 =_F = A_2) \equiv (A_1 =_F A_2) \text{ и } (A_2 =_F A_1), \quad (A_1 \geq_F \leq A_2) \equiv (A_1 \geq_F A_2) \text{ и } (A_2 \geq_F A_1).$$

Свойство антисимметричности для отношений « \leq_F » и « \geq_F » гарантировано существует лишь в смысле введённых отношений «параэквивалентности» « $\leq_F \geq$ » и « $\geq_F \leq$ » (существует по определению этих « $\leq_F \geq$ » и « $\geq_F \leq$ »), т.е. это «параантисимметричность». (В смысле же некоторого иного отношения (пара)эквивалентности свойство антисимметричности может отсутствовать.) Аналогичное утверждение справедливо по отношению к « $=_F$ » и « $=_F =$ ».

II.4. Если **F** транзитивно, то транзитивны отношения частичного «парапорядка» (« \leq_F », « \geq_F »), а потому – и все четыре «параэквивалентности» (« $=_F$ », « $\leq_F \geq$ », « $=_F =$ », « $\geq_F \leq$ »). При этом симметричные отношения « $\leq_F \geq$ », « $=_F =$ », « $\geq_F \leq$ » есть различные эквивалентности, а отношения « \leq_F », « \geq_F » есть отношения частичного (в общем случае – «не рефлексивного») порядка.

II.5. Если **F** симметрично, то все четыре «параэквивалентности» (« $=_F$ », « $\leq_F \geq$ », « $=_F =$ », « $\geq_F \leq$ ») неотличимы, а отношения « \leq_F », « \geq_F » – дуальны друг другу в смысле изоморфизма между множествами пар экземпляров, заключающегося в перестановке экземпляров в паре

$$(A_1 =_F A_2) \Leftrightarrow (A_1 \leq_F \geq A_2) \Leftrightarrow (A_1 =_F = A_2) \Leftrightarrow (A_1 \geq_F \leq A_2), \\ (A_1 \leq_F A_2) \Leftrightarrow (A_2 \geq_F A_1).$$

II.6. На базе п. 1 и 3 определимы три пары («<_F», «>_F»; «<_F⁰», «>_F⁰»; «<_F²», «>_F²») отношений строгого частичного парапорядка
 $(A_1 <_F A_2) \equiv (A_1 \leq_F A_2)$ и $\text{не}(A_1 =_F A_2)$, $(A_1 >_F A_2) \equiv (A_1 \geq_F A_2)$ и $\text{не}(A_1 =_F A_2)$;
 $(A_1 <_F^0 A_2) \equiv (A_1 \leq_F A_2)$ и $\text{не}(A_2 \leq_F \geq A_1)$,
 $(A_1 >_F^0 A_2) \equiv (A_1 \geq_F A_2)$ и $\text{не}(A_2 \geq_F \leq A_1)$;
 $(A_1 <_F^2 A_2) \equiv (A_1 \leq_F A_2)$ и $\text{не}(A_1 =_F A_2)$, $(A_1 >_F^2 A_2) \equiv (A_1 \geq_F A_2)$ и
 $\text{не}(A_1 =_F A_2)$.

III.1. Необходимым условием того, что для ограничения $\mathbf{P}(\mathfrak{E}_2', \mathfrak{E}_2'', \mathfrak{E}_2''', \mathfrak{E}_1', \mathfrak{E}_1'', \mathfrak{E}_1''', \mathbf{f}_2(\mathfrak{E}_2', \mathfrak{E}_2'', \mathfrak{E}_2'''), \mathbf{f}_1(\mathfrak{E}_1', \mathfrak{E}_1'', \mathfrak{E}_1'''))=0$ функция $\mathbf{f}_1(\mathfrak{E}_1', \mathfrak{E}_1'', \mathfrak{E}_1''')$ в точке \mathfrak{E}_1''' по аргументу \mathfrak{E}_1' всюду на $\{\mathfrak{E}_1'''\}$ *уподобляема* функции $\mathbf{f}_2(\mathfrak{E}_2', \mathfrak{E}_2'', \mathfrak{E}_2''')$ в точке \mathfrak{E}_2''' на $\{\mathfrak{E}_2'''\}$, т.е. что

$$\mathbf{f}_1(\mathfrak{E}_1', \{\mathfrak{E}_1'''\}, \mathfrak{E}_1'''=C) \leq_{L_P} \mathbf{f}_2(\mathfrak{E}_2', \{\mathfrak{E}_2'''\}, \mathfrak{E}_2'''=C),$$

является их представимость в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_1(\mathfrak{E}_1', \mathfrak{E}_1'', \mathfrak{E}_1''') &= \mathbf{L}_{\mathbf{f}_{13-\mathfrak{E}_1''}}[\mathbf{f}_3(\mathbf{L}_{\mathfrak{E}_{31'}-\mathfrak{E}_1''}[\mathfrak{E}_1'], \mathfrak{E}_{31}''(\mathfrak{E}_1''), \mathfrak{E}_{31}''')], \\ \mathbf{f}_2(\mathfrak{E}_2', \mathfrak{E}_2'', \mathfrak{E}_2''') &= \mathbf{L}_{\mathbf{f}_{23-\mathfrak{E}_2''}}[\mathbf{f}_3(\mathbf{L}_{\mathfrak{E}_{32'}-\mathfrak{E}_2''}[\mathfrak{E}_2'], \mathfrak{E}_{32}''(\mathfrak{E}_2''), \mathfrak{E}_{32}''')], \end{aligned} \quad (0.1)$$

где

– $\mathbf{L}_{\mathbf{f}_{13-\mathfrak{E}_1''}}$, $\mathbf{L}_{\mathfrak{E}_{31'}-\mathfrak{E}_1''}$ – неоднородные линейные преобразования (коэффициенты в них могут зависеть от \mathfrak{E}_i'');

– $\mathfrak{E}_{3i}''(\mathfrak{E}_i'')$ – некоторые функции; вид функций $\mathfrak{E}_{3i}''(\mathfrak{E}_i'')$, $\mathbf{L}_{\mathbf{f}_{13-\mathfrak{E}_1''}}$, $\mathbf{L}_{\mathfrak{E}_{31'}-\mathfrak{E}_1''}$ может зависеть от констант \mathfrak{E}_i''' ;

– фигурные скобки (по традиции) обозначают множество допустимых значений соответствующего аргумента, константа C лишь «помечает» аргументы, задающие «точки уподобления» функций, а не требует $\mathfrak{E}_1''' = \mathfrak{E}_2'''$;

– указанное уподобление « \leq_{L_P} », согласно введённому *определению*, имеет место, если

$$\mathfrak{E}_1''' \text{ и } \mathfrak{E}_2''': \forall \mathfrak{E}_1'' \in \{\mathfrak{E}_1'''\} \exists \mathfrak{E}_2'' \in \{\mathfrak{E}_2'''\},$$

\exists неоднородные линейные преобразования $\mathbf{L}_{\mathfrak{E}_2'}$, $\mathbf{L}_{\mathfrak{E}_1'}$:

$$\forall \mathfrak{E}_1' \in \{\mathfrak{E}_1'''\} \text{ верно: } \mathbf{f}_1(\mathfrak{E}_1', \mathfrak{E}_1'', \mathfrak{E}_1''') = \mathbf{L}_{\mathfrak{E}_1'}[\mathbf{f}_2(\mathfrak{E}_2', \mathfrak{E}_2'', \mathfrak{E}_2''')], \mathfrak{E}_2' = \mathbf{L}_{\mathfrak{E}_2'}[\mathfrak{E}_1']$$

$$\text{и } \mathbf{P}(\mathfrak{E}_1', \mathfrak{E}_1'', \mathfrak{E}_1''', \mathbf{f}_1(\mathfrak{E}_1', \mathfrak{E}_1'', \mathfrak{E}_1'''), \mathfrak{E}_2', \mathfrak{E}_2'', \mathfrak{E}_2''', \mathbf{f}_2(\mathfrak{E}_2', \mathfrak{E}_2'', \mathfrak{E}_2''')) = 0. \quad (0.2)$$

III.2. Необходимым условием того, что функция f_1 уподобляется f_2 при *отсутствии* ограничения $P(\dots)=0$, т.е., что $f_1(\Xi_1', \{\Xi_1''\}, \Xi_1'''=C) \leq_L f_2(\Xi_2', \{\Xi_2''\}, \Xi_2'''=C)$, является III.1. Достаточным же условием служит выполнение III.1 и наличие у функций Ξ_{32}'' , $L_{\Xi_{32}'\Xi_2''}$, $L_{f_{23}\Xi_2''}$ в (0.1) обратных им функций: $\Xi_{32}''^{-1}$, $L_{\Xi_{32}'\Xi_2''}^{-1}$, $L_{f_{23}\Xi_2''}^{-1}$ (или хотя бы левых обратных $\Xi_{32}''^{-1}$, $L_{\Xi_{32}'\Xi_2''}^{-1}$ и правой $L_{f_{23}\Xi_2''}^{-1}$).

III.3. Условия, аналогичные п. III.1 и III.2, справедливы для восьми отношений: « \geq_{LP} », « \leq_{LP} », « $=_{LP}$ », « $=_{LP}$ », « \geq_L », « \leq_L », « $=_L$ », « $=_L$ ».

IV. Две динамические системы Ds_i , построенные из модификаторов M_i и $M_{eq\ i}$ ($M_{eq\ i}$ – единичные (тождественные) преобразователи, замыкающие обратные связи в Ds_i), (не)сходны ((не) $(Ds_1 \leq_L \geq Ds_2)$), только если (не)сходны преобразователи $M_i' \equiv M_i$ ((не) $(M_1' \leq_{LP} \geq M_2')$) условного потока $U_{in\ i}$ в поток $f_{out\ i}$ под управлением потока $f_{c\ i}$ для ограничения P' : $U_{in\ i}$ – копия динамической переменной (эволюции) U_i в системе Ds_i , возникающей под действием потока $f_{in\ i}$ – копии $f_{c\ i}$ ($f_{in\ i} = f_{c\ i}$).

Здесь в духе защищаемых положений II и III:

– две динамические системы, по определению, сходны $(Ds_1 \leq_L \geq Ds_2)$, если их эволюции U_i симметрично уподобляются по пространственно-временным аргументам $x_i = (x_i, y_i, z_i, t_i)$ всюду на областях своих определений $x_i \in D_{x\ U_i}$ и на областях значений своих параметров $\{p_i(D_{x\ p_i})\}$: $U_1(x_1, \{p_1(D_{x\ p_1})\}) \leq_L \geq U_2(x_2, \{p_2(D_{x\ p_2})\})$;

– преобразователи же сходны $(M_1' \leq_{LP} \geq M_2')$, если их выходные потоки $f_{out\ i}$, $f_{out\ j}$ симметрично уподобляются по x_i всюду на $x_i \in D_{x\ f_i}$ и на областях значений $\{\Pi_{M_i}\}$ своих параметров Π_{M_i} для ограничения P , состоящего в уподобляемости преобразуемого потока $U_{in\ i}$ (по x_i всюду на $x_i \in D_{x\ U_{in\ i}}$ и на $\{\Pi_{U_{in\ i}}\}$ параметров $\Pi_{U_{in\ i}}$) одной системы потоку $U_{in\ j}$ другой:

$f_{out\ i}(x_{i_s}, \{U_{in\ i}(x_{i_s}, \Pi_{U_{in\ i}}), \Pi_{M_i}\}) \leq_{LP} f_{out\ j}(x_j, \{U_{in\ j}(x_j, \Pi_{U_{in\ j}}), \Pi_{M_j}\})$,
 $P: U_{in\ i}(x_{in\ i}, \Pi_{U_{in\ i}}=C) \leq_L U_{in\ j}(x_{in\ j}, \Pi_{U_{in\ j}}=C)$, $(i, j) \in \{(1, 2), (1, 2)\}$. В этих определениях точки уподобления отсутствуют.

V. Существуют динамические подсистемы с идентичной конструкцией, но с несходной эволюцией в них и различной формой её операторов, зависящими от формы и /или значений параметров и /или величин внешних потоков подсистем. Причём несходство

эволюций несводимо к различиям входных потоков (т.е. внутренние потоки подсистем несходны «лакунарно» по своей части, идентичной входному).

Передаточная характеристика любого модификатора относительно характеристик потоков реализуема как передаточная характеристика составного модификатора относительно характеристик потоков по части его входов $\mathbf{f}_3(\mathbf{x})$ и выходов $\mathbf{f}_2(\mathbf{x})$. Последний есть комбинация модулятора параметров порядка части выходного (либо входного $\mathbf{f}_1(\mathbf{x})$) потока, модификатора потока, экстрактора параметров порядка либо модификатора выборки-хранения данных о характеристиках потока. Модулятор может отсутствовать, если имеется модификатор выборки-хранения. Здесь $\mathbf{x}=(x, y, z, t)$ – пространственно-временной аргумент.

Вид указанной части $\mathbf{f}_2(\mathbf{x})=\mathbf{N}_{\mathbf{f}_1}(\mathbf{f}_3(\mathbf{x}))$ передаточной характеристики составного модификатора в общем случае есть функция формы $\mathbf{F}_{\mathbf{f}_1}$ и / или параметров $\mathbf{\Pi}_1$ некоторой части \mathbf{f}_1 входного потока. В частности, существуют:

- виды оптических полей $\mathbf{E}_{in}(x, y, t)$ (например, пространственно-временных законов изменения комплексных амплитуд оптических частотных составляющих бихроматического поля) на входе интерферометра Рождественского;

- вариант расположенных в одном из его плеч управляемых устройств крупномасштабного преобразования G светового поля в поперечной плоскости xOy пучка (например, сдвиг, отражение, сжатие, поворот) и сдвига фазы $\varphi(x, y)$;

- параметры фотоприёмника, регистрирующего выходное излучение интерферометра по всей поперечной плоскости пучка либо из выбранной её части, –

такие, что видом передаточной характеристики «часть параметров устройств G , $\varphi(x, y)$ и поля $\mathbf{E}_{in}(x, y, t)$ – выходной сигнал фотоприёмника» управляет вид $\mathbf{E}_{in}(x, y, t)$ и остальные параметры.

Для анизоморфного изменения вида передаточной характеристики $\mathbf{N}_{\mathbf{f}_1}(\mathbf{f}_3(\mathbf{x}))$ подсистемы \mathbf{Ds}_N в некой \mathbf{Ds} достаточно, чтобы при неизменных значениях части $\mathbf{f}_3(\mathbf{x})$ динамических переменных \mathbf{U} системы \mathbf{Ds} , параметров $\mathbf{\Pi}_1$, формы $\mathbf{F}_{\mathbf{f}_1}$ и / или характеристик потока \mathbf{f}_1 :

- подсистема \mathbf{Ds}_N , становясь системой, функционировала в статическом режиме;

- хотя бы часть компонент векторов $\mathbf{f}_3(\mathbf{x})$, а также $\mathbf{\Pi}_1$ и / или $\mathbf{F}_{\mathbf{f}_1}$ и / или характеристик \mathbf{f}_1 вошла в число бифуркационных параметров

Ds_N ;

– изменение потока f_1 (т.е. Π_1 и / или F_{r_1} и / или характеристики f_1), вызывало в Ds_N бифуркацию статических состояний её хотя бы при одном значении $f_3(x)$.

(Часть положения \mathbf{V} иллюстрирует рис. 2, а и б.)

VI.1. Порядок винтовой дислокации волнового фронта V_d из отрезка $[V_{d \min}, V_{d \min} + \delta V_d - 1]$ распознаваем (с помощью пороговых устройств, элементов «не», «и») по образующим дискретный ряд значениям $I_r(V_d) = 1 + \cos[2\pi M V_d / m + \varphi]$ относительной интенсивности $I_r \equiv I_\Sigma / I$ интерференционного поля на выходе интерферометра Рождественского, одно из плеч которого содержит устройство поворота светового поля в поперечной плоскости пучка на угол $\Delta = 2\pi M / m$ и сдвига фазы φ . Здесь $V_{d \min}$, δV_d , M , m – целые числа ($V_{d \min}$, δV_d заданы а priori, M и m – взаимно простые, $m \geq \delta V_d$); I , I_Σ – интенсивность входного и выходного поля; значение φ такое, что $I_r(V_d) \neq I_r(V_d')$ при $V_d \neq V_d'$ и $V_d, V_d' \in [1, m]$; центр вихревого пучка совпадает с оптической осью интерферометра ($S_{hx} = 0$).

При отсутствии ограничения $V_d \in [V_{d \min}, V_{d \min} + \delta V_d - 1]$ порядок V_d находим с точностью до $j m$, где j – произвольное целое.

VI.1', или *обобщение VI.1.* Порядок $V_d \in [V_{d \min}, V_{d \min} + \delta V_d - 1]$ находим по N значениям относительной интенсивности $I_r(V_d, l) = 1 + \cos[2\pi M_l V_d / m_l + \varphi_l]$, получаемым от любой совокупности из N интерферометров Рождественского с m_1, m_2, \dots, m_N такими, что числа m_l попарно взаимно просты, их произведение $m_1 \cdot m_2 \cdot \dots \cdot m_N \equiv \Pi \geq \delta V_d$. Он находим (с помощью пороговых и арифметико-логических устройств) как решение системы из ограничения $V_d \in [V_{d \min}, V_{d \min} + \delta V_d - 1]$ и N пар уравнений $V_{d,l} + i_l \cdot m_l = V_d$, $I_r(V_{d,l}, l) = I_r(V_d, l)$ относительно V_d и N целых чисел i_l . Здесь целое $l \in [1, N]$, $V_{d \min}$, δV_d – заданы а priori.

VI.2. Величина относительной интенсивности I_r интерференционного поля на выходе детектора вихря на основе интерферометра Рождественского инвариантна относительно расстояния в линейной однородной и изотропной (в поперечной плоскости светового пучка) среде между источником поля и детектором.

Если на пути пучка имеются тонкие экраны: «вихревой», сдвигающий фазу на величину $V_d \cdot \arg(\mathbf{r})$, и совмещённый с ним амплитудно-фазовый, то

– для порядков V_d , отличающихся на $\delta V_d = n \cdot m$, значения $I_r(V_d)$ равны ($I_r(V_d) = I_r(V_d + \delta V_d)$);

– у детекторов с $M=1$ и чётным m для порядков V_d , отличающихся на $\delta V_d = m(n+0,5)$, полусумма значений $I_r(V_d)$ и $I_r(V_d + \delta V_d)$ равна единице.

Здесь $r=0$ задаёт оптическую ось детектора, n – любое целое.

Фазовый аддитивный и амплитудный мультипликативный белый шум с амплитудами A_{nS} , A_{nA} уменьшают отличия $|I_r(V_d') - I_r(V_d)|$ значений относительной интенсивности интерференционного поля в детекторе по законам $[\sin(A_{nS})/A_{nS}]^2$ и $(1 + A_{nA}^2/3)^{-1}$.

VI.3. В отсутствие помех величина I_r с ростом удаления S_h вихря от оптической оси детектора осциллирует вокруг единицы, затухая, либо равна 1 (в зависимости от V_d , m , M). Величина S_h находима по значению I_r с точностью до участка монотонности на осциллирующей зависимости $I_r(S_h)$.

Идентификация V_d по единственной реализации корректна с достоверностью не хуже 99,5% при однократном искажении пучка фазовым экраном (имитирующим воздействие турбулентности с внешним $M_{\text{outer}} = 5r_{\text{OP}}$ и внутренним $M_{\text{inner}} = 0,156r_{\text{OP}}$ масштабам), разъюстировке оптических осей приёмника и источника в его плоскости $S_h = 0,11r_{\text{OP}}$, если радиус Фрида $L_F > 0,22r_{\text{OP}} \dots 0,71r_{\text{OP}}$ (в зависимости от величин $V_d \in [-3, 3]$ и $\Delta \in \{120^\circ, 180^\circ\}$). Здесь r_{OP} – радиус гауссова пучка в выражении $I(\mathbf{r}) = C \exp(-r^2/r_{\text{OP}}^2)$. Идентификация V_d по сотне реализаций достоверна при $L_F \geq 0,06r_{\text{OP}}$. С ростом M_{outer} и S_h вероятность корректного распознавания V_d падает.

VII.1. Если в системе связи цифровые данные кодируются величиной $V_d \in \{V_{d0}, V_{d1}\}$ (либо комбинацией этих величин, либо законом изменения V_d), и имеются: детектор вихрей на базе интерферометра Рождественского, датчик волнового фронта (в сочетании с релевантными алгоритмами), компаратор снимаемых с них сигналов, корректор волнового фронта, управляемый компаратором, – то скорость передачи данных (с учётом коррекции ошибок) в ней выше, чем в системе без детектора либо датчика.

VII.2. Если: 1) сигнал $I_r(t)$ на входе порогового устройства детектора вихря изменяется из-за передачи данных много быстрее, чем из-за турбулентности, 2) шумы (например, фотоприёмника), накладывающиеся на $I_r(t)$, лежат в том же диапазоне высоких частот, 3) появление логического «0» и «1» равновероятно, 4) порог $I_{r\text{th}}(t)$ при декодировании изменяется много медленнее, чем $I_r(t)$ из-за передачи данных, то «мгновенные» вероятности ошибки передачи $P_{\text{er abs}}(t)$ и $P_{\text{er dif}}(t)$ двоичных данных при кодировании символа значением V_d и при кодировании «0» (или «1») отсутствием либо нали-

чем смены значения V_d связаны соотношением

$$P_{\text{er dif}}(t) = 2[1 - P_{\text{er abs}}(t)]P_{\text{er abs}}(t)$$

независимо от того, постоянен порог $I_{\text{r th}}(t)$ или адаптивен: $I_{\text{r th}}(t) \approx 0,5[I_{\text{r 0}}(t) + I_{\text{r 1}}(t)]$, где $I_{\text{r 0}}(t)$, $I_{\text{r 1}}(t)$ – значения $I_{\text{r}}(t)$, соответствующие $V_{d 0}$, $V_{d 1}$.

Если шум фотоприёмника белый (с амплитудой δ), то средние по времени вероятности $P_{\text{er dif}} = P_{\text{er abs}} = P_{\text{er dif adp}} = P_{\text{er abs adp}} \rightarrow 0,5$ при $\delta \rightarrow \infty$, где индекс «адп» обозначает адаптивный порог.

При $\delta = 0$ справедливы неравенства: 1) $P_{\text{er abs}} \geq 0$, $P_{\text{er abs adp}} \geq 0$ ($P_{\text{er abs}} = 0$, $P_{\text{er abs adp}} = 0$, когда влияние турбулентности не нарушает неравенств $I_{\text{r 0}}(t) < I_{\text{r th}}(t) < I_{\text{r 1}}(t)$); 2) $P_{\text{er dif}} \leq P_{\text{er abs}}$ и $P_{\text{er dif adp}} \leq P_{\text{er abs adp}}$ ($P_{\text{er dif adp}} = 0$ при $L_F \neq 0$). Свойство 2) как правило сохраняется и при $0 \leq \delta < \infty$: дифференциальные алгоритмы уменьшают вероятность ошибки передачи данных по сравнению с вероятностью ошибки распознавания V_d .

С уменьшением радиуса Фрида L_F плотность вероятности $\rho(I_{\text{r 0}}, I_{\text{r 1}})$ стремится к гауссоиду, сосредоточиваясь около точки (1, 1). Влияние роста разьюстировки S_{hx} и внешнего масштаба турбулентности M_{outer} на $\rho(I_{\text{r 0}}, I_{\text{r 1}})$ сходно с влиянием уменьшения L_F . Если плотность вероятности $\rho(I_{\text{r 0}}, I_{\text{r 1}})$ симметрична относительно главной диагонали $I_{\text{r 0}} = I_{\text{r 1}}$, то $P_{\text{er abs}} = P_{\text{er abs adp}} = 0,5$ и шум фотоприёмника ($\delta \neq 0$) не влияет на значение $P_{\text{er abs}}$. Если плотность вероятности $\rho(I_{\text{r 0}}, I_{\text{r 1}}) < \infty$ обладает поворотной осью симметрии 4-го порядка, проходящей через точку (1, 1), то при стремлении δ от 0 к ∞ вероятность $P_{\text{er dif}}$ приближается от 0,25 к 0,5 тем быстрее, чем компактнее плотность $\rho(I_{\text{r 0}}, I_{\text{r 1}})$ сосредоточена у точки (1, 1). Вне зависимости от симметрии $\rho(I_{\text{r 0}}, I_{\text{r 1}})$ сказанное справедливо для величины $P_{\text{er dif adp}}$, но растущей от 0, и $(P_{\text{er dif}} - P_{\text{er dif adp}}) / P_{\text{er dif}} \in [0, 1]$.

VIII. В задачах реконструкции и сшивки (unwrapping) фазы светового пучка из её градиентов, когда последние могут превышать величину π радиан на ячейку расчётной сетки: близость параметра Штреля к единице является лишь необходимым, но не достаточным критерием качества восстановления фазы; для корректной сшивки и восстановления фазы необходимо совместить процедуры её восстановления и сшивки в едином алгоритме.

Такой алгоритм, сшивающий потенциальную часть фазы, реализуем на базе алгоритмов, подобных алгоритму Фрида, доопределением операции получения аргумента φ_{Σ} числа z_{Σ} при сложении

$z_{\Sigma} = \sum z_j$ комплексных чисел $z_j = a_j \exp(i\varphi_j)$:
 $\varphi_{\Sigma} \equiv \arg(\sum z_j) + 2\pi \cdot \text{round}\{[\sum a_j \cdot \text{round}(\varphi_j / (2\pi))] / (\sum a_j)\}$. Здесь $\text{round}()$ – операция округления, $\arg(\sum z_j) \in [-\pi, \pi)$, $a_j > 0$.

Исключение из алгоритма Фрида операции нормировки фазоров дополняет взвешивание данных измерений градиентов фазы $\nabla_{\perp} S(\mathbf{r})$ в соответствии с отличием $\oint_L \nabla_{\perp} S(\mathbf{r}) d\mathbf{l}$ от значения $2\pi n$ для конкретного измерения $\nabla_{\perp} S(\mathbf{r})$.

IX. Если алгоритм A восстановления фазы S пучка идеален в смысле $A(\nabla_{\perp} S) = S$, – то он линеен: $A(c_1 \nabla_{\perp} S_1 + c_2 \nabla_{\perp} S_2) \equiv c_1 A(\nabla_{\perp} S_1) + c_2 A(\nabla_{\perp} S_2)$, где $S \equiv S(\mathbf{r})$, $\mathbf{r} \equiv (x, y)$ – координата поперечной плоскости пучка, $\nabla_{\perp} \equiv \mathbf{e}_x \partial / \partial x + \mathbf{e}_y \partial / \partial y$.

При воздействии аддитивных $\nabla_{\perp} S_n(\mathbf{r})$ и мультипликативных $c_0(\mathbf{r})$ шумов на проекцию градиента $\nabla_{\perp} S_0(\mathbf{r})$ фазы пучка $(\nabla_{\perp} S_{\Sigma}(\mathbf{r}) = c_0(\mathbf{r}) \nabla_{\perp} S_0(\mathbf{r}) + \nabla_{\perp} S_n(\mathbf{r}))$ критерий качества работы неидеального алгоритма A восстановления фазы – степень близости параметра Штреля (для фаз) $Sh(A(\nabla_{\perp} S_{\Sigma}(\mathbf{r})), S_0(\mathbf{r}))$ к величине $|\langle \exp\{i[(c_0(\mathbf{r}) - 1) S_0(\mathbf{r}) + S_n(\mathbf{r})]\} \rangle_{\mathbf{r}}|^2$.

Если алгоритм близок к идеальному ($A(\nabla_{\perp} S) \approx S$), и мультипликативный шум отсутствует ($c_0(\mathbf{r}) = 1$), то параметр Штреля $Sh(A(\nabla_{\perp} S_{\Sigma}(\mathbf{r})), S_0(\mathbf{r}))$ не зависит от вида и величины нешумового градиента фазы $\nabla_{\perp} S_0(\mathbf{r})$. Если же нет аддитивного шума ($S_n(\mathbf{r}) = 0$), то параметр Штреля тем меньше, чем сильнее отличие фазового фронта $S_0(\mathbf{r})$ от плоского.

Если параметр Штреля Sh используется как критерий близости восстановленного (алгоритмами, подобными алгоритму Фрида) распределения фазы $A(\nabla_{\perp} S_{\Sigma}(\mathbf{r}))$ к незашумлённому распределению $S_0(\mathbf{r})$, а поверхностная плотность оптических вихрей составляет 4–9%, то аддитивный белый шум (датчика волнового фронта) с амплитудой $\pi/12$ радиан на ячейку влияет на величину Sh в 10–20 раз слабее, чем утрата 15% данных измерений $\nabla_{\perp} S_0(\mathbf{r})$. Сама же величина Sh в последнем случае в 2–3 раза меньше, чем в первом.

X. Алгоритм поиска особых точек (с модулем индекса менее двух) векторного поля на плоскости, основанный на вычислении вращения этого поля на замкнутых кривых (границах ячейки расчётной сетки), на отделении сёдел от остальных особых точек по знаку этого вращения и на распознавании узлов, фокусов и центров (по характерной ориентации векторов (либо по собственным значениям λ матрицы линеаризации в их окрестности), будучи применён

- к полю проекций градиента фазы на поперечную плоскость $\nabla_{\perp}S(\mathbf{r})$:
- нечувствителен к величине погрешности, с какой найден модуль вектора $\nabla_{\perp}S(\mathbf{r})$;
 - идентифицирует на рельефе $S(\mathbf{r})$ положения: начала и конца обрывов (положение вихрей), перевалов, экстремальных точек у впадин и возвышенностей;
 - не регистрирует ложных вихрей.

Достоверность защищаемых положений и результатов. Правота положения **I.1** вытекает из логического анализа понятия порядка и его параметров, традиций их употребления, а также понятия именной формы. При некотором наборе условий введённые определения порядка и его параметров приводят к понятию параметра порядка η в теории Ландау (табл. 1 поясняет сказанное). Определения эти также совместимы с представлениями о порядке у Дж. Займана.

Таблица 1. Упорядоченность vs. симметричность как функция уровня наблюдения на примере ферромагнетика (ϕ, θ – углы в сферической системе координат)

Характеристика состояния	Фаза ферромагнетика	Фаза парамагнетика
Микромасштабный уровень наблюдения		
Ориентация магнитных моментов \mathbf{m}_i , идентичных элементарных магнитов	Упорядоченная: все \mathbf{m}_i сонаправлены	Неупорядоченная (хаотичная) ориентация \mathbf{m}_i
Тип симметрии множества \mathbf{m}_i	Трансляционная	Отсутствует
Макромасштабный (статистический) уровень наблюдения		
Плотность вероятности ориентации \mathbf{m}_i : $\rho_m(\phi, \theta) = \langle (\delta(\phi - \phi_0) \delta(\theta - \theta_0)) \cdot \mathbf{m}_i \rangle_{\phi, \theta, i}$; суммарный магнитный момент системы $\mathbf{M}(T) \equiv \langle \mathbf{m}_i \rangle$ ($\eta = \mathbf{M}(T) / \mathbf{M}(0)$)	$\rho_m(\phi, \theta) = \mathbf{m}_i \cdot \delta(\phi - \phi_0) \cdot \delta(\theta - \theta_0)$, т.е. уравнение вектора; $\mathbf{M}(T) \neq 0$ ($\eta = 1$)	$\rho_m(\phi, \theta) = \text{const}$, т.е. уравнение сферы;
Тип симметрии $\rho_m(\phi, \theta)$	Поворотная, C_{∞}	Сферическая
Упорядоченность $\rho_m(\phi_0, \theta_0)$ как геометрического объекта (метафорически)	Анизотропна, «неидеальна» («несферична»)	Изотропна, «идеальна» («сферична»)

* На макроуровне наблюдения за $\rho_m(\phi, \theta)$ для описания двух крайних ситуаций пригодна именная форма (порядок) $\rho_m(\phi, \theta) = \Pi_c + (\Pi_m / |\mathbf{m}_i|) \cdot \delta(\phi - \Pi_{\phi}) \cdot \delta(\theta - \Pi_{\theta})$, где $\Pi = (\Pi_c, \Pi_m, \Pi_{\phi}, \Pi_{\theta})$ – параметры порядка в смысле аксиоматики. И $\eta = \Pi_m$ – особый случай Π .

Корректность положения **I.2** обусловлена: внутренней непротиворечивостью построенной аксиоматической схемы, являющейся обобщением представлений и сюжетов общей физики, теории систем, кибернетики; согласием с известными макросистемными концепциями (e.g. М. Эйген и Г. Шустер, 1982; Е.Н. Князева и С.П. Курдюмов, 1994, 2007; Л.И. Зальцман, 2003; В.И. Аршинов и

В.Г. Буданов, 2004; Г.Л. Зальцман, 2004; Э. Скотт, 2007; В.Г. Буданов, 2007; В. Нилов, 2007; В.А. Эткин, 2008; Г.Л. Ляховицкая, 2008; А.В. Михайлов, 2009); удовлетворением парадигме открытых систем Бергаланфи – Пригожина и принципам описания ДС (А. Пуанкаре, А.А. Андронов, Ю.И. Неймарк, П.С. Ланда, И.И. Блехман, М.И. Рабинович, Д.И. Трубецков с соавторами, С.П. Кузнецова, Н.В. Карлов и Н.А. Кириченко etc.). В частности, справедливость выводов из аксиоматической схемы продемонстрирована на серии примеров.

Правомерность двух последних утверждений в **I.2** обусловлена их выводимостью в рамках аксиоматической схемы; второе к тому же согласуется с выводами Кл. Майнцера об онтогенезе и филогенезе в биологии. Полученные с помощью аксиоматической схемы выводы, представленные e.g. в положениях **II**, **IV**, **V**, физически верны. К совокупности введённых в рамках аксиоматической схемы передаточных характеристик сводятся известные статические и динамические передаточные характеристики.

Идея (частичного) парапорядка и параупорядоченности в положении **II.1**, обоснована в **II.2** её смысловым родством с понятием отношения включения множеств. А это позволяет считать обоснованными отношения паразквивалентности (в **II.4**) и строгого частичного парапорядка (в **II.6**). Остальные утверждения в положениях **II** и **III** получены строгими математическими операциями, в том числе предъявлением показательных примеров. Положение **III** согласуется с более частными утверждениями, дополняя и объясняя их. А идея равносильности неоднократно верифицирована нами на примере нелинейного кольцевого интерферометра и др.

Столь же строго выведено положение **IV** и часть положения **V**. Правда остальной части положения **V** аргументируется положениями **VI.1**, **VI.2**, **VI.3**, содержащими примеры передаточных характеристик. Она доказывается и прецедентами систем – как модельных, так и натуральных – интерпретируемых нами (система Икеды, её модификации и др.), либо разработанных нами (модификации системы Икеды; её радиоэлектронный аналог и его модификация; ДС с нелинейным элементом, работающим по принципу интерферометра Рождественского или Маха–Цендера либо автокоррелятора; радиоэлектронные версии этого элемента и др.). Лабораторные эксперименты с радиоэлектронными макетами некоторых из них (рис. 2, а, б) также доказывают обусловленность вида нелинейности формой входного потока (рис. 3), обнаруживая статические, периодические,

хаотические режимы, включая перемежаемость (рис. 4).

Верифицирующей иллюстрацией к понятиям «поземплирно» (не)линейного преобразователя формы потока, тематически примыкающим к положению **IV**, служит линза.

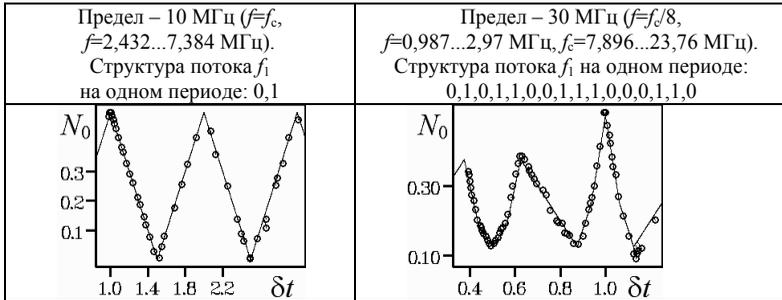


Рис. 3. Сравнение экспериментальной $N_{0e}(\tau/T)$, показанной символом « \circ », и теоретической (линия) зависимости $N_0(\delta t)$ в различных диапазонах тактовых частот f_c , при различной структуре формы потока $f_i \equiv v_{\text{control}}$ на одном его периоде $T=1/f$. Нелинейный элемент построен согласно рис. 2, a , b , но $\delta t \equiv v$, $f_i \equiv v_{\text{control}}$, $\tau_s \equiv t_e$, а $N=N_{0e}$ или N_0

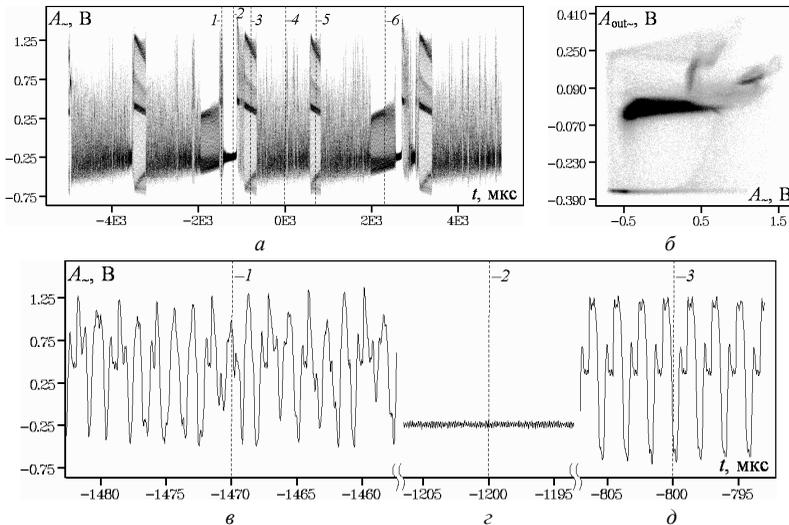


Рис. 4. Перемежаемость в динамике переменной составляющей A_- амплитуды высокочастотного поля в макете модифицированного радиоаналога НКИ. Временная реализация (a), фазовый портрет (b), увеличенные фрагменты временных реализаций на рис. a в окрестностях точек, обозначенных вертикальными пронумерованными пунктирами: 1 (e), 2 (z), 3 (d)

Утверждаемая в результатах, связанных с положениями **IV**, **V**,

роль нелинейных функций в плане диверсификации ДС проверена на примере $(f_{A2}(t)=(f_{A1}(t))^2, f_{B2}(t)=(f_{B1}(t))^3, f_{A2}(t)=(f_{A1}(t))^2, f_{B2}(t)=f_{B1}(t))$. Для положения V верифицирующими аналогами понятий модулятора параметров порядка части в(ы)ходного потока, экстрактора параметров порядка, модификатора выборки-хранения данных о характеристиках потока являются также: модулятор амплитуды или фазы, генератор, управляемый напряжением, пиковый детектор либо линия задержки *gesp*. А для возможности синтеза нелинейной передаточной характеристики такими примерами служат принципы перехода от интегрирования по времени к интегрированию по машинной переменной в АВМ⁹, модификация задачи о сингулярном возмущении¹⁰.

В пользу достоверности положений VI.1, VI.1', VI.2, VIII и большинства утверждений в VII.2, IX, X свидетельствует строгий математический способ их получения.

Перечисленные положения подтверждены вычислительными экспериментами (e.g. рис. 5), что позволяет считать наши компьютерные программы верифицированными. С их помощью получены результаты, которые обобщены в виде положений VI.3 и части утверждений VII.2, последних утверждений в IX и X.

Достоверность положения VII.1 основана на сопоставлении характеристик адаптивных оптических систем (В.П. Лукин, Б.В. Фортес, 1999, Ф.Ю. Канев, В.П. Лукин, 2005) с характеристиками предлагаемого детектора вихрей, полученными аналитически и численным моделированием.

На достоверность положений VII.2. указывает и ряд косвенных доказательств. Так, тезис о влиянии радиуса Фрида L_F на плотность вероятности $\rho(I_{r0}, I_{r1})$ позволяет предположить применимость здесь центральной предельной теоремы теории вероятностей. А утверждения относительно влияния шума фотоприёмника ($\delta \neq 0$) подтверждаются тройко: данными имитационного моделирования (e.g. рис. 6), анализом изменений геометрической формы плотности вероятности ρ для измеренных значений (I_{rm0}, I_{rm1}) , исследованием трансформации весов для неизменной $\rho(I_{r0}, I_{r1})$.

Новизна защищаемых положений и результатов.

1. Сопоставлены категории порядка и именной формы, выявлен

⁹ Тетельбаум И.М., Шнейдер Ю.Р. 400 схем для АВМ – М.: Энергия, 1978. – С. 138–140.

¹⁰ Малинецкий Г.Г. Хаос. Структуры. Вычислительный эксперимент: Введение в нелинейную динамику. – М.: Наука, 1997. – С. 216–217.

их смысловой изоморфизм (2011), – см. положение I.1.

2. Новизна положений I.2, II, III, IV, V и результатов исследования, с ними связанных (2009–2011), обусловлена оригинальностью разработанной аксиоматической схемы исследования систем. Дополнительную новизну фрагменту положения I.2 и положениям II, III, IV, V придаёт опора на авторские идеи порядка (и его параметров) и управления им, равносильности эволюций, отношения парапорядка (и параэквивалентности), уподобляемости, ДС (модификатора) с виртуальной частью.

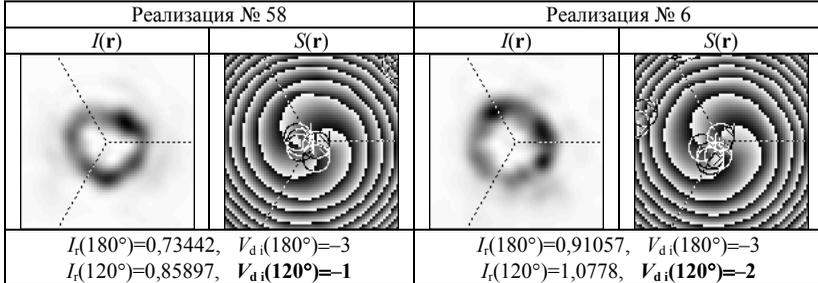


Рис. 5. Рождение дополнительных приосевых пар вихрей: примеры **ложного** (при $\Delta=120^\circ$) и **истинного** (при $\Delta=180^\circ$) распознавания ($V_d=-3, L_r=0,25r_{0P}, M_{outer}=5r_{0P}, L_r=59$ км, $S_h=0,11r_{0P}$)

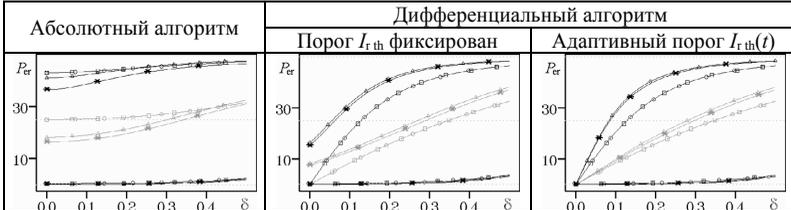


Рис. 6. Зависимость вероятности ошибки передачи данных P_{er} (в %) от амплитуды шума фотоприёмника δ при $M_{outer}=5r_{0P}, S_{lx}=0$. Радиус Фрида L_F/r_{0P} составляет 0,25, 0,1, 0,05 для нижней, средней (серой), верхней группы кривых. Тройки (Δ, V_{d0}, V_{d1}) принимают значения $(180^\circ, -1, 0), (180^\circ, -1, -2), (120^\circ, -1, 1), (120^\circ, -1, -2)$ и помечены символами: «o», «□», «*», «Δ», resp.

3. В концепции парапорядка (положение II) первично отношение равносильности эволюций и два определения частичного парапорядка, на основе которых постулируются отношения параэквивалентности, а эти четыре типа отношений в общем случае не рефлексивны, не транзитивны. В традиционной же схеме определения порядка « \leq » отношение эквивалентности « \equiv » первично по отношению к « \leq », а « \equiv » и « \leq » рефлексивны, транзитивны. Установлена субординация различ-

ных введённых отношений. Установлены отношения между упорядоченностью ДС и упорядоченностью их экземпляров. В рамках физического подобия развиваемый подход обобщён и экстраполирован на пару функций трёх групп аргументов, что даёт понятие уподобления и ряд его более сильных аналогов. Понятие уподобления применено к постановке и решению задачи сравнения ДС.

4. Предложены способы получения передаточной характеристики модификатора относительно характеристик потоков из передаточной характеристики потока либо модификатора относительно параметров потоков (часть положения V).

5. При построении аксиоматической схемы исследования систем, разработки принципов их диверсификации и параупорядочения (2009–2011) сформированы терминологические комплексы, выражающие:

- смысл аксиоматической схемы и принципы математического описания её компонентов;
- разнообразие типов и иерархичность передаточных характеристик и их фрагментов, механизмов трансформации фрагментов;
- способы управления порядком;
- функции и свойства модификаторов различного назначения;
- родство теории ДС и аксиоматической схемы;
- концепции равносильности эволюций, парапорядка, уподобления и его более сильных аналогов;
- результат применения этих концепций к задаче сравнения ДС, их экземпляров и эволюций в них, а также источников и преобразователей потоков (сходство, одинаковость etc.);
- средства сравнения (денотативного, семантического и т.п.) именных форм и операций над ними (поглощение, предельная редукция, взятие имени, смысла, денотата);
- двойную типологию преобразователей форм, параметров, характеристик потоков (как (не)изменяющих «имитационный потенциал» либо «разнообразие» потока и как (не)линейных);
- возможность колебательно-волновых процессов в пространстве параметров порядка;
- классификацию нелинейно-динамических систем конфиденциальной связи.

6. Кроме того, в этом проблемном поле (2009–2011):

- смысл ряда введённых понятий сопоставлен со значениями близких терминов, употребляемых в естествознании и математике;
- предложены трактовка системы, пространства, времени, учи-

тывающая возможные позиции «наблюдателя», типология модификаторов по признакам числа точечных модификаторов и числа скалярных характеристик потока;

- раскрыты относительность противопоставления категорий «условный поток» и «модификатор», принципы проведения границы системы и вычленения аккумулятора, сформулированы требования к описанию аккумулятора, условного потока, модификатора;

- введено дескриптивное понятие сложности форм;

- обоснованы шесть способов управления порядком и величинами его параметров (в том числе – пространственно-временных цугов потоков), они уточнены – с учётом критериев растождествления (в том числе ДС), разработанных в контексте положений II, III;

- артикулированы различия между понятиями (динамической) системы, источника и преобразователя потока, чёрного ящика;

- выделены шесть типов пар преобразователей потоков, актуальных в разрезе диверсификации ДС;

- на языке десяти выявленных процедур описаны шесть сценариев диверсификации ДС, основанных на преобразовании нелинейной передаточной характеристики;

- разработано понятие тотального модификатора с виртуальной частью и понятие кусочной неизменности одного потока по сравнению с другим как одного из пяти критериев отбора менее тривиальных сюжетов диверсификации ДС;

- раскрыты возможности получения передаточной характеристики модификатора относительно характеристик потоков из других характеристик, установлены параллели с АВМ;

- предложено различение эволюции в системе и (под)системы, в том числе – (само)управляемой эволюции;

- обоснованы интерпретации: оператора эволюции ДС как динамической переменной, (естественно)научного положения как передаточной характеристики наблюдателя.

- построены структурные схемы пары простейших ДС, содержащих двух- и одноходовый неуправляемый нелинейный элемент (в составе управляемого), математические модели соответствующих нелинейных элементов и ДС;

- построен цикл структурных схем ДС с управлением нелинейностью формой внешнего потока, воспроизводящий движение от простейшего двухплечего интерферометра к простейшему кольцевому нелинейному – через двухплечие и комбинированные;

- в разработанных радиоэлектронных устройствах с управлением

ем нелинейной передаточной характеристикой формой входного потока теоретически и экспериментально обнаружены статические, периодические, хаотические режимы, включая перемежаемость;

– среди интерферометров найдены возможные структурные аналоги микротрубочек цитоскелета в живой клетке.

7. Новизна положений **VI**, **VII** и частично **V**, а также результатов, с ними связанных, обусловлена оригинальностью: предложенного (2009) детектора топологического заряда V_d вихрей; структурной схемы системы «вихревой» связи; постановки задачи исследований характеристик детектора, включающей изучение влияния искажающих факторов на распознавание вихря и вероятность ошибки передачи данных.

8. В этом проблемном контексте предложены (2010): способы предсказания свойств «вихревой» системы передачи двоичных данных и основы расчёта вероятности ошибки их передачи – в предположениях 1)–4) положения **VII.2**, а также принцип построения пеленгатора вихря.

9. Новизна положения **VIII** и результатов, с ним связанных (2005–2007), обусловлена оригинальностью тактики оперирования комплексными числами, совершенствующими алгоритм Фрида.

10. Новизна положения **IX** и результатов, с ним связанных (2006–2007), обусловлена оригинальностью постановки и способа решения задачи о сравнении влияния аддитивных шумов и утраты данных измерений на качество работы алгоритма.

11. Новизна положения **X** и результатов, с ним связанных (2003–2005), обусловлена применением категорий топологии для построения алгоритма распознавания особенностей рельефа фазы $S(\mathbf{r})$.

Научная ценность защищаемых положений и результатов.

1. Утверждаемая в положении **I.1** связь между научными терминами, придаёт однозначность и строгость фундаментальному понятию порядка и его параметров, снижает степень произвола в их толковании; ведёт от противопоставления порядка беспорядку к многомерной многоуровневой шкале (бес)порядка; открывает возможность сопоставления различных (бес)порядков.

2. Интерпретация систем (положение **I.2**), органична для представителей естествознания любого профиля и помогает преодолеть методическую «инкапсуляцию» специальных разделов естествознания. В этом плане предложенный язык описания полезен для изучения источников структур, хаоса, вихрей и обобщения результатов. Аксиоматическая схема и её понятия сопрягают системологию с

разделом кибернетики, где оперируют категорией чёрного ящика. Трактовка его как исследовательского «незнания» позволяет применить это понятие в когнитивистике.

3. Предложенное разъяснение статуса (естественно)научного положения и трёхуровневой когнитивной позиции исследователя непосредственно обогащает его методологическую культуру, стимулируя развитие профессиональной рефлексии. То же относится и к толкованию передаточной характеристики (фигурирующей в положении I.2) как конструкта.

4. Аксиоматическая схема (положение I.2) в сочетании с концепцией порядка (положение I.2) продуктивна тем, что позволяет выявить шесть способов управления порядком и величинами его параметров. Обнаруженные связи между отношениями (не)сходства пар объектов, толкуемых как ДС, преобразователи, источники потоков, оправдывают ориентацию на задачу повышения разнообразия ДС. В объединении с концепцией равносильности и парапорядка (положение II), а также с учётом доказанных признаков (не)сходства ДС (e.g. положение IV) это приводит (в контекстах положений I.2, V) к формулировке десяти процедур. Некоторые из них возможны благодаря разработке понятий: экстрактор параметров порядка, модулятор параметров порядка в(ы)ходного потока, модификатор выборки-хранения данных о характеристиках потока. На языке этих процедур удаётся описать шесть сценариев диверсификации ДС. Эти процедуры и сценарии полны с точки зрения мобилизации всех количественных функций, фигурирующих в аксиоматике, и передаточной характеристики относительно именных форм с целью диверсификации ДС, основанной на трансформации нелинейной передаточной характеристики субмодификатора ДС. Они связывают два концепта: разнообразие и нелинейность. Полученные результаты приложимы к многообразным задачам физики систем. Разработка понятия ДС с виртуальной частью даёт пять критериев вычленения (не)тривиальных случаев диверсификации (существование некоторых случаев утверждает положение V). Вкупе с раскрытыми особенностями трансформации рабочих областей передаточных характеристик эта разработка обосновывает (не)возможность (само)управляемой эволюции в (суб)системе и (суб)системы (положение I.2). Неологизм «виртуальная часть» модификатора, стимулирует попытку формализации системного эффекта, инициирует вопрос о его градациях.

Выводимый здесь принцип трансформации оператора эволюции

ДС (положения **I.2**, **V**) чреват задачей обнаружения этой трансформации в реальных системах, а далее – управления их свойствами. Так, в детекторе вихря на базе интерферометра Рождественского (положения **V**, **VI.1**) нелинейность формирует демодуляция пространственного распределения комплексной амплитуды волны.

Поставлена задача реализации (само)управляемого процесса, разворачивающегося в устройстве и обладающего главными чертами онтогенеза. Здесь возможно формирование серии моделей и изобретений. Обе задачи – в русле формирующейся системы знания Megascience¹¹, трансдисциплинарной инициативы Nano-Bio-Information-Cognition-technology¹² и проекта FACETS.

5. Отношение парапорядка (положение **II**) является более общим, чем традиционное отношение порядка, и потому обладает инструментальными преимуществами в расподоблении объектов. Это преимущество усугубляется применимостью его к парам произвольных функций трёх групп аргументов. Так, концепции отношения парапорядка (положение **II**) и основанного на нём уподобления – вкуче с квалификациями пар порядков, систем, потоков, преобразователей (одинаковы, сходны, (квази)равны, (квази)тождественны) – обеспечивают сопоставление указанных объектов. Отношения эти ценны в компаративном плане: некоторые из них способны быть различными эквивалентностями (e.g. на множестве ДС), выявляя степени её. Развитие подобных процедур обещает экстраполяцию разработанного формализма на теорию автоматов.

Условиями, указанными в положении **III**, следует руководствоваться при диагностике пар объектов на способность одного из них уподоблять себе другого либо наоборот, быть уподобляемым. Ту же ценность имеют и другие выведенные необходимое и / или достаточное условия (не)сходства. Понятия же уподобления и сходства общаюот категорию подобия в физике, являясь частным случаем отношения парапорядка.

6. Положение **IV** даёт критерии диверсификации ДС в смысле их (не)сходства. Вместе со своими основаниями положение **IV** есть смысловой мост к выделению шести типов пар преобразователей потоков. Используя их, удаётся доказать: необходимое условие несходства двух ДС с идентичными графами связей потоков и субмо-

¹¹ Крушанов А.А. От трансдисциплинарных исследований к ... Megascience? // Универсальный эволюционизм и глобальные проблемы / Отв. ред. В.В. Казютинский, Е.И. Мамчур. – М.: ИФ РАН, 2007. – С. 231–252.

¹² Альтман Ю. Военные нанотехнологии: Возможности применения и превентивного контроля вооружений. – М.: Техносфера, 2008. – 424 с.

диффикаторов; достаточное условие несходства двух ДС и парциально несходства; роль различия нелинейных элементов в диверсификации ДС. Выявлен класс перспективных нелинейных функций. Указана возможность системы ограничивать разнообразие экземпляров входного потока субмодификатора.

7. Терминологические комплексы (см. рубрику «Новизна») повышают степень точности, объективности, лаконичности описания явлений в системах как универсальных образованиях в природе и культуре, облегчают передачу опыта в научной коммуникации, благодаря однозначности формулировок, стимулируют получение нового знания. Перефразировка понятия ДС позволяет установить изоморфизм структуры описаний и строгое формальное соответствие между компонентами аксиоматической схемы и дескрипции ДС, а также соотношение понятий чёрного ящика и модификатора.

8. Пересечение целей и методов криптологии с теорией, практикой и возможностями применения хаоса для защиты информации составляет основу направления, названного нами нелинейно-динамической криптологией. Предложенное расширение классификации нелинейно-динамических систем конфиденциальной связи позволяет предложить новые варианты их.

9. Сопоставление структур связей фрагментов поля в двухконтурном нелинейном кольцевом интерферометре с молекулярной организацией микротрубочки цитоскелета стимулировало формирование представлений (2007) о необходимости нового направления – квантово-синергетической цитоинформатики, развиваемого е.г. Е.Е. Слядниковым.

10. Закономерности, сформулированные как положения VI и VII, переносимы в терагерцовый, СВЧ, другие диапазоны волн и, вероятно, в акустику. Положения VI.1 и VI.3 открывают путь к созданию нового класса метрологических приборов и ставят задачу о связи квазинепрерывных величин: измеряемой интенсивности I_r с орбитальным угловым моментом пучка. Идея пеленгатора вихря реализуема в виде математической и численной модели.

11. Первое утверждение в положении VI.2 пригодно быть критерием для проверки корректности вычислительных схем и выбора их параметров при решении задач дифракции в соответствующем приближении.

12. Утверждение в положении VII.1. (и зафиксированные в положениях VI, VII возможности детектора вихрей) формирует новое проблемное поле, ставя комплекс задач для исследований и разра-

ботки систем связи предложенной архитектуры.

13. Методика расчёта вероятности ошибки передачи данных и способы предсказания свойств бинарной системы передачи приложимы к исследованию таковых, но с детектором любой физической характеристики сигнала и удовлетворяющих условиям 1)–4) в VII.2.

14. Первые утверждения в положениях VIII и IX создают полезные прецеденты: 1) алгоритм, интегрирующий реконструкцию фазы светового пучка из её градиентов с функцией её сшивки; 2) использование понятия идеально точного алгоритма, которое разделяет качество работы алгоритма и сходство восстановленного распределения фазы с неискажённым её распределением.

15. Первое утверждение в VIII (и второе в IX) указывают условия, при которых недостаточно (и неправомерно) сравнивать параметр Штреля с единицей для квалификации качества восстановления фазы (эффективности алгоритма восстановления фазы).

16. Третье утверждение в IX объясняет поведение параметра Штреля с ростом числа вихрей в исходном распределении фазы при наличии мультипликативного либо аддитивного шума.

17. Предложенный в X алгоритм поиска особых точек применим к анализу структуры фазового пространства ДС. Алгоритм даёт возможность следить за трансформацией рельефа фазы $S(\mathbf{r})$, выявлять бифуркационные механизмы.

Практическая значимость положений и результатов.

1. Положение I.1 и результаты, с ним связанные, позволяют исследователю и педагогу не ограничиваться бинарной оппозицией, но вводить градации (бес)порядка. Репрезентативная иллюстрация – толкование равновесного состояния, его параметров и равновесной системы.

2. Положение I.2 и результаты, с ним связанные, полезны для «сжатия» знания – при изучении e.g. разделов общей физики, теории колебаний и волн, электродинамики, оптики, акустики; для освоения магистрантами, аспирантами, соискателями жанра научного положения. Предложенная трактовка системы активизирует осознание молодым учёным: 1) себя как единства цели, метода, предмета, контекста исследования; 2) ролевого релятивизма категорий «условный поток», «модификатор», «аккумулятор»; 3) связи понятия диверсификации систем с познавательными возможностями (коллективного) наблюдателя и его целеполаганием.

3. В качестве фрагментов лекционно-практических курсов (вроде «Колебания и волны в оптике») пригодна демонстрация механизмов

управления оператором эволюции, использующая аналитические построения, результаты экспериментов, на материале прецедентов систем с виртуальной частью.

Кроме того, готовые для преподавания методические продукты:

- структурные схемы, модели, макеты оптических и радиоэлектронных устройств, а также методики экспериментального изучения последних и соответствующие программные модули;

- приёмы упрощений синкретической модели системы, принципы построения рабочей модели, указания на неоднозначность задачи квалификации n -мерности объекта и на роль исследовательских интерпретационных предпочтений;

- интерпретация выявления корреспондирующих систем, виртуальной и реальной части в них как атрибута исследования (само)управляемой системы;

- сюжеты, иллюстрирующие: системный принцип плюрализма описания; декомпозицию автономной ДС; понятие равносильности эволюций; смысловые особенности и границы применимости понятия уподобления (с привлечением принципа Гюйгенса – Френеля); возможность формализации системного эффекта.

К ним же относятся и систематизированные (в виде схем и / или таблиц и / или формул):

- градации пространственной распределённости моделей;

- отношения включения, которые существуют между рабочими областями некоторой из трёх типов передаточных характеристик;

- основные введённые разновидности уподобления пар эволюций, ДС, их экземпляров и соотношения между уподоблениями;

- выявленные логические связи между градациями подобия пар функций и градациями подобия пар их именных форм;

- доказанные связи между отношениями (не)сходства пар объектов, интерпретируемых как ДС, преобразователи, источники потоков;

- отношения между двумя парами ДС, их «тотальными» модификаторами и входными потоками, релевантными понятию тотального модификатора с виртуальной частью.

4. Вытекающий из положений I.2, V и результатов, с ними связанных, фундаментальный способ трансформации оператора эволюции динамических подсистем без изменения их материальной основы (конструкции охваченных обратными связями частей) принципиально необходим для синтеза саморазвивающихся технических систем: макро-, микро- и наноразмерных аналогов биоси-

стем, в том числе и тех, которым присуще явление гиперцикла. Этот способ открывает путь к созданию самоизменяемых генераторов хаоса для повышения стойкости систем нелинейно-динамической криптологии. Указаны способы получения нелинейной передаточной характеристики из передаточных характеристик потока, модификатора относительно параметров порядка.

Один из этих способов отличается устойчивостью, предсказуемостью, конструктивной простотой по сравнению со способом, где реализуют интегрирование по невременному аргументу. Другой же – включает в себя последний. Все интерпретируемые и / или разработанные схемы нелинейных элементов и ДС на их базе (включая основанные на организации: потока параметров порядка, колебательно-волновых процессов в пространстве этих параметров, интерференционного усиления) способны быть прототипами будущих устройств с (само)управляемой нелинейностью.

5. Генерализованные отношения порядка (положение II) ориентированы на сопоставление сложности поведения и поведенческого разнообразия (динамических) систем либо их экземпляров. Соотношения равносильности эволюций есть своего рода соотношения соизмеримости сложности, а отношения частичного парапорядка – отношения разнообразия режимов в системах. Скажем, если две ДС равносильны, то при соизмеримой сложности и разнообразии их параметров и начальных условий можно получить в этих системах множество режимов соизмеримой сложности и разнообразия. Выявление этих отношений, фактически, всегда проводят при замене в системе одного блока другим. В этом контексте полезны критерии (не)равносильности ДС, e.g. содержащиеся в положении III, а также вытекшие из них признаки (не)сходства ДС и преобразователей потоков. Кроме того, полезны различные условия (не)сходства ДС, сформулированные в положении IV и полученные в его контексте. Одно из них приводит к утверждению: различие нелинейных элементов (и частотных фильтров) способно повлечь несходство ДС.

6. Выявление равносильных экземпляров эволюций системы даёт ключ к идентификации и компенсации либо имитации влияния некоторого параметра на эволюцию ДС. Задачи эти широко распространены в технике, сфере управления процессами etc. Свойства равносильности параметров, выражая кардинальные закономерности, позволяют экономить время и вычислительный ресурс.

7. Положение VI.1 описывает конструкцию детектора топологического заряда V_d вихря и алгоритм нахождения V_d . А обобщающее

его положение **VI.1'** ориентировано на случай, когда необходимо распознавать вихри из достаточно широкого диапазона $[V_{d \min}, V_{d \min} + \delta V_d - 1]$, но создавать детектор на одном интерферометре Рождественского с $m = \delta V_d$ сложно (или нецелесообразно). Детекторы, описанные в **VI.1**, пригодны для осуществления операции «сложение по модулю m » со скоростью, определяемой инерционностью пороговых устройств и фотоприёмника.

8. Из положения **VI.2** (в указанных там приближениях) вытекает: реализация связи не требует ретрансляторов; условия равной эффективности абсолютного и абсолютного адаптивного дифференциального и дифференциального адаптивного алгоритмов в бинарной системе связи; возможность осуществления связи с помощью световых пучков любой структуры, но с наложенным вихревым экраном.

На распознаваемость вихря белый фазовый шум влияет сильнее, чем амплитудный. В ДС, структурно подобных детектору вихря, возможно формирование нелинейности вида $[\sin(A_{nS})/A_{nS}]^2$ и $(1 + A_{nA}^2/3)^{-1}$.

9. Из положения **VI.3** вытекают: принцип действия пеленгатора вихрей, необходимого для повышения точности их распознавания; детектор *взаимно* дополнителен адаптивным оптическим системам (по масштабу корректируемых искажений); ориентиры (в виде оценок вероятности распознавания вихрей) для разработчиков; преимущества предложенной в **VII.1** «вихревой» связи: 1) физическая стойкость к угрозе прослушивания противником бокового рассеянного излучения; 2) электромагнитная совместимость большого числа пар корреспондентов.

10. Положение **VII.1** предсказывает повышение быстродействия при совместной работе детектора вихрей с устройствами адаптивной оптики. Положение **VII.2** и результаты, полученные в его контексте, содержат рекомендации разработчикам системы передачи двоичных данных, а также оценки вероятности ошибки передачи применительно к параметрам турбулентности, уровню шума фотоприёмника, настройкам детектора вихрей, их топологическим зарядам etc. В частности положение указывает на преимущества дифференциального алгоритма кодирования (порой он работоспособен, даже когда детектор не распознаёт V_d) и предпочтительность использования адаптивного порога.

11. В положении **VIII** использование третьего утверждения позволяет повысить точность восстановления фазы пучка, а первых двух – построить алгоритм, сохраняющий работоспособность при высоких

значениях модуля градиента фазы и позволяющий получить распределение фазы в виде суммы полного значения её потенциальной части и «нарезанного» значения её вихревой части. В развитие этого подхода предложен реконструктор фазы как суммы полных значений её потенциальной и вихревой частей. Последний выгоднее строить на основе модифицированного алгоритма Фрида и применять при поверхностной плотности вихрей в пучке меньше 0,028 вихрей на ячейку расчётной сетки, либо когда ожидается наличие вихрей высоких порядков.

12. Последнее утверждение в положении IX даёт ориентир разработчикам датчиков Шэка–Гартмана в выборе между повышением надёжности и понижением уровня шума датчика.

Внедрение результатов диссертации и рекомендации по их дальнейшему использованию. Большинство результатов получены автором в период 2003–2011 гг. (копии документов о внедрении – в Приложении). Предложенные и программно реализованные (в формате dll-библиотек) алгоритмы скрининга особых точек волнового фронта и восстановления фазы успешно испытаны (рис. 7) в составе программного обеспечения датчика Шэка–Гартмана (ФГУП РФЯЦ ВНИИЭФ, г. Саров) и в составе компьютерной модели адаптивной оптической системы, включающей этот датчик (Ин-т оптики атмосферы СО РАН, г. Томск).

Принципы дистантной трансформации свойств ДС используются в ОАО «НИИ Полупроводниковых приборов» (г. Томск) при создании источника шумоподобных сигналов.

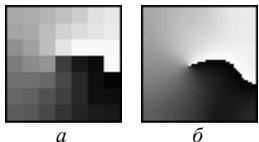


Рис. 7. Пример результатов обработки экспериментальных данных (координат центров тяжести пятен в датчике Шэка–Гартмана): распределение фазы, полученное с помощью модифицированного алгоритма Фрида (а) и двухмерная фурье-интерполяция распределения (б)

Ряд результатов внедрён в учебный процесс (на кафедре квантовой электроники и фотоники ТГУ) в содержание: курсов «Нелинейная оптика», «Оптическая синергетика», «Функциональная электроника», «Современные проблемы физики»; НИПС 3–6-го курсов и НИР аспирантов; учебных программ новых курсов «Колебания и волны в оптике», «Лазерные, нелинейные и регистрирующие среды», «Бистабильность, самоорганизация и хаос в оптике». Некоторые материалы и программные продукты вошли в учебное пособие: Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н., Раводин В.О. Элементы нелинейной оптики и синергетики в курсе оптоинформатики. – Томск: Изд-во «ТМЛ-Пресс», 2007. – 92 с. (с грифом УМО по образованию в обла-

сти приборостроения и оптотехники).

Результаты работы целесообразно использовать в: Ин-те оптики атмосферы СО РАН (г. Томск) и ФГУП РФЯЦ ВНИИЭФ (г. Саров); ОАО «НИИ Полупроводниковых приборов» (г. Томск) для создания (само)управляемых генераторов хаоса; Томском гос. ун-те, Саратовском гос. ун-те, Томском гос. ун-те систем управления и радиоэлектроники, Московском энергетическом ин-те.

Апробация работы и публикации. По теме диссертации опубликовано 189 печатных работ: 3 монографии; 24 статьи в рецензируемых научных и научно-технических журналах, в которых ВАК рекомендует публикацию основных результатов докторских диссертаций; 12 – в рецензируемых научных журналах, препринт и статья в научном сборнике; 30 – в сборниках трудов международных конференций; 6 – в сборниках трудов всероссийских (и зарубежных республиканских) конференций; материалы 111-ти докладов на конференциях (в том числе – 91-го доклада на международных), а также упомянутое выше учебное пособие.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на: научных семинарах кафедры квантовой электроники и фотоники ТГУ и семинарах кафедры электронных приборов ТУСУРа;

Второй междунар. конф. «Кристаллофизика 21-го века» (2003, Москва);

The 6-th–9-th International conf. "Atomic and molecular pulsed laser" (2003, 2005, 2007, 2009, Tomsk);

Междунар. конф. «Современные проблемы физики и высокие технологии» (2003, Томск);

The 2-nd Int. Conf. Frontiers of nonlinear physics (2004, Nizhny Novgorod – St.-Petersburg);

The 11-th, 12-th, 16-th, 17-th and 14-th Joint Int. Symposium "Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics" (2004, 2005, 2009, 2011, Tomsk and 2007, Buryatiya);

Forth Asia-Pacific Conf. "Fundamental Problems of Opto – and Microelectronics" (2004, Khabarovsk).

Третьей междунар. конф. «Фундаментальные проблемы оптики» (2004, Санкт-Петербург);

Конф. «Оптика и образование» (2004, 2006, 2008, Санкт-Петербург);

Междунар. науч. конф. «Анализ и синтез как методы научного познания» (2004, Таганрог);

Первой междунар. научно-практической конф. «Стратегии динамического развития России: единство самоорганизации и управ-

ления» (2004, Москва);

Междунар. науч. конф. «Информационный подход в естественных, гуманитарных и технических науках» (2004 г., Таганрог);

Int. Conf. and 2-nd Int. Conf. «Physics and Control» (2003, 2005, Saint Petersburg);

The 5-th International Workshop on Adaptive optics for Industry and Medicine (2005, Beijing, China);

The Int. Conf. “Optics and Photonics” (2005, San Diego, USA);

Int. Congress on Optics and Optoelectronics: Conf. “Systems of Optical Security” and “Lasers and Applications” (2005, Warsaw, Poland).

The 19th and The Int. Conf. ICONO/LAT 2005 and 2007 (2005, St. Petersburg and 2007, Minsk, Belarus);

Междунар. научно-практ. конф. «Электронные средства и системы управления» (2005, Томск);

Седьмой междунар. конф. "Циклы" (2005, Ставрополь);

Междунар. науч. конф. «Оптимальные методы решения научных и практических задач» (2005, Таганрог);

The Int. Conf. «Speckles, from grains to flowers "Speckle-06"» (2006, Nimes, France);

The 16-th Int. Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers & High Power Laser Conf. (2006, Gmunden, Austria);

Седьмой междунар. конф. «Прикладная оптика–2006» (2006, Санкт-Петербург);

Междунар. науч. конф. «Информационные технологии в современном мире» (2006, Таганрог);

Междунар. междисциплинарных науч. конф.: Третьи–Седьмые Курдюмовские чтения (2007, 2008, 2009, 2010, 2011, Тверь);

Третьей междунар. научно-практ. конф. «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (2007, Санкт-Петербург);

Девятой междунар. конф. «Физика в системе современного образования (ФССО–07)» (2007, Санкт-Петербург);

Междунар. науч. конф. «Проблемы развития естественных, технических и социальных систем» (2007 г., г. Таганрог);

The 6th EUROMECH Nonlinear Dynamics Conf. "ENOC 2008" (2008, Saint Petersburg);

Второй и третьей междунар. научно-практических конф. «Актуальные проблемы радиофизики "АПР-2008" и "АПР-2010"» (2008 и 2010, Томск);

16-й междунар. конф. «Циклы природы и общества» (2008,

Ставрополь);

Междунар. науч. конф. «Инновации в обществе, технике и культуре» (2008, Таганрог);

Междунар. науч. конф. «Информация, сигналы, системы: вопросы методологии, анализа и синтеза» (2008, Таганрог);

14-й Междунар. зимней школе-семинаре по электронике сверхвысоких частот и радиофизике (2009, Саратов);

Междунар. науч. конф. «Системы и модели в информационном мире» (2009, Таганрог);

The 14 International Conf. on Laser Optics «LO-2010» (2010, St. Petersburg);

Междунар. науч. конф. «Информационное общество: идеи, технологии, системы» (2010, Таганрог);

Пятой и девятой Всероссийских научно-технических конф. «Нейроинформатика» (2003, 2007, Москва, Научная сессия МИФИ);

XII, XIII и XIV Всерос. семинары «Моделирование неравновесных систем» (2009, 2010 и 2011, Красноярск);

Третьей–шестой междунар. конф. молодых ученых и специалистов «Оптика» (2003, 2005, 2007, 2009, Санкт-Петербург);

The IV Int. young scientists conf. on applied physics (2004, Kiev, Republic of Ukraine);

Седьмой и девятой междунар. школах «Хаотические автоколебания и образование структур» (2004, 2010, Саратов); а также ещё на 20-ти конференциях молодых учёных.

Личный вклад диссертанта. В диссертации использованы только те результаты, в которых автору принадлежит определяющая роль. Опубликованные работы написаны либо без соавторов, либо в соавторстве с сотрудниками научных группы. В совместных работах диссертант принимал участие в постановке задач исследований, теоретических расчётах, вычислительных и натуральных экспериментах, осуществлял объяснение и интерпретацию результатов. Данные в параграфе 5.4, получены аспирантом РФФ ТГУ И.В. Романовым. Рис. 5.8–5.12 получены магистрантом РФФ ТГУ И.В. Быковым. При исследовании характеристик детектора вихрей (Глава 6) использована, реализованная д.ф.-м.н. в.н.с. ИОА СО РАН (Томск) Ф.Ю. Каневым численная модель фазовых экранов, имитирующих атмосферную турбулентность. Для тестирования алгоритмов поиска оптических вихрей и восстановления фазы пучка (Глава 7) использованы экспериментальные данные, полученные в группе д.ф.-м.н. Ф.Ю. Старикова (ФГУП РФЯЦ

ВНИИЭФ, г. Саров).

Автор признателен за помощь к.ф.-м.н. Б.Н. Пойзнеру – за суждение содержания диссертации, помощь и консультации на этапах её подготовки. А коллективу кафедры квантовой электроники и фотоники ТГУ автор благодарен за многолетнюю моральную поддержку. В работе автору – в той или иной форме – помогали соавторы как старшие, так и младшие «по званию», среди них – С.М. Авдеев, д.ф.-м.н. В.П. Аксенов, И.В. Быков, П.Е. Денисов, д.ф.-м.н. Ф.Ю. Канев, к.ф.-м.н. А.В. Лячин, к.ф.-м.н. А.Л. Магазинников, Н.Е. Макуха, В.О. Раводин, д.ф.-м.н. Е.Е. Слядников, д.ф.-м.н. Ф.Ю. Стариков, к.ф.-м.н. О.В. Тихомирова, Д.А. Шергин, М.А. Шулёпов, А.А. Шулёпова. Для решения ряда задач диссертации весьма полезными оказались суждения к.ф.-м.н. М.С. Бухтыка, д.т.н. В.Ф. Взятышева, д.ф.-м.н. С.Н. Владимирова, д.ф.-м.н. А.В. Войцеховского, д.т.н. В.Т. Калайды, д.ф.-м.н. В.В. Колосова, д.ф.-м.н. С.П. Кузнецова, д.ф.-м.н. П.С. Ланды, д.ф.-м.н. В.П. Лукина, Р.Р. Мударисова, В.В. Негруля, А.А. Рыбака, д.ф.-м.н. С.М. Шандарова, к.т.н. В.В. Штыкова.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из Введения, семи глав, Заключения, списка литературы и Приложения. Общий объём диссертации 553 страницы, в том числе 179 рисунков, 36 таблиц и Приложение (на 4 с.). Библиографический список (на 43 с.) включает 609 наименований.

Краткое содержание работы. **Введение** содержит описание состояния вопроса, формулировки целей, задач, методов исследования, защищаемых положений, обоснование их достоверности, новизны, научной и прикладной ценности.

В первой главе (и частично **в шестой и седьмой**) анализируется литература, посвящённая подходам к изучению ДС (Глава 1), вопросам сингулярной оптики, которые касаются способов идентификации порядка винтовой дислокации и восстановления фазы светового пучка (Главы 6, 7). Выявлены типичные приёмы повышения разнообразия ДС и аргументирована актуальность поиска средств диверсификации ДС. Констатируется актуальность унификации и аксиоматических схем. Освещены терминологические позиции лингвистов, историков и методологов науки, специалистов по когнитивистике.

Во второй главе построена аксиоматическая схема исследования систем, выдвинуты и обоснованы принципы математического описания базовых компонентов системы, развиты и фор-

мализованы понятия порядка, его параметров и способов управления ими; установлены связи между подходами, характерными для аксиоматической схемы, для теории ДС и для кибернетики.

В третьей главе разработаны понятия свойства равносильности эволюций, параметров, начальных условий и ДС, а также понятие уподобления функций, потоков, модификаторов etc.; раскрыта связь концепта «равносильность» с теорией подобия (понятием автотомодельности). Благодаря понятию уподобления, поставлена и решена задача сравнения ДС, необходимая для решения задачи их диверсификации; концепция равносильности соотнесена с представлениями уподобления.

В четвёртой главе введены отношения (не)сходства применительно к ДС, источникам и преобразователям потоков, нелинейным функциям; выдвинуты принципы повышения разнообразия их. Разработаны понятия, выражающие различные градации сходственности, найдены условия (не)сходства для ДС и преобразователей; построена типология преобразователей форм и преобразователей параметров потоков с прицелом на их способность изменять «имитационный потенциал» либо «разнообразие» потока. Выяснены связи отношений (не)сходства между парами: ДС, преобразователей потоков, источников потоков, – и признаков (не)сходства ДС, а также способности пар модификаторов двух ДС вызывать несходство ДС. Развита концепция: управления порядком и диверсификации ДС; получения передаточной характеристики относительно характеристик потоков из таковой относительно параметров и из передаточной характеристики потока. Описаны сценарии диверсификации ДС; раскрыта возможность эволюции (под)системы.

В пятой главе в процессе анализа оптических и радиоэлектронных ДС с управляемой нелинейностью разработаны и испытаны макеты последних. Проведённые компьютерные эксперименты подтверждают ряд теоретических представлений. Построены структурные схемы, выражающие один из принципов (само)управления нелинейностью, и реализующая его «рамочная» модель систем. Исследованы примеры ДС, использующих одно- либо двухвходовую «готовую» нелинейность в случаях одномерного скалярного либо двумерного векторного входного потока. Предложенные принципы диверсификации ДС оценены в плоскости совершенствования систем нелинейно-динамической криптологии.

В шестой главе обоснована идея детектора вихрей, построена его математическая модель. Она устанавливает связь преобразова-

ния вихревого входного поля, порядка винтовой дислокации волнового фронта с относительной интенсивностью интерференционного поля на выходе детектора. Исследовано влияние шума и турбулентности атмосферы на возможность идентификации вихря. Сформулирована идея и построена модель двоичной сингулярно-оптической системы связи на базе детектора вихрей. Вычислительные эксперименты демонстрируют её работоспособность и основные факторы, влияющие на вероятность ошибки передачи данных. Дискутируются практические преимущества «вихревой» связи и пути совершенствования её.

В седьмой главе разработан оригинальный алгоритм скрининга особых точек векторного поля на плоскости (e.g. проекций градиента фазы на поперечную плоскость светового пучка), и указан ряд его версий. Предложена модификация алгоритма Фрида для восстановления фазы волнового фронта из проекций её градиентов на поперечную плоскость, а также алгоритм, комбинирующий два названных выше. Построены алгоритмы, сохраняющие эффективность при высоких значениях модуля указанных проекций: комплексный экспоненциальный реконструктор фазы со сшитой её потенциальной частью и «многолистный» комплексный экспоненциальный реконструктор фазы (со сшитой её потенциальной частью). Выявлены достоинства и недостатки перечисленных алгоритмов, исследовано влияние различных факторов на их точность, указаны возможности повышения эффективности.

В заключении подводятся итоги выполненной работы, формулируются рекомендации по развитию исследований (прикладной потенциал полученных результатов). Обобщая результаты диссертации, можно выделить семь аспектов: методологический аспект (интерпретации, критерии, подходы, способы, переносы, классификации, выявленные признаки, свойства и квалификации введённых отношений), понятийный и терминологически-дефиниционный, проблемно-постановочный, модельный, расчётно-аналитический и алгоритмический, экспериментальный, вычислительно-экспериментальный.

Приложение А содержит копии документов о внедрении.

Итак, в ходе построения аксиоматической схемы исследования систем частично синтезированы категориальные и математические аппараты: теории колебаний и ДС, теории множеств, математической логики, синергетики и кибернетики. В ряде аспектов это позволило придать междисциплинарный характер

предложенному «реологическому» языку описания систем, что потребовало понятных и терминологических нововведений. Такой язык правомерно рассматривать как некий «стандартный» язык описания систем. Его целесообразно практиковать при изучении и создании источников структур, хаоса, вихрей, чтобы решать концептуальные и инженерно-физические задачи в каждой из этих областей знания.

Основные результаты диссертации отражены в работах:

Препринт, учебное пособие, монографии

1. Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н., Денисов П.Е. Равносильность: от обоснования понятия до анализа бифуркационного поведения. – Томск: ТГУ, 2003. – 46 с. / Вестник Том. гос. ун-та. Бюллетень оперативной научной информации. – 2003. – № 15. Октябрь 2003.

2. Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н., Раводин В.О. Элементы нелинейной оптики и синергетики в курсе оптоинформатики: Учебное пособие. – Томск: Изд-во «ТМЛ-Пресс», 2007. – 92 с.

3. Измайлов И.В., Лячин А.В., Пойзнер Б.Н. Детерминированный хаос в моделях нелинейного кольцевого интерферометра – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. – 258 с.

4. Владимиров С.Н., Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н. Нелинейно-динамическая криптология: радиофизические и оптические системы / Под ред. С.Н. Владимирова. – М.: Физматлит, 2009. – 208 с.

5. Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н. Аксиоматическая схема исследования динамических систем: от критериев их расхождествления к самоизменению. – Томск: STT, 2011. – 570 с.

Статьи в рецензируемых научных и научно-технических журналах, рекомендованных ВАК

6. Двухканальная лазерная система со стабилизацией интервала между импульсами излучения: результаты моделирования / И.В. Измайлов, М.М. Макогон, Б.Н. Пойзнер, В.О. Раводин // Оптика атмосферы и океана. – 2003. – Т. 16, № 2. – С. 146–150.

7. Измайлов И.В., Лячин А.В., Пойзнер Б.Н. Описание процессов в кольцевом интерферометре дискретным отображением: бифуркации и размерности аттрактора // Вестник Томского гос. ун-та. Серия “Физика”. – 2003. – № 278. – С. 111–115.

8. Измайлов И.В. Свойство равносильности в контексте управления эволюцией системы // Вестник Томского гос. ун-та. Серия “Физика”. – 2003. – № 278. – С. 116–121.

9. Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н., Шергин Д.А. Процессы в коль-

цевом интерферометре: проблема описания с помощью дискретных отображений // Оптика атмосферы и океана. – 2004. – Т. 17, № 2-3. – С. 127–132.

10. Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н., Шергин Д.А. Пространственный детерминированный хаос в оптических системах и способы его моделирования // Изв. вузов. Физика. – 2004. – № 12. – С. 65–71.

11. Измайлов И.В., Лячин А.В., Пойзнер Б.Н., Шергин Д.А. Пространственный детерминированный хаос: модель и демонстрация явления в вычислительном эксперименте // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2005. – Т. 13. № 1-2. – С. 123-136.

12. Измайлов И.В., Лячин А.В., Пойзнер Б.Н., Шергин Д.А. Моделирование поведения нелинейного фазового набег поля в кольцевом интерферометре: случай двухчастотного воздействия // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2005. – Т. 13. № 1-2. – С. 137-151.

13. Денисов П.Е., Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н. Модулятор лазерного излучения на основе нелинейного кольцевого интерферометра: модель и анализ характеристик // Оптика атмосферы и океана. – 2006. – Т. 19, № 2-3. – С. 238–243.

14. Слядников Е.Е., Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н., Соснин Э.А. Микроскопическая модель конформационных степеней свободы микротрубочки цитоскелета и её структурный аналог в оптике // Вычислительные технологии. – 2006. – Т. 11. № 5. – С. 92-105.

15. Измайлов И.В., Лячин А.В., Магазинников А.Л., Пойзнер Б.Н., Шергин Д.А. Моделирование преобразования лазерного пучка в двухконтурном нелинейном кольцевом интерферометре // Оптика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 20, № 3. – С. 275–282.

16. Измайлов И.В. Среда с оптической активностью, зависящей от интенсивности некогерентного света, в кольцевом интерферометре: модели процессов // Изв. вузов. Физика. – 2007. – № 6. – С. 26–34.

17. Романов И.В., Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н. Хаос и порядок в модели нелинейного оптоволоконного интерферометра: вейвлет-анализ и другие методы изучения // Оптика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 20, № 7. – С. 631–634.

18. Wave front reconstruction of an optical vortex by Hartmann-Shack sensor // F.A. Starikov, G.G. Kochemasov, I.V. Izmailov et al. / Opt. Lett. – 2007. – V. 32, Issue 16. – P. 2291–2293.

19. Aksenov V.P., Izmailov I.V., Kanev F.Yu., Starikov F.A. Algorithms for the reconstruction of the singular wave front of laser radiation: analysis and improvement of accuracy // Quantum Electronics. – 2008. –

V. 38 , № 7 – P. 673–677.

20. Голякевич Т.В., Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н., Трухан В.М., Шергин Д.А. Моделирование структур и хаоса в генераторе с протяжённым кристаллом, обладающим термозависимой оптической активностью // Изв. Томского политехнического ун-та. – 2008. – Т. 312, № 2. – С. 86–91.

21. Correction of vortex laser beam in a closed-loop adaptive system with bimorph mirror // F.A. Starikov, G.G. Kochemasov, I.V. Izmailov et al. / Opt. Lett. – 2009. – V. 34, Issue 15. – P. 2264–2266.

22. Канев Ф.Ю., Аксенов В.П., Измайлов И.В., Стариков Ф.А. Особенности восстановления фазы вихревого пучка при увеличении числа и порядка особых точек // Изв. Томского политехнического ун-та. – 2009. – Т. 315, № 2. – С. 44–48.

23. Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н. Хаос в радиотехническом устройстве с квадратичным фазовым модулятором и интерференционным усилением квазигармонического сигнала: модель и вычислительный эксперимент // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2010. – Т. 18. № 1. – С. 61–79.

24. Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н. Эксперименты с источником хаоса – радиотехническим устройством с квадратичным фазовым модулятором и интерференционным усилением квазигармонического сигнала // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2010. – Т. 18. № 2. – С. 39–50.

25. Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н. Генерация нелинейности для увеличения разнообразия систем с динамической и статической неустойчивостью // Изв. вузов. Физика. – 2010. № 2. – С. 18–21.

26. Аксёнов В.П., Измайлов И.В., Канев Ф.Ю., Пойзнер Б.Н. Определение топологического заряда оптического вихря по измерениям интенсивности сигнала на выходе интерферометра: принципы и моделирование // Оптика атмосферы и океана. – 2010. Т. 23, № 11. – С. 1036–1041.

27. Аксёнов В.П., Измайлов И.В., Канев Ф.Ю., Пойзнер Б.Н. Влияние случайного фазового экрана, имитирующего атмосферную турбулентность на работу интерферометрического детектора топологического заряда оптического вихря // Оптика атмосферы и океана. – 2010. Т. 23, № 12. – С. 1132–1136.

28. Романов И.В., Измайлов И.В., Коханенко А.П., Пойзнер Б.Н. Нелинейное подмешивание радио- и видеосигналов в системе конфиденциальной связи с использованием динамического хаоса // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318,

№ 2. Математика и механика. Физика. – С. 53–58.

29. Романов И.В., Измайлов И.В., Коханенко А.П., Пойзнер Б.Н. Моделирование зависимости отношения сигнал/шум от расстройки параметров системы связи, использующей детерминированный хаос // Изв. вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. № 5. – С. 50–55.

Статьи в рецензируемых научных журналах

30. Spatial Dynamics of optical vortexes when Gauss–Laguerre beam propagates in the Kerr nonlinear medium / V.P. Aksenov, I.V. Izmailov, B.N. Poizner, and O.V. Tikhomirova // Ukr. J. Phys. – 2004. – Vol. 49, № 5. – P. 504–511.

31. Izmailov I.V., Lyachin A.V., Poizner B.N., Shergin D.A. Discrete Maps as a Model of Spatial Deterministic Chaos // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2006. – V. 9, № 1. – P. 32–42.

32. Денисов П.Е., Измайлов И.В., Лячин А.В., Магазинников А.Л. Бифуркации в моделях нелинейного кольцевого интерферометра: влияние модулятора света и дополнительной обратной связи // Изв. вузов. Физика. – 2006. № 3. Приложение. – С. 146–149.

33. Измайлов И.В., Лячин А.В., Пойзнер Б.Н., Шергин Д.А. Пространственный детерминированный хаос – новый объект философского анализа // Sententiae: Proc. of Modern Philosophy Research Group. № 1: Chance in a modern world: dialog of science, religions, cultures. – Вінниця (Ukraine): УНИВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – P. 68–80.

34. Теоретические основы шифрации изображений с помощью двухконтурного нелинейного интерферометра / А.В. Лячин, И.В. Измайлов, Б.Н. Пойзнер, Д.А. Шергин // Оптико-электронные системы визуализации и обработки оптических изображений: Сб. статей. Вып. 2 / Под ред. В.В. Тарасова, Ю.Г. Якушенкова. – М.: Алтей и К⁰, 2007. С. 175–180.

35. Савельева А.В., Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н. Двухконтурный нелинейный кольцевой интерферометр и микротрубочка цитоскелета: поиск аналогии // Изв. вузов. Физика. – 2008. – № 9/2. – С. 206–207.

36. Измайлов И.В. Формируемая нелинейность как путь к саморазвивающимся динамическим системам // Изв. вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. № 9/2. – С. 200–201.

37. Романов И.В., Измайлов И.В., Коханенко А.П., Пойзнер Б.Н. Хаос в генераторе с запаздыванием и нелинейной характеристикой, имеющей три экстремума // Изв. вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. № 9/2. – С. 256–257.

38. Aksenov V., Izmailov I., Kanev F., and Poizner B. Detector of Optical Vortices as the Main Element of the System of Data Transfer:

Principles of Operation, Numerical Model, and Influence of Noise and Atmospheric Turbulence // International Journal of Optics. – 2012. – Vol. 2012, Article ID 568485. – 14 p. (doi:10.1155/2012/568485; с 15.09.2011 доступно в сети Интернет по адресу: <http://www.hindawi.com/journals/ijo/2012/568485/>).

Статьи в сборниках статей и трудов конференций

39. Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н. Имитация распознавания оптических вихрей нелинейно-оптической нейросетью // Научная сессия МИФИ – 2003: Сб. научных тр. 5-й Всерос. научно-технической конф. «Нейроинформатика-2003» (29–31 января 2003 г., г. Москва). В 2-х ч. – М.: МИФИ, 2003. – Ч. 1. – С. 77–84.

40. Аксёнов В.П., Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н. Лагерр-гауссов пучок в керровской нелинейной среде: организация оптических вихрей // Журнал проблем эволюции открытых систем. – Алматы: Эверо, 2003. – Вып. 5. Т 1 (январь-июнь) – С. 112-119.

41. Izmailov I.V., Poizner B.N. Property of an isodynamism as a principle of guaranteeing / Elimination of given system evolution // Proceedings of Int. Conference Physics and Control. Saint Petersburg, Russia. August 20-22, 2003 / Eds. A.L. Fradkov and A.N. Churilov. – Saint Petersburg, 2003. – Vol. 1 of 4: General problems and applications. – P. 58-63.

42. Avdeev S.M., Izmailov I.V., Poizner B.N., Shulepova A.A. “Analysis of nonlinear optical cryptosystem stability: number of keys bounding and cracking of delay time” in Fundamental Problems of Optoelectronics and Microelectronics (September 30 – October 4, 2002, Vladivostok, Russia) Y.N. Kulchin, O.B. Vitrik, Eds, Proc. of SPIE. Vol. 5129, pp. 153-161 (2003).

43. Denisov P.E., Izmailov I.V., Poizner B.N. “Bifurcation diagrams in model of nonlinear ring interferometer: periodicity and “as a fractal” areas”, in Fundamental Problems of Optoelectronics and Microelectronics (September 30 – October 4, 2002, Vladivostok, Russia) Yuri N. Kulchin, O.B. Vitrik, Eds, Proc. of SPIE. Vol. 5129, pp. 117-122 (2003).

44. Денисов П.Е., Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н. О понятии фракталоида в контексте исследования открытой кольцевой оптической системы // Проблемы эволюции открытых систем (г. Алматы, РК). – 2004. – Т. 2. Вып. 6. – С. 55–65.

45. Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н. Как обеспечить/исключить заданную эволюцию системы? // Стратегии динамического развития России: единство самоорганизации и управления. Материалы Первой международной научно-практической конференции. Т. 3. Ч. 2:

Международный симпозиум «Синергетика в решении проблем человечества XXI века: диалог школ». – М.: Проспект, 2004. – С. 67-72.

46. Izmailov I.V., Lyachin A.V., Nazarov M.E., Poizner B.N., Shergin D.A. Second circuit of two-dimensional feedback loop in ring interferometer as a way to create coupled oscillators system or couplings in a oscillator // Proc. of IEEE / Ed. by A.L. Fradkov and A.N. Churilov. Cat. № 05EX1099C: Proc. of 2-nd Int. Conference «Physics and Control» (August 24-26, 2005, S.-Petersburg). – Saint Petersburg, 2005. – P. 841-846; <http://www.ieee.org>.

47. Izmailov I.V., Lyachin A.V., and Poizner B.N. “Three-photons absorption as a regulator of Kerr's effect strength in ring interferometer: a model and regimes analysis”, in Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics II (13–16 September 2004, Khabarovsk, Russia) Y.N. Kulchin Ed., Proc. of SPIE. Vol. 5851, pp. 74–81 (2005).

48. Nonlinearity with saturation in the ring interferometer model: stability, bifurcation behaviour, attractor dimension / Denisov P.E., Izmailov I.V., Lyachin A.V., Poizner B.N., Shergin D.A., in Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics II (13–16 September 2004, Khabarovsk) Y.N. Kulchin Ed., Proc. of SPIE. Vol. 5851, pp. 82–89 (2005).

49. Izmailov I.V., Poizner B.N., and Romanov I.V. “Nonlinear optical fiber interferometer: a model and simulation”, in Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics II (13–16 September 2004, Khabarovsk, Russia) Y.N. Kulchin Ed., Proc. of SPIE. Vol. 5851, pp. 90–95 (2005).

50. Aksenov V.P., Izmailov I.V., Kanev F.Yu., and Starikov F.A. Localization of optical vortices and reconstruction of wavefront with screw dislocations // Proc. of SPIE. 2005. – Vol. 5894. – pp. 68-78.

51. Izmailov I.V., Lyachin A.V. Simulation of complex dynamics in the ring resonator with account of multi-photons processes // Frontiers of nonlinear physics: Proc. of the 2nd Int. Conf. (Nizhny Novgorod – St.-Petersburg, Russia, 5 – 12 July, 2004) / Ed. A. Litvak. – Nizhny Novgorod, Russia, Institute of Applied Physics RAS, 2005 – P. 393-398.

52. Aksenov V.P., Izmailov I.V., Kanev F.Yu. “Algorithms of a singular wavefront reconstruction”, in The 5-th International Workshop on Adaptive optics for Industry and Medicine (29 August – 1 September 2005, Beijing, China) W. Jiang Ed., Proc. of SPIE. Vol. 6018. – SPIE, Bellingham, WA, 2005. – P. 60181B-1–60181B-11.

53. Aksenov V., Izmailov I., Kanev F., Starikov F. “Performance of a wavefront sensor in the presence of singular points”, in Speckle06: Speckles, from grains to flowers (13–15 September 2006, Nimes,

France), P. Slangen, Ch. Cerruti Eds., Proc. of SPIE. Vol. 6341. – SPIE, Bellingham, WA, 2006. – P. 634133-1–634133-6.

54. Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н., Слядников Е.Е., Соснин Э.А. О возможности вычислений в белковом нанополимере с позиций квантовой механики и нелинейной оптики // Материалы международной научной конференции «Информационные технологии в современном мире» – Ч. 1 – Таганрог: ТРТУ, 2006. – С. 19–23.

55. Шергин Д.А., Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н. Модели шифраторов на основе кольцевых интерферометров с керровской и оптически активной средами // Материалы международной научной конференции «Информационные технологии в современном мире» – Ч. 4 – Таганрог: ТРТУ, 2006. – С. 85–89.

56. Haliakovich T.V., Izmailov I.V., Poizner B.N., Trukhan V.M., Shergin D.A. “Synergetics of optical activity and field in the model of ring resonator with CdP₂ crystal” in The Int. Conf. ICONO 2007 (28 May – 1 June, 2007, Minsk, Belarus): Nonlinear Space-Time Dynamics. Yu. Kivshar, N. Rosanov Eds. Proc. of SPIE Vol. 6725, pap. 672526. (2007).

57. Izmailov I.V., Poizner B.N., Romanov I.V., Shergin D.A. Nonlinear-dynamic systems of confidential communication: classification, simulation, experiment // Proc. of the 6th EUROMECH Nonlinear Dynamics Conf. (ENOC 2008) (Saint Petersburg, Russia, 30 June – 4 July, 2008). – Vol. Label: ENOC2008 (137 480 192 bytes); текстовые файлы (pdf\enoc\c7p305r283.pdf (6 p., 224 538 bytes)). – Saint Petersburg: European mechanics society, 2008. – 1 CD-ROM / 12см. – Системные требования: IBM PC; монитор / Windows 9x.

58. Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н. Понятие управляемого онтогенеза технических динамических систем: контекст и содержание // Матер. междунар. науч. конф. «Информация, сигналы, системы: вопросы методологии, анализа и синтеза» (2008 г., г. Таганрог). – Ч. 1. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008. – С. 41–47.

59. Быков И.В., Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н. Управляемая сигналом нелинейность как средство развития колебательно-волновых динамических систем: принцип и моделирование // Матер. междунар. науч. конф. «Информационное общество: идеи, технологии, системы» (май 2010 г., г. Таганрог). Ч. 3. – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2010. – С. 12–21.