

*На правах рукописи*



**КУЛЬМИНСКИЙ Данил Дмитриевич**

**АНСАМБЛИ ХАОТИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ С ЗАПАЗДЫВАЮЩЕЙ  
ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ (РЕКОНСТРУКЦИЯ, КОЛЛЕКТИВНАЯ  
ДИНАМИКА И ПРИЛОЖЕНИЯ)**

01.04.03 –Радиофизика

Автореферат  
диссертация на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

**Саратов – 2017**

Работа выполнена на кафедре динамического моделирования и биомедицинской инженерии ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» и в Саратовском филиале ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН»

Научный руководитель:

**Прохоров Михаил Дмитриевич**,  
доктор физико-математических наук,  
профессор РАН,  
ФГБУН «Институт радиотехники и  
электроники им. В.А. Котельникова РАН»,  
Саратовский филиал,  
заведующий лабораторией моделирования  
в нелинейной динамике

Официальные оппоненты:

**Купцов Павел Владимирович**,  
доктор физико-математических наук,  
доцент,  
ФГБОУ ВО «Саратовский  
государственный технический университет  
имени Гагарина Ю.А.»,  
профессор кафедры «Приборостроение»

**Голдобин Денис Сергеевич**,  
кандидат физико-математических наук,  
ФГБУН «Институт механики сплошных  
сред Уральского отделения РАН»,  
старший научный сотрудник

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Нижегородский  
национальный исследовательский  
государственный университет им.  
Н.И. Лобачевского»

Защита диссертации состоится «15» февраля 2018 г. в 15 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.243.01 при Саратовском национальном исследовательском государственном университете имени Н.Г. Чернышевского по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, III учебный корпус, Большая физическая аудитория.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

Автореферат разослан «\_\_» ноября 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



В.М. Аникин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность исследуемой проблемы

Исследование сложной динамики в малых ансамблях осцилляторов<sup>1</sup> и в больших сетях колебательных систем с нетривиальной топологией<sup>2</sup> давно привлекает к себе большое внимание. Известно, что коллективная динамика существенно зависит от структуры и интенсивности связей в ансамбле. В частности, связи определяют виды синхронизации, простоту или сложность динамики, образование различных пространственно-временных структур<sup>3,4,5</sup>. Помимо «прямой» задачи исследования динамики ансамблей с заданными связями, на практике важна «обратная» задача определения характера связей по наблюдаемому поведению осцилляторов – временным рядам динамических переменных<sup>6</sup>. Решение таких задач возможно только с использованием современных подходов, использующих методы радиофизики, математической статистики и нелинейной динамики. Важную роль в процессе решения «обратной» задачи играет разработка и использование специализированных подходов, направленных на исследование определенных классов систем с максимальным использованием априорной информации об объекте исследования. Сложность практической реализации подобных методов связана с рядом особенностей экспериментальных данных, которые зачастую характеризуются широким спектром, хаотичностью, нестационарностью, шумами и искажениями различной природы.

Одним из важных классов объектов, для работы с которыми требуется развивать специализированные подходы и методы, являются системы с запаздывающей обратной связью, которые очень широко распространены в природе и технике<sup>7,8</sup>. Уравнениями с запаздыванием описываются многие радиофизические, оптические, биологические системы и другие объекты. Сложность решения востребованной на практике задачи идентификации структуры взаимодействий и собственных параметров элементов в сетях,

---

<sup>1</sup> Матросов В.В., Шалфеев В.Д. Динамический хаос в фазовых системах. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2007. –258 с.

<sup>2</sup> Boccaletti S., Latora V., Moreno Y., Chavez M., Hwang D.-U. Complex networks: Structure and dynamics // Physics Reports. –2006. –V. 424. –P.175-308.

<sup>3</sup> Анищенко В.С., Астахов В.В., Вадивасова Т.Е., Нейман А.Б., Стрелкова Г.И., Шиманский-Гайер Л. Нелинейные эффекты в хаотических и стохастических системах. Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. –544 с.

<sup>4</sup> Пиковский А.С., Розенблюм М.Г., Куртс Ю. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. Москва: Техносфера, 2003. –496 с.

<sup>5</sup> Osipov G.V., Kurths J., Zhou C. Synchronization in oscillatory networks. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. –370 p.

<sup>6</sup> Bezruchko B.P., Smirnov D.A. Extracting knowledge from time series: An introduction to nonlinear empirical modeling. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. –410 p.

<sup>7</sup> Kuang Y. Delay Differential Equations with Applications in Population Dynamics. Boston: Academic Press, 1993. – 398 p.

<sup>8</sup> Erneux T. Applied Delay Differential Equations. New York: Springer-Verlag, 2009. –204 p.

состоящих из систем с запаздыванием, определяется тем, что даже простые несвязанные между собой системы с запаздыванием могут демонстрировать хаотические колебания очень высокой размерности. При этом универсальные подходы оказываются неэффективными, и для восстановления уравнений систем с задержкой приходится разрабатывать специальные методики<sup>9</sup>. Решение этой проблемы важно не только для предсказания поведения ряда практически важных устройств и систем с запаздыванием при изменении параметров, но и для оценки адекватности заложенных в модели представлений об объекте, классификации систем и режимов их функционирования, определения значений параметров, недоступных непосредственному измерению в эксперименте.

Вызывает также интерес использование хаотических систем с запаздывающей обратной связью в системах передачи информации. Разработка коммуникационных систем, использующих хаотические сигналы, представляет собой активно развиваемое направление радиофизики<sup>10</sup>. Способность даже систем первого порядка с запаздыванием генерировать широкополосные хаотические колебания очень высокой размерности привлекает к ним внимание как к потенциальным объектам, которые могут быть использованы в системах скрытой передачи информации. Однако вопрос о маскирующих свойствах хаотических сигналов систем с запаздыванием остается открытым и требует тщательного исследования.

Таким образом, тема диссертационного исследования охватывает фундаментальные вопросы радиофизики, нелинейной динамики и теории колебаний и является актуальной.

**Целью диссертационной работы** является выявление особенностей коллективной динамики ансамблей генераторов с запаздывающей обратной связью посредством радиофизических и численных экспериментов, разработка методов восстановления модельных уравнений связанных систем с задержкой, а также построение систем передачи информации на основе генераторов с запаздыванием.

Для достижения этой цели решались следующие **основные задачи**:

1. Разработка нового метода восстановления архитектуры связей и параметров элементов в ансамблях связанных осцилляторов, описываемых дифференциальными уравнениями с запаздыванием, по временным рядам.
2. Экспериментальное и численное исследование особенностей

---

<sup>9</sup> Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Караваев А.С., Безручко Б.П. Системы с запаздыванием (реконструкция моделей и их приложения). Саратов: Изд-во Саратовского университета, 2016. –328 с.

<sup>10</sup> Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. Москва: Физматлит, 2002. –252 с.

коллективной динамики осцилляторов в ансамблях бистабильных систем с запаздывающей обратной связью, глобально связанных между собой через общее поле.

3. Разработка и создание систем скрытой передачи информации на основе хаотических систем с запаздыванием.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Предложенный метод восстановления архитектуры связей и собственных параметров элементов в ансамблях связанных осцилляторов, моделируемых дифференциальными уравнениями первого порядка с запаздыванием, основанный на минимизации целевых функций, описывающих результат реконструкции каждого осциллятора ансамбля, и разделении восстановленных коэффициентов связи на значимые и незначимые, обеспечивает гарантированное качество реконструкции времен запаздывания, параметров инерционности, нелинейных функций и коэффициентов связи между элементами ансамбля по хаотическим временным рядам их колебаний.

2. В ансамбле идентичных бистабильных осцилляторов с запаздыванием, связанных между собой через общее поле, при соответствующем выборе параметров и начальных условий формируется два кластера, в одном из которых осцилляторы совершают колебания на основной моде, а в другом на третьей гармонике основной моды. Изменяя параметры общего поля, можно управлять поведением осцилляторов внутри кластеров и получать колебательные режимы, при которых осцилляторы демонстрируют синхронное поведение в обоих кластерах, осцилляторы в обоих кластерах колеблются несинхронно, осцилляторы в одном из кластеров синхронны, а в другом кластере несинхронны.

3. Разработанная система передачи информации, основанная на использовании режима обобщенной синхронизации и содержащая лишь одну ведомую автоколебательную систему в приемнике, позволяет избежать технических трудностей при построении систем связи на основе обобщенной синхронизации, обусловленных необходимостью обеспечить в эксперименте идентичность двух генераторов в приемнике. Диагностику режима обобщенной синхронизации между ведущей и ведомой системами в предложенной схеме связи можно осуществить, воздействуя на ведомую систему поочередно хаотическим сигналом ведущей системы и задержанной копией этого сигнала.

### **Научная новизна**

Предложен новый метод идентификации структуры взаимодействий и оценки собственных параметров элементов в ансамблях связанных систем с

задержкой, основанный на минимизации специальным образом введенной целевой функции.

Впервые исследовано влияние инерционных свойств и запаздывания общего поля на коллективную динамику осцилляторов в ансамбле идентичных бистабильных систем с запаздывающей обратной связью, глобально связанных между собой через общее поле. Обнаружены и исследованы многочисленные колебательные режимы в таком ансамбле.

Предложены и экспериментально реализованы новые системы передачи информации на основе синхронизации хаотических генераторов с запаздыванием. Исследована эффективность разработанных систем связи при расстройке параметров приемника и передатчика, наличии шума и затухании сигнала в канале связи.

Предложен метод для диагностики обобщенной хаотической синхронизации между связанными автоколебательными системами, не требующий использования вспомогательной системы.

### **Научная и практическая значимость работы**

Предложенный в диссертационной работе метод реконструкции ансамблей связанных систем с запаздыванием позволяет определить структуру взаимодействий и восстановить с высокой точностью собственные параметры всех осцилляторов ансамбля, включая времена запаздывания, параметры инерционности, нелинейные функции и коэффициенты связи. Метод обладает высоким быстродействием и применим для восстановления ансамблей, состоящих из неидентичных систем с запаздыванием с произвольным числом однонаправленных и взаимных связей между ними, в том числе при умеренных уровнях шума.

Выявлены особенности коллективной динамики осцилляторов в ансамбле идентичных бистабильных генераторов с запаздывающей обратной связью, глобально связанных между собой через общее поле. Показано, что изменяя параметры общего поля, можно управлять поведением осцилляторов в ансамбле и контролировать колебательные режимы, в том числе состояния «химера». Обнаруженные особенности состояний «химера» могут оказаться полезными для объяснения ряда феноменов реального мира, поскольку глобальная связь осцилляторов является достаточно распространенной в многоэлементных системах различной природы, а запаздывание присуще многим объектам и процессам.

Разработаны экспериментальные системы передачи информации на основе синхронизации хаотических генераторов с запаздыванием, которые позволяют повысить устойчивость к шуму и к затуханию сигнала в канале связи по

сравнению с другими экспериментальными системами передачи информации, использующими хаотическую синхронизацию для передачи скрытого сообщения через аналоговый канал связи.

Разработанные системы передачи информации обладают такими преимуществами, как относительная простота технической реализации, способность маскировать и выделять информационный сигнал в реальном времени с небольшой задержкой, возможность скрытия не только самой информации, но и факта ее передачи. Практическое применение таких систем передачи может быть востребовано в сфере проводной и беспроводной служебной связи охранных структур, а также при конфиденциальной передаче информации коммерческого значения и биомедицинских данных.

Предложена схема связи на основе обобщенной синхронизации, позволяющая обойтись без использования вспомогательной системы в приемнике. Это позволяет избежать технических трудностей создания систем передачи информации на основе обобщенной синхронизации, связанных с необходимостью обеспечить в эксперименте идентичность двух генераторов в приемнике.

**Достоверность научных результатов** подтверждается их воспроизводимостью в численном и радиофизическом эксперименте, хорошей согласованностью между собой и с результатами других авторов.

#### **Личный вклад**

Основные результаты диссертации получены автором лично. Автором были созданы экспериментальные установки ансамблей генераторов с запаздывающей обратной связью, а также лабораторные макеты систем передачи информации. Планирование и постановка экспериментов осуществлялись совместно с научным руководителем и другими соавторами. В совместных работах автором выполнялись экспериментальные измерения и компьютерные расчеты, включая обработку экспериментальных данных. Постановка задач, разработка методов их решения, объяснение и интерпретация результатов осуществлялись совместно с руководителем и другими соавторами.

#### **Апробация работы**

По теме диссертации опубликовано 23 работы, в том числе 12 статей в журналах, рекомендованных ВАК. Результаты были представлены и обсуждались на всероссийской школе «Нелинейные волны» (Нижний Новгород, 2016); международных школах «Хаотические автоколебания и образование структур» – ХАОС (Саратов, 2013, 2016); всероссийской школе-семинаре «Физика и применение микроволн» (Можайск, 2013); научных

конференциях «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (Саратов, 2012–2017); всероссийской школе-конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Современные проблемы электроники СВЧ и ТГц диапазонов» (Саратов, 2015); всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь» (Москва, 2015); на международной конференции «Conference on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems (NDES 2015)» (Комо, Италия, 2015); на научных семинарах Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского.

Проведенные исследования были поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований (2013–2017), Российским научным фондом (с 2016 г.), фондом некоммерческих программ «Династия» (2014).

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Она содержит 140 страниц, включая 45 рисунков и список литературы из 135 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность рассматриваемых в работе проблем, определяются цели и основные задачи исследования, кратко описывается содержание глав работы, формулируются результаты и положения, выносимые на защиту, раскрывается научная новизна и научно-практическое значение полученных результатов, их достоверность и личный вклад соискателя.

**В первой главе** предложен новый эффективный метод, позволяющий восстановить архитектуру связей и собственные характеристики элементов в ансамблях, состоящих из связанных между собой осцилляторов с запаздыванием, описываемых уравнением следующего вида:

$$\varepsilon_i \dot{x}_i(t) = -x_i(t) + f_i(x_i(t - \tau_i)) + \sum_{j=1(j \neq i)}^D k_{i,j} (x_j(t) - x_i(t)), \quad (1)$$

где  $i = 1 \dots N$ ,  $N$  — число элементов в ансамбле,  $\varepsilon_i$  — инерционность  $i$ -го элемента ансамбля,  $\tau_i$  — время запаздывания,  $f_i$  — нелинейная функция,  $k_{i,j}$  — коэффициенты связи, характеризующие воздействие  $j$ -го элемента на  $i$ -й.

Метод основан на минимизации методом наименьших квадратов целевых функций, описывающих результат реконструкции каждого осциллятора ансамбля. Введенные целевые функции характеризуют расстояние между точками каждой реконструируемой нелинейной функции, отсортированными

по величине абсциссы. Предложенный подход позволяет с высокой точностью восстановить времена запаздывания, параметры инерционности, нелинейные функции и коэффициенты связи между элементами ансамбля по хаотическим временным рядам их колебаний. Метод имеет высокую вычислительную эффективность за счет использования неитерационных алгоритмов, при этом оценки коэффициентов связи и параметров инерционности оказываются несмещенными.

На рис. 1 приведены зависимости целевых функций от пробного времени запаздывания для каждого генератора цепочки, состоящей из 10 однонаправлено связанных радиотехнических генераторов с запаздывающей обратной связью. Глобальные минимумы зависимостей  $L_i^2(\tau_i')$  наблюдаются при истинных временах запаздывания генераторов.

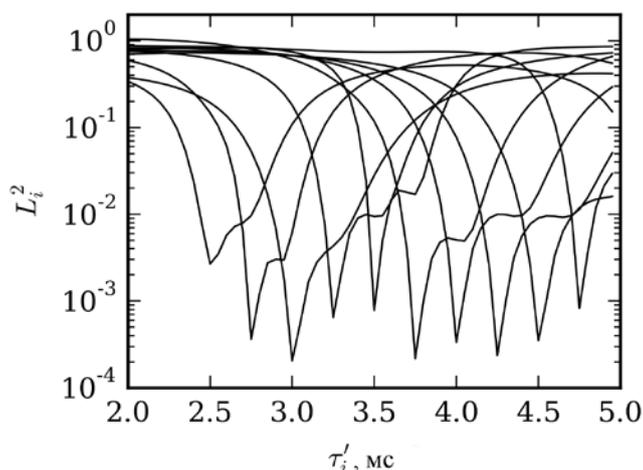


Рис. 1. Зависимости целевых функций от пробного времени задержки для экспериментальных хаотических генераторов с запаздыванием, связанных в цепочку.

Для оценки значимости восстановленных коэффициентов связи между осцилляторами ансамбля предложены два подхода. Первый из них основан на разделении восстановленных коэффициентов связи на значимые и незначимые с помощью метода  $K$ -средних, а второй – на построении зависимости суммы целевых функций всех элементов ансамбля от количества коэффициентов связи в модельных уравнениях. При этом во втором подходе в модель последовательно добавляется по одному восстановленному коэффициенту связи в порядке уменьшения их абсолютного значения и рассчитывается сумма  $\Lambda$  целевых функций на каждом шаге. По мере учета в модели все большего числа  $M$  реально существующих связей она становится все более точной, а сумма целевых функций при этом уменьшается. Показано, что эта сумма практически перестает меняться, когда в модели уже учтены все реально

существующие связи, рис. 2. При  $M = 9$  величина  $\Lambda$  на рис. 2 практически достигает своего минимального значения. Оставив только 9 самых больших по модулю восстановленных коэффициентов связи и удалив все остальные незначимые коэффициенты, удастся точно восстановить архитектуру связей в цепочке.

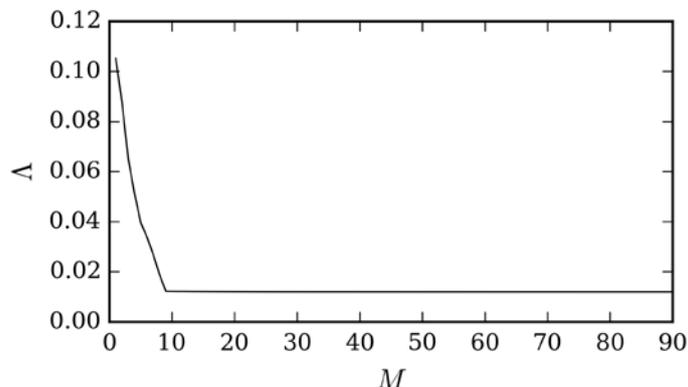


Рис. 2. Зависимость  $\Lambda(M)$  для цепочки из 10 однонаправленно связанных экспериментальных хаотических генераторов с запаздыванием.

Предложенный метод можно применять для реконструкции ансамблей, состоящих из неидентичных систем с запаздыванием с произвольным числом однонаправленных и взаимных связей между ними. Эффективность метода продемонстрирована на примере хаотических экспериментальных временных рядов цепочки резистивно связанных радиотехнических генераторов с запаздыванием, а также на примере временных рядов ансамблей диффузионно связанных модельных систем с запаздыванием со сложной архитектурой связей, в том числе при наличии шума. Метод может быть также применен для реконструкции ансамблей с другими типами связи элементов, например, для ансамблей, состоящих из систем с запаздыванием, связанных через производную или через общее поле.

**Во второй главе** экспериментально и численно исследованы особенности коллективной динамики в ансамбле идентичных бистабильных систем с запаздывающей обратной связью, связанных между собой через общее поле. Разнообразие колебательных режимов в исследованном ансамбле обусловлено тем, что бистабильные состояния парциальных элементов имеют существенно различающиеся основные частоты колебаний. Один из бистабильных режимов реализуется на основной моде колебаний системы с запаздыванием, а другой колебательный режим реализуется на третьей гармонике основной моды. Вид колебательного режима в исследуемом ансамбле зависит от выбора начальных условий в связанных осцилляторах.

Рассмотрены различные способы формирования общего поля, осуществляющего глобальную связь осцилляторов, и различные способы его воздействия на кольцевые осцилляторы с запаздыванием. На рис. 3 представлена блок-схема ансамбля экспериментальных генераторов с запаздыванием, связанных через общее поле, для случая, когда сигнал общего поля  $G(t)$  подается на каждый генератор между фильтром и линией задержки в качестве внешнего воздействия. При этом динамика каждого из генераторов описывается уравнением

$$\varepsilon \dot{x}_i(t) = -x_i(t) + f(x_i(t - \tau) + kG(t - \tau)), \quad (2)$$

где  $k$  — коэффициент связи. Общее поле формируется путем сложения сигналов  $x_i(t)$  всех генераторов при помощи суммирующего усилителя с коэффициентом передачи  $k$  и нормировки суммарного сигнала на число генераторов. Полученный таким образом сигнал проходит через линейную фазосдвигающую цепочку, представляющую собой два последовательно соединенных низкочастотных  $RC$ -фильтра первого порядка. В этом случае общее поле  $G(t)$  описывается уравнением

$$\gamma_1 \gamma_2 \ddot{G}(t) + (\gamma_1 + \gamma_2) \dot{G}(t) + G(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t), \quad (3)$$

где  $\gamma_1 = R_1 C_1$ ,  $\gamma_2 = R_2 C_2$ .

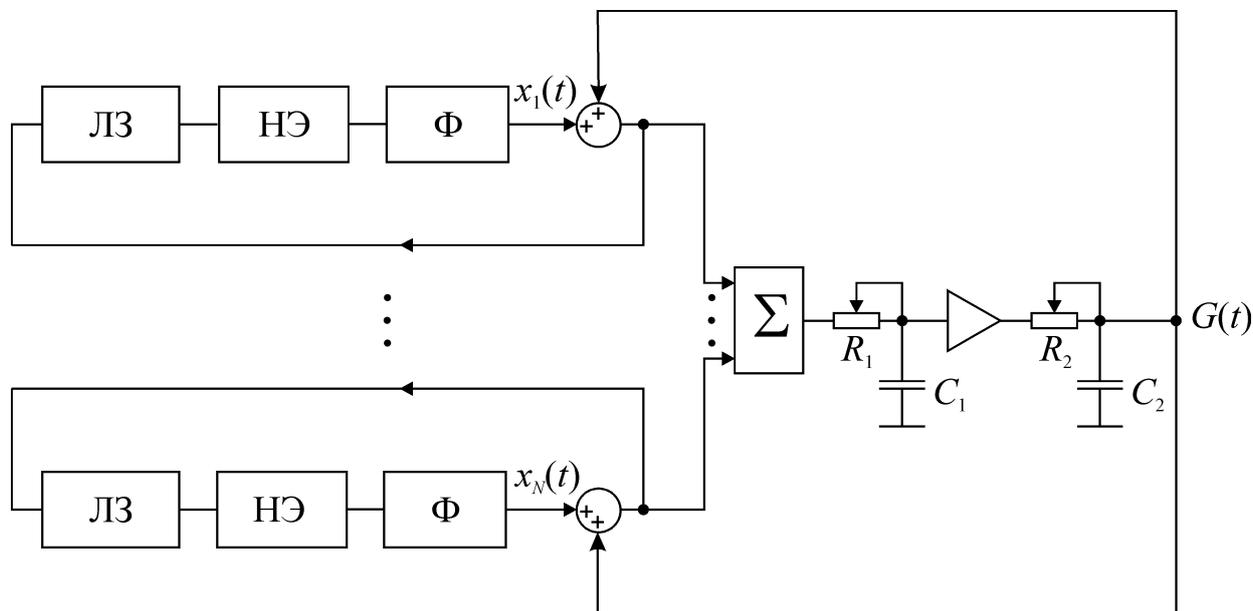


Рис. 3. Блок-схема ансамбля экспериментальных генераторов с запаздыванием, глобально связанных через общее поле. Показаны только первый и  $N$ -й генераторы. ЛЗ — линии задержки, НЭ — нелинейные элементы, Ф — фильтры,  $\Sigma$  — суммирующий усилитель.

В работе наиболее подробно экспериментально исследован ансамбль, состоящий из 8 идентичных бистабильных генераторов, часть из которых

совершает периодические колебания на основной моде, а другая часть совершает хаотические колебания на третьей гармонике основной моды. В этом случае элементы ансамбля разделены на два кластера, отличающиеся основной частотой колебаний осцилляторов. Поведение элементов внутри каждого кластера определяется величиной фазового сдвига  $\Delta\varphi$  сигнала общего поля  $G(t)$  относительно  $x_i(t)$ . При  $|\Delta\varphi| < \pi/2$  связь через общее поле является притягивающей, и элементы ансамбля синхронизируются между собой после переходного процесса, а при  $\pi/2 < |\Delta\varphi| < 3\pi/2$  связь является отталкивающей и элементы колеблются несинхронно. В случае, когда связь оказывается притягивающей для элементов одного кластера и отталкивающей для элементов другого кластера, в ансамбле возникает состояние «химера», при котором одновременно существуют кластер с синхронным и кластер с несинхронным поведением элементов. Таким образом, изменяя параметры общего поля, можно управлять поведением осцилляторов внутри кластеров, в том числе, контролировать состояния «химера».

Для случая, когда оба кластера содержат по 4 генератора, на рис. 4 показаны мгновенные значения напряжения  $x_i(t)$  в генераторах для трех возможных ситуаций. Генераторы, совершающие периодические колебания, обозначены номерами 1–4, а генераторы, совершающие хаотические колебания, обозначены номерами 5–8. В синхронных режимах генераторы, входящие в один кластер, имеют близкие мгновенные значения напряжения  $x_i(t)$ , рис. 4(а). В несинхронных режимах мгновенные значения напряжения заметно отличаются как у периодических, так и у хаотических генераторов, рис. 4(в). Рисунок 4(б) соответствует состоянию «химера», при котором периодические генераторы синхронны, а хаотические несинхронны.

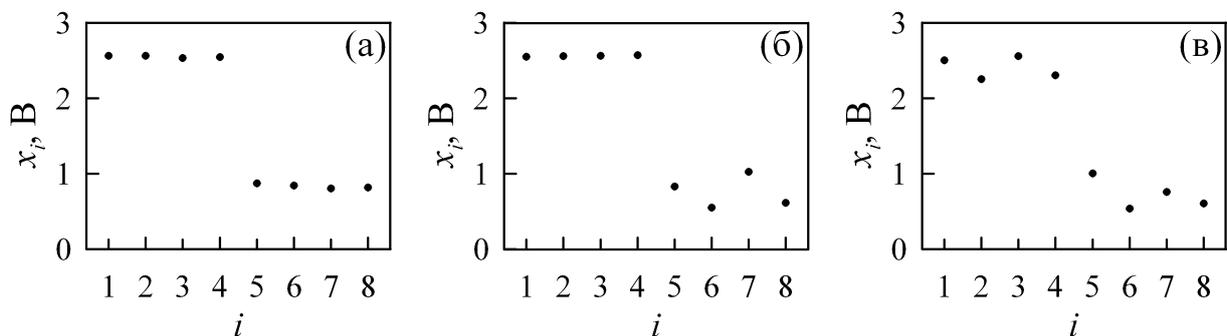


Рис. 4. Мгновенные значения напряжения  $x_i(t)$  в каждом из 8 связанных экспериментальных генераторов при  $|\Delta\varphi_1| = 0.002\pi$ ,  $|\Delta\varphi_2| = 0.006\pi$  (а),  $|\Delta\varphi_1| = 0.47\pi$ ,  $|\Delta\varphi_2| = 0.51\pi$  (б) и  $|\Delta\varphi_1| = 0.8\pi$ ,  $|\Delta\varphi_2| = 0.99\pi$  (в);  $\Delta\varphi_1$  и  $\Delta\varphi_2$  — фазовые сдвиги сигнала  $G(t)$  для генераторов, совершающих периодические и хаотические колебания, соответственно.

Качественно похожие результаты можно получить для случаев, когда оба бистабильных состояния осцилляторов ансамбля являются периодическими или оба состояния являются хаотическими. Следует лишь отметить, что в случае притягивающей связи идентичные периодические осцилляторы демонстрируют полную синхронизацию, а хаотические осцилляторы демонстрируют фазовую синхронизацию.

Исследовано влияние запаздывания общего поля на коллективную динамику осцилляторов ансамбля. Рассмотрен случай, когда общее поле в уравнении (2) имеет вид:

$$G(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t - \tau_m), \quad (4)$$

где  $\tau_m$  — собственное время запаздывания общего поля. На рис. 5 построены зависимости  $\Delta\varphi_1(\tau_m)$  и  $\Delta\varphi_2(\tau_m)$ . При различных  $\tau_m$  осцилляторы ансамбля демонстрируют 4 режима колебаний, области существования которых обозначены на рис. 5 как SS, CS1, CS2 и AS. При значениях  $\tau_m$  из области SS имеет место синхронизация осцилляторов в первом кластере и синхронизация осцилляторов во втором кластере. В области AS колебания осцилляторов в обоих кластерах являются несинхронными. В областях CS1 и CS2 существуют 2 различных состояния «химера». В первом из них периодические осцилляторы в первом кластере, совершающие колебания на основной моде, синхронны, а хаотические осцилляторы во втором кластере, совершающие колебания на третьей гармонике основной моды, несинхронны. Во втором состоянии «химера», наоборот, периодические осцилляторы несинхронны, а хаотические синхронны.

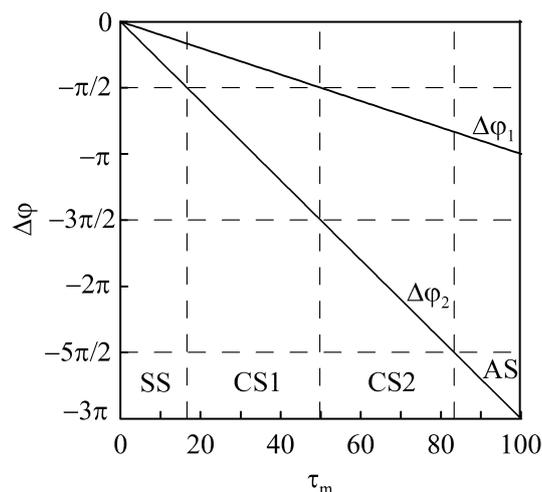


Рис. 5. Зависимости фазовых сдвигов  $\Delta\varphi_1$  и  $\Delta\varphi_2$  от  $\tau_m$  для частотных составляющих сигнала  $G(t)$ , соответствующих колебаниям на основной моде и на третьей гармонике основной моды, соответственно.

**Третья глава** посвящена приложению связанных хаотических генераторов с запаздывающей обратной связью для построения систем скрытой передачи информации. В диссертационной работе разработана и экспериментально реализована система цифровой передачи информации с нелинейным подмешиванием информационного сигнала к хаотическому сигналу генератора с запаздывающей обратной связью, в которой передатчик и приемник реализованы на программируемых микроконтроллерах. Показано, что разработанная система связи позволяет без заметных искажений передавать и принимать в реальном времени речевые и музыкальные сигналы. Высокое качество приема скрытого информационного сигнала достигается за счет использования в передатчике и приемнике цифровых элементов, обеспечивающих идентичность параметров, и хорошую помехоустойчивость, типичную для цифровых систем передачи информации. Исследована возможность выделения полезной информации из хаотической несущей при расстройке параметров приемника и передатчика предложенной схемы. Установлено, что для выделения скрытого информационного сигнала расстройка параметров не должна превышать 1%, что обуславливает конфиденциальность предложенной системы связи.

Разработана и экспериментально реализована новая система скрытой передачи информации, основанная на генераторе с запаздывающей обратной связью с переключением хаотических режимов. Управляющий параметр, в качестве которого используется время запаздывания передающего генератора, подвергается модуляции бинарным информационным сигналом. Эта система связи использует хаотическую синхронизацию приемника и передатчика и имеет аналоговый канал связи. По сравнению с классической системой связи с переключением хаотических режимов, предложенная схема имеет более высокую устойчивость к шумам и затуханию сигнала в канале связи за счет введения дополнительных элементов (детекторов и компаратора) в приемник и разработанной процедуры дополнительной обработки сигнала.

Построены экспериментальные зависимости вероятности ошибки на бит при передаче бинарного информационного сигнала от отношения сигнал/шум, от величины затухания аналогового хаотического сигнала в канале связи и от длины интервала времени, в течение которого передается каждый бит. Исследовано влияние расстройки параметров генераторов хаоса, используемых в приемнике и передатчике, на качество передачи скрытого информационного сигнала. С помощью построения отображений последования и метода восстановления времени задержки, основанного на статистическом анализе экстремумов временного ряда, исследована конфиденциальность предложенной экспериментальной системы связи.

Предложена оригинальная система передачи информации, основанная на использовании режима обобщенной синхронизации. В отличие от других систем связи на основе обобщенной синхронизации, предложенная схема содержит лишь одну ведомую автоколебательную систему в приемнике. Отсутствие вспомогательной системы в приемнике позволяет избежать технических трудностей, характерных для основанных на обобщенной синхронизации систем связи, которые обусловлены необходимостью обеспечить в эксперименте идентичность двух генераторов в приемнике. Блок-схема предложенной системы передачи информации представлена на рис. 6.

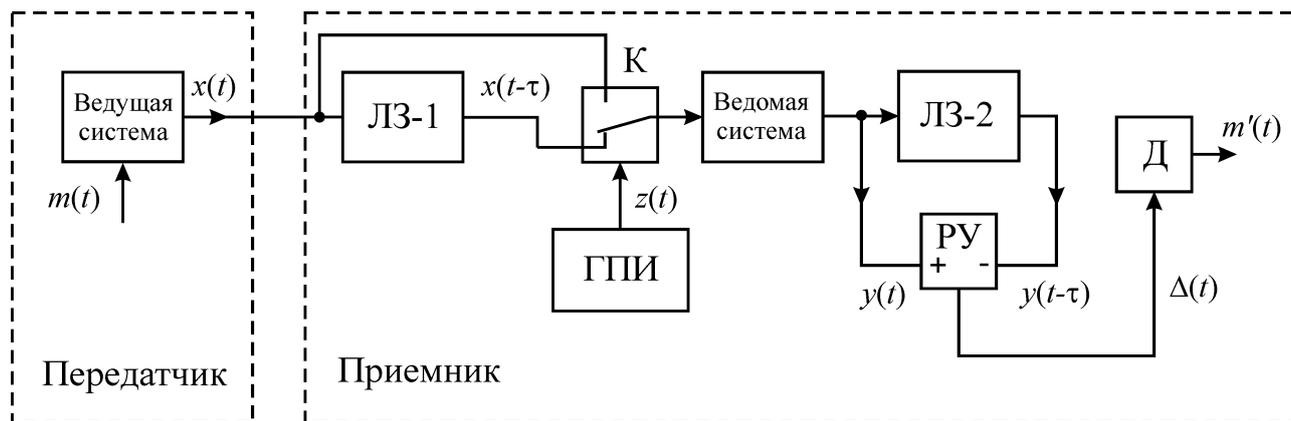


Рис. 6. Блок-схема системы передачи информации на основе обобщенной синхронизации. (ЛЗ-1 и ЛЗ-2) линии задержки, (ГПИ) генератор прямоугольных импульсов, (К) коммутатор, (РУ) разностный усилитель, (Д) детектор.

Для диагностики режима обобщенной синхронизации между ведущей системой (передатчиком) и ведомой системой (приемником) предложено поочередно воздействовать на ведомую систему хаотическим сигналом  $x(t)$  ведущей системы и задержанной копией этого сигнала  $x(t - \tau)$ . Переключения сигнала воздействия на ведомую систему осуществляет коммутатор, который управляется сигналом  $z(t)$  генератора прямоугольных импульсов. В отсутствие обобщенной синхронизации динамика ведомой системы оказывается разной при воздействии на нее два раза одним и тем же хаотическим сигналом, а при наличии обобщенной синхронизации ведомая система демонстрирует после переходного процесса одинаковые колебания в обоих случаях.

Работоспособность предложенной системы передачи информации продемонстрирована для случая, когда в качестве ведущей и ведомой систем использованы генераторы с запаздывающей обратной связью. Проведены численные исследования предложенной схемы связи. Показано, что она обладает высокой устойчивостью к шумам в канале связи. Разработанная система передачи информации реализована в радиофизическом эксперименте. Показана ее эффективность при передаче бинарного информационного сигнала.

На рис. 7 приведены фрагменты экспериментальных временных реализаций разностного сигнала  $\Delta(t) = y(t) - y(t - \tau)$ , информационного сигнала  $m(t)$  и управляющего сигнала  $z(t)$ . При передаче бита 1 амплитуда колебаний сигнала  $\Delta(t)$  практически не зависит от амплитуды сигнала  $z(t)$ , что свидетельствует об отсутствии обобщенной синхронизации между ведущей и ведомой системами. При передаче бита 0 амплитуда колебаний сигнала  $\Delta(t)$  резко уменьшается при изменении  $z(t)$ , что является признаком существования обобщенной синхронизации между ведущей и ведомой системами.

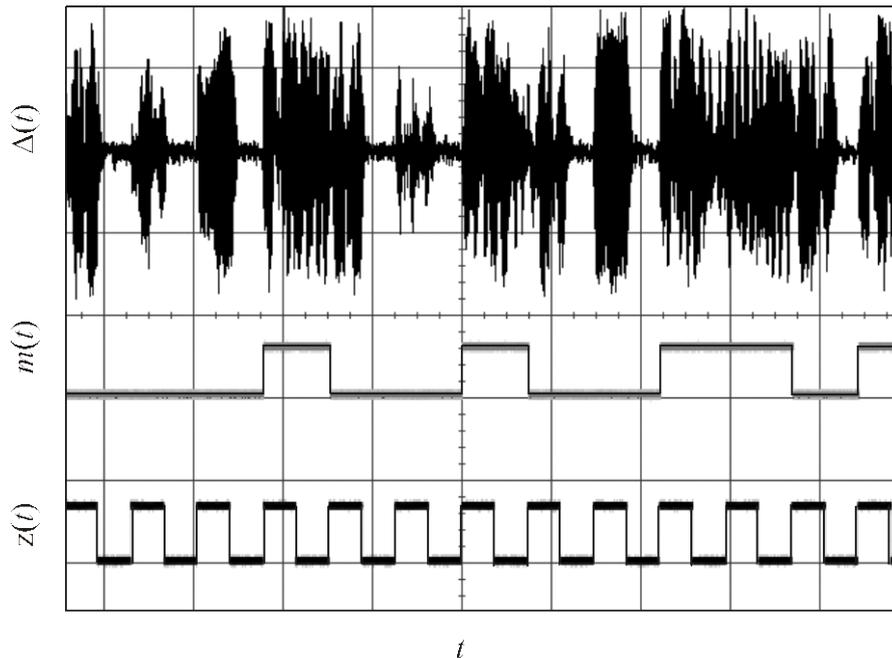


Рис. 7. Осциллограммы временных реализаций разностного сигнала  $\Delta(t)$ , информационного сигнала  $m(t)$  и сигнала  $z(t)$  генератора прямоугольных импульсов.

Разработана модифицированная система передачи информации на эффекте обобщенной синхронизации, содержащая две ведомые системы с запаздыванием в приемнике, которая позволила увеличить скорость передачи информации в два раза. Принцип работы приемника заключается в том, что две ведомые системы работают в противофазе таким образом, что в течение первого полупериода вспомогательного генератора прямоугольного сигнала работает одна ведомая система с запаздыванием в приемнике, а в течение второй половины периода – другая.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы работы:

1. Предложенный новый метод реконструкции позволяет определить достоверные значения параметров элементов и архитектуру связей в ансамблях связанных осцилляторов, описываемых дифференциальными уравнениями первого порядка с запаздыванием, по временным рядам их колебаний. Метод основан на минимизации методом наименьших квадратов целевых функций,

описывающих результат реконструкции каждого осциллятора ансамбля, и разделении восстановленных коэффициентов связи на значимые и незначимые. Метод протестирован на диффузионно связанных модельных системах с задержкой и успешно применен для реконструкции резистивно связанных экспериментальных радиотехнических генераторов с запаздыванием.

2. В радиофизическом и численном экспериментах в ансамбле идентичных бистабильных систем с запаздывающей обратной связью, глобально связанных между собой через общее поле, показано формирование двух кластеров, каждый из которых в зависимости от величины фазового сдвига сигнала общего поля может демонстрировать как синхронное, так и несинхронное поведение входящих в него элементов. В случае, когда связь оказывается притягивающей для элементов одного кластера и отталкивающей для элементов другого кластера, в ансамбле возникает состояние «химера», при котором в сети одновременно сосуществуют кластер с синхронным и кластер с несинхронным поведением элементов.

3. Построенная экспериментальная система цифровой передачи информации с нелинейным подмешиванием информационного сигнала к хаотическому сигналу генератора с запаздывающей обратной связью позволяет без заметных искажений передавать и принимать в реальном времени речевые и музыкальные сигналы.

4. Предложенная и экспериментально реализованная система скрытой передачи информации, основанная на переключении хаотических режимов в генераторе с запаздывающей обратной связью, демонстрирует высокую устойчивость к шумам и затуханию сигнала в канале связи по сравнению с классическими системами с переключением, использующими хаотические сигналы.

5. Предложенная система передачи информации на основе режима обобщенной синхронизации между передатчиком и приемником и использующая лишь одну ведомую автоколебательную систему в приемнике, позволяет избежать технических трудностей, характерных для основанных на обобщенной синхронизации систем связи, которые обусловлены необходимостью обеспечить в эксперименте идентичность двух генераторов в приемнике. Для диагностики режима обобщенной синхронизации между ведущей и ведомой системами предложено поочередно воздействовать на ведомую систему сигналом ведущей системы и задержанной копией этого сигнала.

## Список основных публикаций автора по теме диссертации

1. Ponomarenko V.I., Kulminskiy D.D., Prokhorov M.D. Chimeralike states in networks of bistable time-delayed feedback oscillators coupled via the mean field // *Phys. Rev. E.* –2017. – V. 96. –022209.
2. Prokhorov M.D., Ponomarenko V.I., Kulminskiy D.D., Koronovskii A.A., Moskalenko O.I., Hramov A.E. Resistant to noise chaotic communication scheme exploiting the regime of generalized synchronization // *Nonlinear Dynamics.* –2017. – V. 87.–№. 3. –P. 2039–2050.
3. Пономаренко В.И., Кульминский Д.Д., Караваев А.С., Прохоров М.Д. Коллективная динамика идентичных бистабильных автогенераторов с запаздыванием, связанных через общее поле // *Письма в ЖТФ.* –2017. –Т. 43. –В. 6. –С. 64–71.
4. Sysoev I.V., Ponomarenko V.I., Kulminskiy D.D., Prokhorov M.D. Recovery of couplings and parameters of elements in networks of time-delay systems from time series // *Phys. Rev. E.* –2016. –V. 94. –052207.
5. Кульминский Д.Д., Пономаренко В.И., Караваев А.С., Прохоров М.Д. Устойчивая к шумам система скрытой передачи информации на хаотическом генераторе с запаздыванием с переключаемым временем задержки // *ЖТФ.* –2016. –Т. 86. –В. 5. –С. 1–8.
6. Сысоев И.В., Кульминский Д.Д., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д. Восстановление по временным рядам архитектуры связей и параметров элементов в ансамблях связанных осцилляторов с задержкой // *Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика.* –2016. – Т. 24. –№. 3. –С. 21–37.
7. Кульминский Д.Д., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Безручко Б.П. Система передачи информации, основанная на обобщенной хаотической синхронизации // *Информационно-управляющие системы.* –2016. –№ 2. –С. 35–40.
8. Кульминский Д.Д., Караваев А.С., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д. Коллективная динамика в ансамбле генераторов с запаздывающей обратной связью с общим полем // *Нелинейный мир.* –2016. –Т. 14. –№ 1. –С. 30–31.
9. Karavaev A.S., Kulminskiy D.D., Ponomarenko V.I., Prokhorov M.D. An experimental communication scheme based on chaotic time-delay system with switched delay // *International Journal of Bifurcation and Chaos.* –2015. –V. 25. –№. 10. –1550134.
10. Караваев А.С., Кульминский Д.Д., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д. Экспериментальная система скрытой передачи информации на генераторе с запаздывающей обратной связью с переключением хаотических режимов // *Письма в ЖТФ.* –2015. –Т. 41. – В. 1. –С. 3–11.
11. Ponomarenko V.I., Prokhorov M.D., Karavaev A.S., Kulminskiy D.D. An experimental digital communication scheme based on chaotic time-delay system // *Nonlinear Dynamics.* –2013. – V. 74.–N. 4. –P. 1013–1020.
12. Караваев А.С., Кульминский Д.Д., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д. Система цифровой передачи информации маскируемой хаотическим сигналом системы с запаздыванием // *Информационно-управляющие системы.* –2013. –№4. –С. 30–35.
13. Кульминский Д.Д., Пономаренко В.И., Караваев А.С., Хорев В.С., Прохоров М.Д. Коллективная динамика идентичных бистабильных автогенераторов с запаздывающей обратной связью, связанных через общее поле // *Материалы XI Международной школы-*

конференции «Хаотические автоколебания и образование структур (ХАОС)», Саратов, Россия. –2016. –С. 62–63.

14. Кульминский Д.Д., Пономаренко В.И., Караваев А.С., Прохоров М.Д. Система связи на генераторе с запаздыванием с переключением хаотических режимов // Доклады IX Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь», Москва, Россия. –2015. –С. 85–90.

15. Prokhorov M.D., Kulminskiy D.D., Karavaev A.S., Ponomarenko V.I. Communication system based on chaotic delayed feedback oscillator with switched delay // Proceedings of the 14th IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science, Las Vegas, USA. – 2015. –P. 119–124.

16. Кульминский Д.Д., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д. Скрытая передача данных в медицинских информационных системах, основанная на хаотических генераторах // Бюллетень медицинских Интернет-конференций –2015. –Т. 5. –№ 11. –С. 1411–1415.

17. Кульминский Д.Д., Караваев А.С., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д. Широкополосная система передачи информации на основе генератора с запаздыванием с переключаемым временем задержки // Материалы Всероссийской школы-конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Современные проблемы электроники СВЧ и ТГц диапазонов», Саратов, Россия. –2015. –С. 68.

18. Кульминский Д.Д., Караваев А.С. Цифровая система передачи информации на генераторе хаоса с запаздывающей обратной связью, реализованном на микроконтроллере // Тезисы докладов II Всероссийской научной молодежной конференции «Актуальные проблемы нано- и микроэлектроники», Уфа, Россия. –2014. –С. 24.

19. Кульминский Д.Д., Караваев А.С., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д. Экспериментальная система скрытой передачи информации с хаотической несущей с переключением задержки // Тезисы докладов IX Всероссийской конференции молодых ученых «Нанопотоника, наноэлектроника и нелинейная физика», Саратов, Россия. –2014. –С. 87–88.

20. Prokhorov M.D. Ponomarenko V.I., Karavaev A.S., Kulminskiy D.D. Experimental digital communication scheme based on chaotic time-delay // Proceedings of International Conference on Information and Communications Technologies, Beijing, China. –2013. –V.1. –P. 164–168.

21. Кульминский Д.Д., Караваев А.С., Селезнев Е.П., Пономаренко В.И. Экспериментальная система скрытой передачи информации на гибридном генераторе с запаздыванием с переключением хаотических режимов // Материалы X Международной школы-конференции «Хаотические автоколебания и образование структур» (ХАОС), Саратов, Россия. –2013. –С. 38–39.

22. Глуховская Е.Е., Караваев А.С., Кульминский Д.Д. Система скрытой передачи на базе гибридного генератора с запаздыванием с модуляцией задержки // Тезисы докладов VIII Всероссийской конференции молодых ученых «Нанопотоника, наноэлектроника и нелинейная физика», Саратов, Россия. –2013. –С. 72–73.

23. Кульминский Д.Д., Глуховская Е.Е., Караваев А.С. Оценка надежности скрытия информации в системе с нелинейным подмешиванием на базе хаотического генератора с запаздыванием // Тезисы докладов VII Всероссийской конференции молодых ученых «Нанопотоника, наноэлектроника и нелинейная физика», Саратов, Россия. –2012. –С. 81–82.