

На правах рукописи

МИШАГИН Константин Геннадьевич

**КОЛЛЕКТИВНАЯ ДИНАМИКА АНСАМБЛЕЙ ФАЗОВЫХ СИСТЕМ:
КОГЕРЕНТНОЕ СЛОЖЕНИЕ МОЩНОСТЕЙ, НЕЛИНЕЙНОЕ
ФАЗИРОВАНИЕ, ГЕНЕРАЦИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ**

01.04.03 – радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2007

Работа выполнена на кафедре теории колебаний и автоматического регулирования Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

Научный руководитель:

В.Д. Шалфеев – д.ф.-м.н., проф.

Официальные оппоненты:

В.В. Шахгильдян – член-корр. РАН, д.т.н., проф.
А.А. Мальцев – д.ф.-м.н., проф.

Ведущая организация:

Московский энергетический институт (Технический университет)

Защита состоится «16» мая 2007 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.07 при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского (603950, Н. Новгород, ГСП-20, пр. Гагарина, 23, корп.1, ауд.402)

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

Автореферат разослан «06» апреля 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

В.В. Черепенников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы:

В настоящее время проблема изучения коллективной динамики активных сред, описываемых с помощью систем связанных обыкновенных дифференциальных уравнений, имеет высокую привлекательность не только в физике, но и в биологии, химии, экономике и социальных науках (биологические возбудимые среды, нейронные сети, турбулентность, энергосети, решетки связанных лазеров, джозефсоновские контакты, антенные решетки и т.д.). Несмотря на исключительную сложность исследования пространственно-временных задач, в последние десятилетия достигнут существенный прогресс, обусловленный в значительной степени появлением мощных вычислительных средств. Многие фундаментальные явления, обнаруженные в моделях дискретных нелинейных сред и играющие важную роль в реальных физических, химических и биологических системах, представляются также интересными с точки зрения прикладного использования. Явление синхронизации в ансамблях связанных нелинейных осцилляторов может быть использовано для синхронизации и управления фазовыми распределениями в активных антенных решетках. Динамический хаос и эффект хаотической синхронизации являются интересными с точки зрения приложения в широкополосных системах связи, в радиолокации, а также для конфиденциальной передачи информации. Эффекты самоорганизации и структурообразования могут быть использованы в системах обработки информации (обработка изображений).

Реальным примером радиофизической системы, обладающей сложной пространственно-временной динамикой, является ансамбль связанных генераторов или усилителей с цепями фазовой автоподстройки. Будем называть такие фазоуправляемые генераторы и усилители фазовыми системами. Фазовые системы изначально разрабатывались для решения задач синхронизации, стабилизации и управления фазой и частотой колебаний, фильтрации, демодуляции и многих других задач. Благодаря высокой точности, надежности, помехоустойчивости, способности работать на высоких и сверхвысоких частотах, а также технологичности эти системы на данный момент являются неотъемлемой частью практически любых систем связи. Теория фазовых систем сейчас достаточно хорошо развита благодаря работам В.В. Шахгильдяна, М.В. Капранова, В.Н. Кулешова, А.А. Ляховкина, Л.Н. Белюстиной, Ю.Н. Бакаева, В.Н. Белых, Г.А. Леонова, В.И. Некоркина, В.П. Пономаренко, В.И. Тихонова, Н.Н. Удалова, В.Д. Шалфеева, Б.И. Шахтарина, W.C. Lindsey, A.J. Viterbi и др. Что касается теории связанных фазовых систем, то она разработана в значительно меньшей степени. Это обусловлено тем, что динамика связанных фазовых систем (даже ансамблей, состоящих из малого числа элементов) является существенно более сложной в сравнении с динамикой одной фазовой системы.

Представляется перспективным использование связанных фазовых систем для решения следующих прикладных задач: когерентное суммирование непрерывного лазерного излучения, нелинейное фазирование в активных антенных решетках, генерация широкополосных хаотических сигналов.

Системы фазовой автоподстройки широко применяются для стабилизации фазы на выходе мощных усилителей СВЧ диапазона (М.В. Капранов и др.), используются при решении задачи когерентного сложения мощностей СВЧ сигналов (С.В. Есин, В.И. Каганов и др.). Сейчас представляется перспективным использование аналогичных электрооптических систем фазовой автоподстройки для фазирования в решетках оптических квантовых усилителей с целью решения важной задачи современной технической физики – получения мощного непрерывного лазерного излучения с высоким качеством пучка путем когерентного сложения мощностей нескольких источников. При этом в ряд актуальных выносятся проблемы выбора оптимальной структуры связей в схеме фазирования, анализа динамических процессов, происходящих в электрооптических цепях фазовой автоподстройки, а также вопросы устойчивости и точности фазирования.

Вторая задача (нелинейное фазирование) заключается в использовании коллективной динамики связанных генераторов для осуществления синхронизации и установления необходимых фазовых сдвигов с целью управления поворотом диаграммы направленности в активных антенных решетках (Г.М. Уткин, А.А. Дворников, А.М. Чуков, R. York, T. Heath и др.). Такой подход имеет ряд существенных преимуществ в сравнении с традиционным способом фазирования в антенных решетках (низкая стоимость реализации и компактность в силу отсутствия фазовращателей и распределительной сети, возможность изменения угла поворота диаграммы направленности всей решетки с помощью управления параметрами лишь в нескольких элементах антенны и др.). Однако есть и недостатки, например: узкая полоса частот, внутри которой осуществляется синхронизация генераторов, зависимость амплитуд колебаний от установившихся фазовых соотношений. Эффективное решение данных проблем может быть достигнуто путем использования систем фазовой автоподстройки для объединения генераторов, в связи с чем исследование возможности управления фазовыми распределениями в режиме синхронизации в решетках связанных фазовых систем представляется актуальной задачей.

Третья задача важна с точки зрения возможных приложений хаотических сигналов, генерируемых в связанных фазовых системах, для передачи информации и в радиолокации. Проблема использования динамического хаоса в системах связи изучается уже около пятнадцати лет (А.С. Дмитриев, А.И. Панас, С.О. Старков, А.Р. Волковский, Н.Ф. Рульков, В.Д. Шалфеев, В.В. Матросов, L.M. Pecora, T.L. Carroll, K. Eckert, K. Cuomo, A. Oppenheim, M. Hasler, M.P. Kennady, G. Kolumban и др.), однако, наряду с другими проблемными вопросами важной задачей в данном направлении остается создание высокоэффективных генераторов широкополосных хаотических колебаний (СВЧ диапазона, в частности). Отметим, что такие качества фазовых

систем как надежность, способность работать на высоких и сверхвысоких частотах, а также реализуемость фазовых систем для мощных генераторов делают привлекательным и перспективным использование хаотической динамики таких систем для формирования широкополосных сигналов.

Цель диссертационной работы состоит в (i) описании и анализе модели системы автоматической фазовой коррекции в оптическом волокне, исследовании различных структур связи с помощью таких систем между волоконными оптическими усилителями для обеспечения синфазности выходного излучения, в (ii) теоретическом исследовании различных схем связанных фазоуправляемых генераторов для осуществления их синхронизации и управления фазовыми распределениями (в приложении к задаче управления поворотом диаграммы направленности в антенных решетках), в (iii) экспериментальном исследовании хаотической динамики малых ансамблей связанных фазовых систем и изучении спектральных свойств хаотических колебаний, генерируемых на выходе фазовых систем.

Методы исследования и достоверность научных результатов. В работе представлены результаты исследования математических моделей и результаты, полученные в натурном эксперименте. При теоретическом исследовании были использованы аналитические методы теории колебаний, а также численное моделирование. Достоверность результатов подтверждается путем сравнения результатов аналитических расчетов и численного моделирования, согласованием теоретических и экспериментальных результатов.

Научная новизна.

- В работе предложено использование решетки волоконно-оптических усилителей, связанных между собой с помощью электрооптических цепей фазовой автоподстройки, для решения задачи когерентного сложения мощностей. Представлен вывод и анализ математической модели электрооптической цепи фазовой автоподстройки в волоконном оптическом усилителе. Исследована точность фазирования в решетках таких усилителей с различными структурами связей между элементами решетки.
- В приложении к задаче управления диаграммой направленности в активных антенных решетках проведено теоретическое исследование различных схем соединения генераторов с помощью фазовых систем. Получены новые результаты, свидетельствующие о возможности получения градиентных фазовых распределений и управления ими в рассматриваемых схемах связанных генераторов. Проанализированы недостатки схем нелинейного фазирования (увеличение времени переходных процессов, чувствительность к случайной расстройке управляющих параметров).

- Впервые проведено экспериментальное исследование хаотической динамики в ансамблях связанных фазовых систем, показано, что ансамбли двух и трех каскадно-связанных фазовых систем демонстрируют различные хаотические режимы в широких областях пространства параметров. Получено хорошее согласование между результатами эксперимента и результатами теоретического исследования модели экспериментальной схемы. Изучены спектральные характеристики хаотических колебаний, генерируемых на выходе фазовых систем, для различных динамических режимов, показана возможность управления спектром. Предложен способ синтеза широкополосных хаотических сигналов с равномерным спектром.

Практическая значимость состоит в том, что полученные результаты могут быть использованы при разработке систем когерентного суммирования лазерного излучения, создании активных фазированных антенных решеток нового типа, проектировании широкополосных систем связи и радиолокации, основанных на использовании динамического хаоса. В работе рассмотрены важные с точки зрения приложений вопросы: проведен анализ точности фазирования в решетках связанных фазоуправляемых усилителей и генераторов, изучены пределы управления поворотом диаграммы направленности, исследованы различные схемы нелинейного фазирования и проведено их сравнение, а также рассмотрен вопрос о скорости установления синхронного режима в активных антенных решетках со связями между элементами, организованными с помощью фазовых систем. При экспериментальном исследовании связанных фазовых систем также уделено внимание важным с точки зрения использования хаотических сигналов в радиосвязи вопросам: изучение областей существования (в пространстве параметров) различных хаотических режимов, исследование спектральных свойств генерируемых хаотических колебаний.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Для решения задачи когерентного суммирования непрерывного лазерного излучения может быть применена схема из нескольких квантовых усилителей, связанных между собой с помощью систем фазовой автоподстройки. При использовании взаимных связей точность фазирования может быть не хуже, чем в схеме, в которой используется фазовая автоподстройка усилителей относительно общего опорного сигнала.
2. Возможно осуществление управления стационарными и изменяющимися во времени градиентными фазовыми распределениям в режиме синхронизации в ансамблях связанных фазоуправляемых генераторов с помощью изменения параметров связей и начальных (собственных) частот генераторов. Данный эффект может быть использован для управления поворотом диаграммы направленности (в достаточно

больших пределах, представляющих практический интерес) в активных антенных решетках различного частотного диапазона и мощности.

3. Экспериментально подтверждена эффективность использования ансамблей связанных фазовых систем для генерации хаотических колебаний в широких и однородных областях параметров. Управление величинами связей между элементами ансамбля позволяет выбирать тот или иной хаотический режим без изменения параметров самих элементов.
4. Хаотические колебания, генерируемые в ансамблях связанных фазовых систем, могут обладать широким спектром и резко-спадающей автокорреляционной функцией. Спектральные и корреляционные характеристики сигналов на выходе фазовых систем существенно зависят от динамического режима, реализуемого в ансамбле. Изменение параметров ансамбля (величины связи, начальные частотные расстройки генераторов) и выбор различных динамических режимов позволяет управлять спектральными свойствами хаотических сигналов. Возможно использование хаотической динамики цепочки локально-связанных фазоуправляемых генераторов для осуществления синтеза широкополосных сигналов с равномерным спектром, ширину которого можно регулировать.

Личный вклад автора. В совместных работах автор принимал непосредственное участие в выборе направлений исследований и постановке основных задач. Все представленные результаты экспериментального и теоретического исследования, а также результаты численного моделирования получены лично автором.

Апробация работы и публикации. Основные результаты диссертационной работы были представлены на международных научных конференциях "Experimental Chaos - 8" (Florence, Italy, 2004), "IEEE ICCSC'04 Conference" (Москва, 2004), "Nonlinear Dynamics of Electronic Systems" (Potsdam, Germany, 2005), "Topical Problems of Nonlinear Wave Physics" (Нижний Новгород, 2005), конференция SPIE "Free-Space Laser Communications V" (Сан-Диего, 2005), "Laser Optics for young scientists – 2006" (Санкт-Петербург, 2006), а также на конференциях молодых ученых "Нелинейные волновые процессы" (Нижний Новгород, 2004, 2006), "Научная конференция по радиофизике" (Нижний Новгород, 2003, 2004), "Нижегородская сессия молодых ученых (естественно-научные дисциплины)" (Нижний Новгород, 2005, 2006). Материалы диссертации обсуждались на научных семинарах кафедры теории колебаний и автоматического регулирования ННГУ, Научно-исследовательского института радиотехники (НИИРТ), а также Института физики сложных систем им. М.Планка (Дрезден).

По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, включая 4 статьи в рецензируемых физических журналах, 5 статей в сборниках трудов научных конференций, 6 тезисов докладов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитированной литературы. Диссертация содержит 98 страниц текста, 39 рисунков и список литературы из 93 наименований на 10 страницах. Общий объем работы 128 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель, раскрыта научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Приводятся положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации результатов.

В **первой главе** рассматривается задача когерентного суммирования непрерывного лазерного излучения на основе использования электрооптических систем фазовой автоподстройки. Во вводной части (**раздел 1.1**) обсуждается перспективность использования таких систем при решении различных прикладных задач лазерной оптики, в частности задачи когерентного сложения мощностей.

В **разделе 1.2** приводится вывод математической модели, описывающей динамику фазы в системе автоматической фазовой коррекции волоконного усилителя (рис. 1). В представленной схеме одно из волокон используется для передачи «опорной» световой волны, другое активное волокно с лазерной накачкой является усилителем. Электрооптическая цепь управления осуществляет подстройку фазы излучения на выходе активного волокна относительно фазы опорной световой волны. Данная система может быть использована в качестве базового элемента при реализации схемы когерентного сложения мощностей. Полученная математическая модель системы автоматической фазовой коррекции имеет вид:

$$j + a \exp(-pt)K(p) \sin j = \Delta, \quad (1)$$

где j – разность фаз между световыми волнами на выходе волокон, Δ – начальная разность фаз ($j(t=0) = \Delta$), a – эффективный коэффициент усиления в цепи управления, $p=d/dt$ – оператор дифференцирования, $K(p)$ – коэффициент передачи фильтра низких частот в цепи управления, t – суммарная задержка в электрооптической цепи.

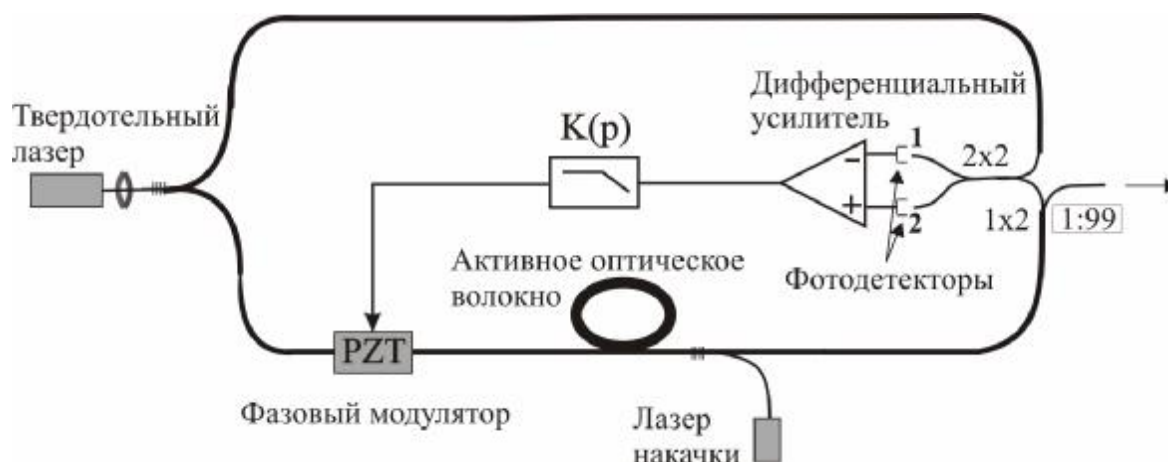


Рис. 1. Схема системы автоматической фазовой коррекции для волоконного усилителя

Модель (1) является достаточно универсальной и также описывает динамику фазы в системах фазовой автоподстройки усиления радиочастотного диапазона.

Задача фазирования формулируется следующим образом: в результате действия цепи автоматического управления разность фаз между излучением на выходе волоконного усилителя и «опорным» излучением должна быть стабилизирована, принимать некоторое фиксированное значение, независящее (или слабо зависящее) от начальной разницы фаз Δ .

В разделе 1.3 приведены примеры возможных динамических режимов в модели для различных коэффициентов передачи фильтра. Продемонстрированы регулярные и хаотические автомодуляционные режимы, которые нарушают режим фазирования. Показано, что задержка в цепи управления также может привести к режиму модуляции фазы. Проведена оценка дисперсии фазовой ошибки, показано, что дисперсией ошибки можно управлять путем изменения коэффициента усиления в цепи управления (параметр a в уравнении (1)).

В разделе 1.4 рассмотрены модели схем фазирования в решетках волоконных усилителей: схема с подстройкой фазы в усилителях относительно общего опорного сигнала и схемы, в которых подстройка осуществляется относительно фаз излучения на выходе соседних усилителей. Предполагается, что связь между волоконными усилителями реализуется аналогично тому, как это показано на рис. 1 (отличие заключается лишь в том, что используется подстройка в обоих связываемых волокнах, т.е. реализуется взаимная связь). Рассмотрен параметр порядка, характеризующий точность фазирования:

$$r_j = \frac{1}{N} \left| \sum_{m=1}^N e^{ij_m} \right|$$
 (значение $r_\varphi = 1$ соответствует равенству фаз j_m на выходе всех волоконных усилителей).

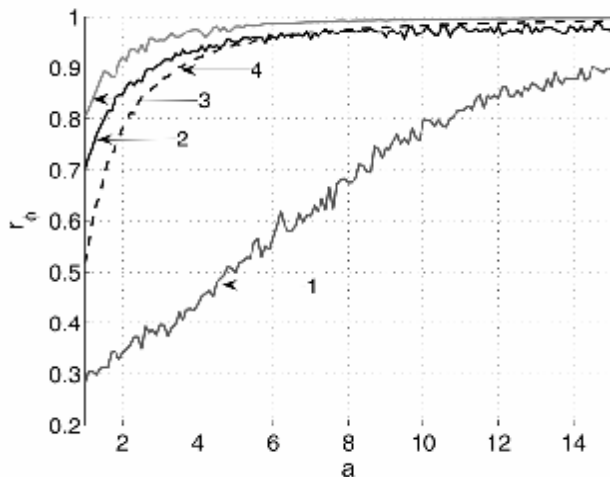


Рис. 2. Зависимость величины r_ϕ от параметра a . 1 – цепочка ($N=16$), 2 – квадратная решетка ($N=16$), 3 – гексагональная решетка ($N=19$), 4 – результат для фазовой автоподстройки относительно опорного сигнала ($N=16$)

управления фазой на основе систем фазовой автоподстройки в решетках волоконных усилителей.

Во **второй главе** рассматривается задача об управлении поворотом диаграммы направленности в активных антенных решетках с помощью методов нелинейного фазирования, которые заключаются в использовании коллективной динамики связанных генераторов (изменение фазовых соотношений в решетке за счет управления режимом синхронизации). Во вводной части (**раздел 2.1**) приводится обоснование преимуществ, которые дает использование методов нелинейного фазирования в антенных решетках. Обсуждается перспективность применения коллективной динамики фазовых систем для осуществления нелинейного фазирования (использование связей между генераторами с помощью систем фазовой автоподстройки позволяет решить ряд проблем, характерных для схем нелинейного фазирования).

В **разделе 2.2** кратко изложена идея электронного управления лучом в фазированных антенных решетках.

Раздел 2.3 посвящен описанию модели генератора с цепью фазовой автоподстройки, данная система является базовым элементом для рассматриваемых в работе схем нелинейного фазирования. Представлены сведения о возможных динамических режимах в такой системе (для случая фильтра первого порядка в цепи управления), обсуждается возможность управления фазой на выходе управляемого генератора с помощью изменения его начальной частотной расстройки.

В **разделах 2.4, 2.5** рассмотрены схемы фазирования: на основе синхронизации фазоуправляемых генераторов общим опорным сигналом (**раздел 2.4**) и на основе цепочки каскадно-связанных фазовых систем (**раздел 2.5**). Показана возможность управления градиентным фазовым распределением,

Рассмотрены различные топологии связей (связи локальные) в решетках волоконных усилителей и показано, что точность фазирования при использовании взаимных связей может быть не хуже (для некоторого фиксированного количества элементов), чем в схеме, в которой используется фазовая автоподстройка усилителей относительно общего опорного сигнала (рис. 2).

В **разделе 1.5** приведены выводы по первой главе, а также обсуждается возможность

изучена устойчивость режима синхронизации с таким распределением фаз (в случае фильтра первого порядка в кольцах управления).

В разделе 2.6 рассмотрена модель антенной решетки, основанной на цепочке генераторов, локально связанных между собой с помощью систем фазовой автоподстройки (рис. 3). Исследованы различные варианты управления градиентным распределением фаз в режиме синхронизации: управление начальными частотными расстройками генераторов, управление величинами связей, управление константами фазовой связи, изменяемых с помощью фазовращателей.

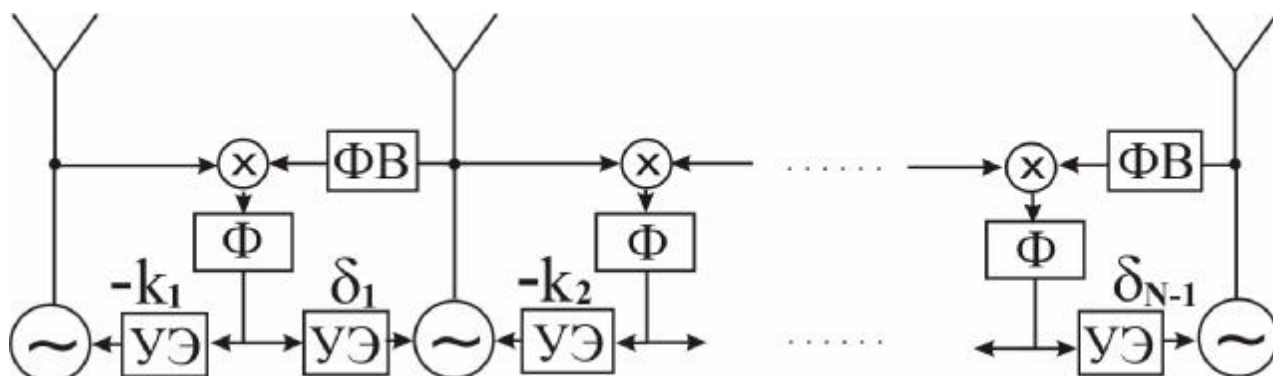


Рис. 3. Цепочка из N генераторов, связанных через кольца фазовой автоподстройки. ФВ – фазовращатель, Ф – фильтр низких частот, УЭ – управляющий элемент, который изменяет частоту генератора пропорционально входному напряжению, k_n, d_n – коэффициенты связей ($n=1..N-1$)

Показана возможность управления частотными расстройками только в элементах на концах цепочки (все остальные параметры фиксированы) для изменения градиентного распределения фаз во всей цепочке. Исследована устойчивость режима синхронизации с градиентным распределением фаз вдоль цепочки для случая, когда в кольцах управления используются фильтры первого порядка. Изучены пределы изменения фазовых сдвигов между соседними элементами, показано, что с помощью дополнительного управления знаком связей эти пределы можно расширить. На рис. 4 представлен пример управления поворотом диаграммы направленности в модели активной антенной решетки, изображенной на рис. 3, как видно, поворот может осуществляться в достаточно больших пределах.

В разделе 2.7 представлены результаты исследования скорости установления режима синхронизации в цепочке фазовых систем с однонаправленной и взаимными связями. Приводится аналитическая линейная оценка времени переходного процесса, полученная на основе анализа характеристических показателей состояния равновесия, отвечающего режиму синхронизации генераторов в рассматриваемой модели. Аналитические оценки подтверждаются результатами численного счета. Показано, что время переходного процесса в цепочке может быть значительно больше времени переходного процесса в одном элементе (имеет место линейная зависимость от количества элементов при однонаправленной связи и квадратичная при

взаимной связи). Изучено влияние нелокальности связей на скорость установления стационарного распределения фаз (для модели цепочки с периодическими граничными условиями).

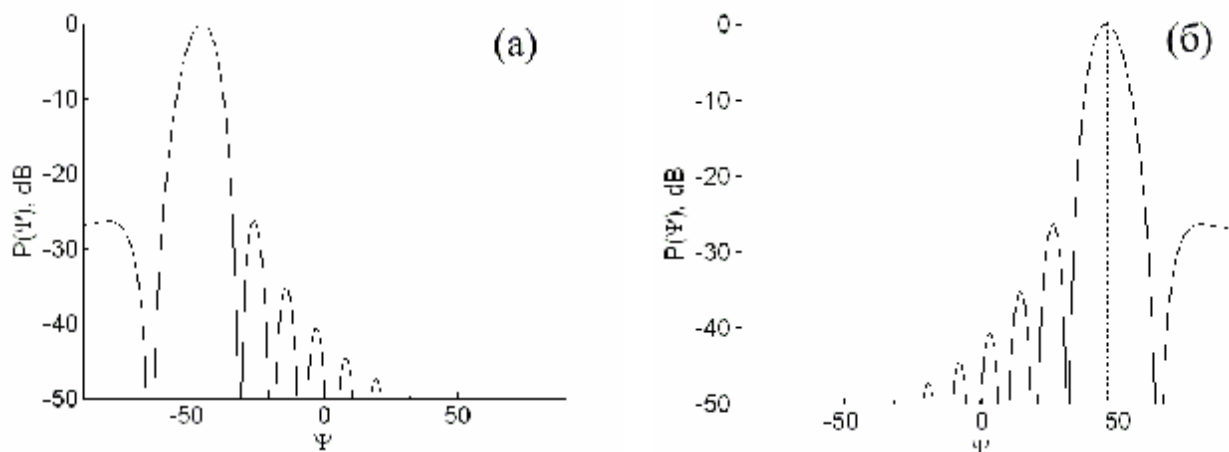


Рис. 4. Управление поворотом диаграммы направленности в антенной решетке с симметричными взаимными связями с помощью изменения начальных частотных расстроек генераторов на концах цепочки. Угол Ψ отсчитывается от нормали к плоскости антенны и измеряется в градусах. Длина цепочки $L=5\lambda$, $N=21$ (λ – длина волны излучения).

В разделе 2.8 исследуется влияние случайного отклонения управляющих параметров на точность фазирования. Представлены аналитические оценки параметра порядка (характеризующего точность установившегося распределения фаз) и дисперсии фазовой ошибки для трех рассмотренных схем нелинейного фазирования. Изучена зависимость параметра порядка от количества элементов в цепочке при некоторой фиксированной дисперсии ошибки управляющих параметров. Точность фазирования наиболее чувствительна к расстройке управляющих параметров в цепочке генераторов с взаимными связями.

В разделе 2.9 исследуется возможность получения режима синхронизации с изменяющимся во времени (по некоторому заданному закону) градиентным распределением фаз в цепочке связанных генераторов. Представлен закон изменения управляющих параметров для осуществления такого управления. Показано, что инерционность в цепи управления фазовых систем может приводить к параметрической неустойчивости нестационарного управления.

В разделе 2.10 представлены выводы по второй главе, обсуждаются преимущества и недостатки рассмотренных схем нелинейного фазирования.

В третьей главе рассматривается хаотическая динамика ансамблей связанных фазовых систем. Во вводной части (раздел 3.1) обсуждается проблема применения динамического хаоса в системах связи и радиолокации. Приводятся аргументы, свидетельствующие о перспективности использования хаотических режимов в связанных фазовых системах в прикладных задачах.

В разделе 3.2 представлена классификация динамических режимов в ансамблях связанных фазовых систем, в которых имеет место генератор опорных колебаний (режимы, стабилизированные по частоте относительно опорного сигнала, и режимы биений).

В разделе 3.3 представлены результаты исследования хаотической динамики в экспериментальной схеме двух каскадно-связанных фазовых систем с дополнительными обратными связями между цепями управления. Представлены результаты численного исследования математической модели экспериментальной схемы. Построена карта динамических режимов в плоскости параметров первой фазовой системы. Продемонстрирован переход к хаосу через каскад бифуркаций удвоения периода (при введении обратной связи) и перемежаемость первого рода. В эксперименте наблюдается «мягкое» возбуждение хаотических колебаний при введении обратной связи между цепями управления фазовых систем (изолированные фазовые системы обладают исключительно регулярной динамикой). Продемонстрированы различные хаотические режимы (квазисинхронный хаотический режим, режим хаотических биений). Получена область генерации хаотически модулированных колебаний на выходе первой фазовой системы, которая хорошо согласуется с аналогичной областью, полученной с помощью численного счета. В эксперименте наблюдается переход к хаосу через перемежаемость.

В разделе 3.4 представлены результаты исследования хаотической динамики в экспериментальной схеме трех каскадно-связанных фазовых систем. Путем управления параметрами связей без изменения параметров самих элементов получены различные хаотические режимы. Показано, что данный ансамбль способен генерировать хаотические колебания в широкой однородной области пространства параметров (область захвата в режим генерации хаотически модулированных колебаний в первой фазовой системе почти совпадает с областью захвата в синхронный режим изолированной фазовой системы).

В разделе 3.5 представлены экспериментально полученные спектры хаотических колебаний на выходе фазовых систем и автокорреляционные функции хаотических колебаний в цепях управления. Различные хаотические режимы обладают качественно различными спектральными свойствами (рис. 5). Спектр квазисинхронного хаотического колебания (рис. 5а) содержит яркий пик, связанный с тем, что средняя частота такого колебания стабилизирована и равняется частоте опорного сигнала. Данная особенность позволяет управлять спектром: сдвигать спектр путем изменения частоты опорного сигнала. Спектр колебаний, соответствующий режиму хаотических биений (рис. 5б), является значительно более равномерным и широким. Рассмотрена зависимость ширины спектра хаотических колебаний от величины обратной связи, показано, что увеличение обратной связи ведет, в среднем, к увеличению ширины спектра (это обусловлено тем, что происходит усложнение хаотических колебаний в цепи управления и растет амплитуда этих колебаний). Показана зависимость спектральных и корреляционных характеристик хаотических колебаний от

динамического режима, реализуемого в ансамбле трех каскадно-связанных фазовых систем.

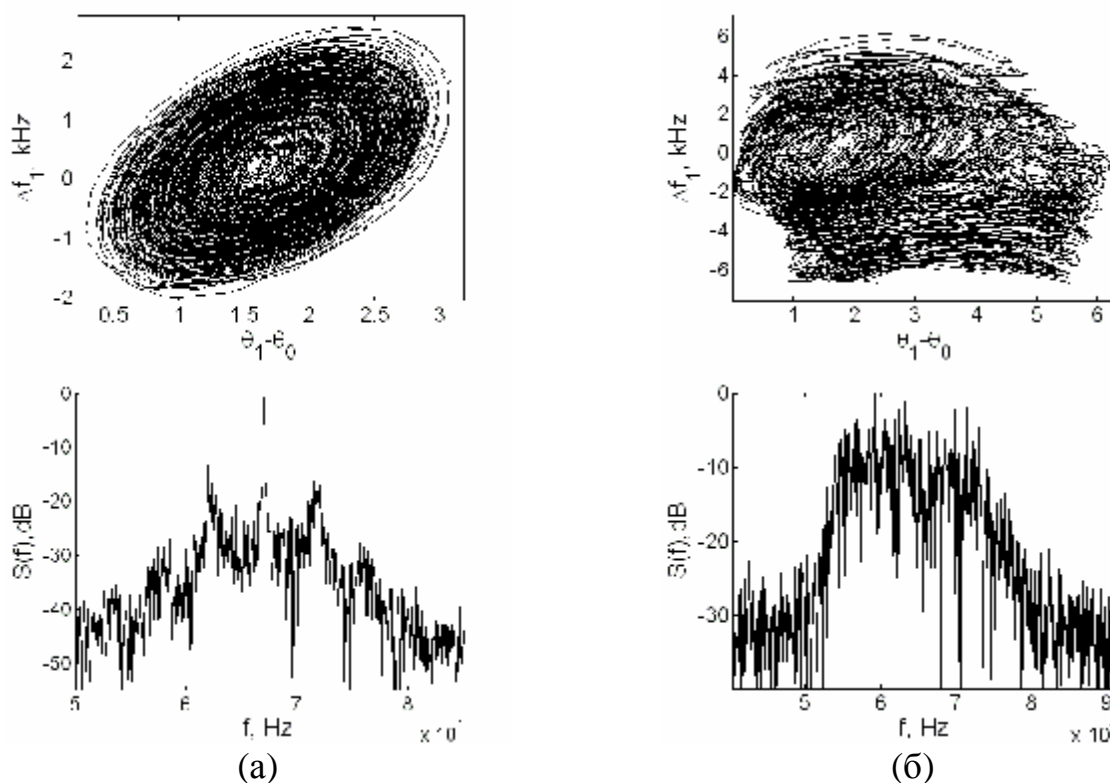


Рис. 5 Экспериментально полученные проекции фазовых портретов хаотических колебаний в первой фазовой системе и спектры колебаний на выходе первой фазовой системы ансамбля трех каскадно-связанных элементов. (а) – квазисинхронный хаотический режим, (б) – режим хаотических биений.

В разделе 3.6 высказана идея синтеза широкополосных хаотических колебаний с равномерным спектром на основе использования хаотической динамики цепочки генераторов, связанных через цепи фазовой автоподстройки. Такая схема была рассмотрена во второй главе, где исследовался управляемый режим синхронизации для решения задачи нелинейного фазирования (рис. 3). Идея синтеза заключается в следующем. Задается градиентное распределение начальных частот вдоль цепочки генераторов (рис. 6а). В цепях управления используются фильтры второго порядка и выбираются значения параметров, при которых режим синхронизации является неустойчивым. В таком случае в цепочке связанных генераторов реализуется сложный хаотический режим. Спектр суммарного сигнала является достаточно равномерным (рис. 6б) и его шириной можно управлять путем изменения начальных частотных расстроек генераторов либо варьируя количество генераторов в цепочке.

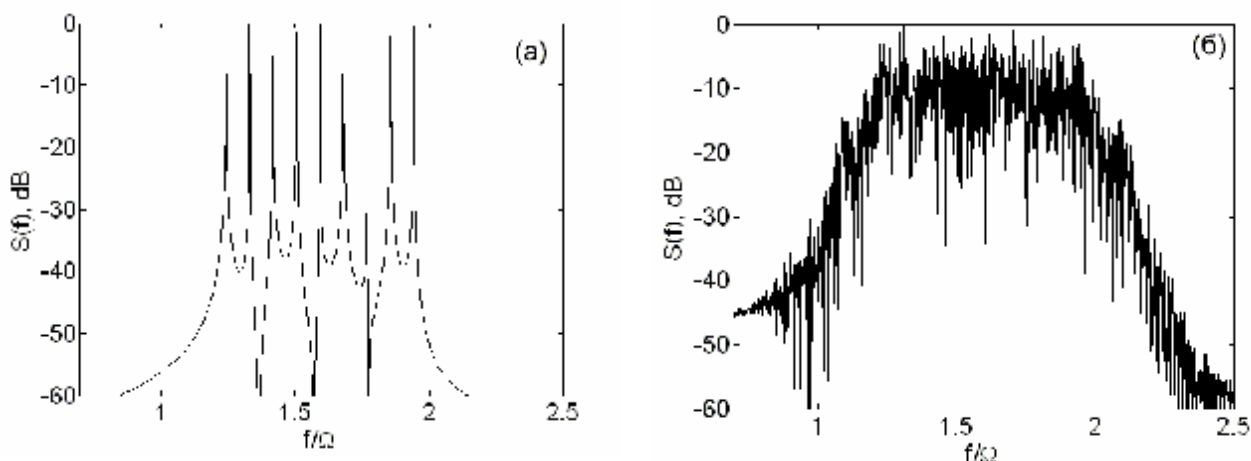


Рис. 6. (а) – спектр суммарного сигнала на выходе несвязанных генераторов с градиентным распределением частот. (б) – спектр суммарного сигнала в модели цепочки связанных фазоуправляемых генераторов (рис. 3), находящейся в хаотическом режиме (при градиентном распределении начальных частотных расстройк генераторов)

В разделе 3.7 представлены выводы по третьей главе.

В **заклучении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Основные результаты диссертационной работы

1. Осуществлен вывод математической модели системы фазовой автоподстройки в оптоволоконном усилителе. Показана возможность управления точностью фазирования с помощью изменения коэффициента усиления в кольце управления системы фазовой автоподстройки. Проведено сравнение различных способов организации связей через цепи фазовой автоподстройки между оптическими усилителями в решетке для решения задачи когерентного суммирования мощностей.
2. Исследованы математические модели различных схем нелинейного фазирования в одномерных активных антенных решетках, реализованных на основе генераторов, связанных с помощью цепей фазовой автоподстройки. Исследованы вопросы существования и устойчивости синхронных режимов со стационарным и изменяющимся во времени градиентным распределением фаз. Показано, что для управления фазовыми распределениями могут быть использованы начальные частотные расстройки генераторов, параметры силы связи и константы фазовой связи.
3. Показано, что характерное время установления синхронного режима с градиентным распределением фаз и точность фазирования при случайном отклонении управляющих параметров в ансамблях связанных генераторов существенно зависят от количества элементов в ансамбле и вида связи.

4. Проведено экспериментальное исследование хаотической динамики в ансамблях двух и трех каскадно-связанных фазовых систем с дополнительными обратными связями между цепями управления. Показано хорошее соответствие между результатами эксперимента и результатами численного исследования модели. Продемонстрирована возможность управления динамическими режимами в рассматриваемых ансамблях путем изменения параметров связей без изменения параметров парциальных элементов. Показано, что данные ансамбли способны генерировать хаотические колебания в широких областях пространства параметров.
5. Исследованы спектральные и корреляционные характеристики хаотических колебаний, генерируемых в экспериментальной схеме, соответствующих различным режимам (квазисинхронный хаотический режим, хаотические биения). Продемонстрирована возможность управления спектром.
6. Предложен метод синтеза широкополосных хаотических сигналов с равномерным спектром управляемой ширины на основе использования хаотической динамики цепочки генераторов с взаимными связями через цепи фазовой автоподстройки.

Публикации

1. Мишагин К.Г., Матросов В.В., Шалфеев В.Д., Шохнин В.В., Экспериментальное исследование генерации хаотических колебаний в ансамбле двух каскадно-связанных фазовых систем // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 24, С. 31-38.
2. Мишагин К.Г., Шалфеев В.Д. Управление градиентными фазовыми распределениями в модели активной антенной решетки с локальными связями между элементами // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 23. С. 32-39.
3. Мишагин К.Г., Шалфеев В.Д. О модели системы автоматической коррекции фазы в оптическом волокне // Вестник ННГУ. Серия Радиофизика. 2006. В. 1(4). С. 3-10.
4. Мишагин К.Г., Матросов В.В., Шалфеев В.Д., Шохнин В.В. Генерация хаотических колебаний в экспериментальной схеме трех каскадно-связанных фазовых систем // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2007. Т. 15. № 2. С. 55-61.
5. K.G. Mishagin and V.D. Shalfeev Laser Beam Steering and Coherent Combining in Phase Controlled Laser Arrays // Proceedings of SPIE Int. Symposium on Optics & Photonics, 31 July-4 August 2005, San-Diego, USA.
6. K.G. Mishagin and V.D. Shalfeev Wide-Bandwidth Chaotic Radar Based on Phase-Locked Loops Arrays with Local Couplings // Proceedings of International Symposium "Topical Problems of Nonlinear Wave Physics", St.-Petersburg – Nizhny Novgorod, 2-9 August, 2005. P. 71-72.
7. Мишагин К.Г., Матросов В.В., Шалфеев В.Д., Шохнин В.В. Хаотические режимы в модели экспериментальной схемы двух каскадно-связанных

- систем ФАП // Тр.7-й научн. конф по радиофизике. 7 мая 2004г. /Ред. А.В.Якимов.-Н.Новгород: ННГУ, 2004. С. 82-83
8. Mishagin K.G., Matrosov V.V., Shalfeev V.D., Shohnin V.V., Chaotic Oscillations in Coupled Phase Locked Loops // Proc. of IEEE ICCSC'04 Conference, 29 June – 2 July, Moscow, 2004
 9. Мишагин К.Г., Матросов В.В., Шалфеев В.Д. Исследование возможности применения хаотически модулированных колебаний в системах связи // Тр.7-й научн. конф по радиофизике. 7 мая 2003г. /Ред. А.В.Якимов.- Н.Новгород: ННГУ, 2003. С. 116-117.
 10. K.G. Mishagin and V.D. Shalfeev, Nonlinear dynamics and applications of coupled phase-locked loops // Abstracts of IEEE conf. NDES2005, Potsdam, 18-22 September, 2005.
 11. Мишагин К.Г., Шалфеев В.Д. Динамическое управление фазовыми распределениями в активных антенных решетках с локальными связями // Нелинейные волновые процессы. Конференция молодых ученых. Тезисы докладов. Н. Новгород, 2006. С. 103-104.
 12. Мишагин К.Г., Шалфеев В.Д. Управление синхронными режимами в модели активной антенной решетки // Одиннадцатая нижегородская сессия молодых ученых. (Естественнонаучные дисциплины): Тезисы докладов. – Н.Новгород: Изд. Гладкова О.В., 2006, С. 36.
 13. Mishagin K.G. Antipov O.L. Shalfeev V.D. Phase Locking in Optical Amplifier Arrays by Means of Pumping Intensity Control // Abstracts of the Third International Conference on Laser Optics for Young Scientists, June 26-30, 2006, St. Petersburg, Russia, P. 28.
 14. Mishagin K.G., Matrosov V.V., Shalfeev V.D., Shohnin V.V., Experimental investigation of dynamical chaos in coupled phase locked loops // “Experimental Chaos Conference – 8”, Abstracts, Florence, Italy, 14-17 June, 2004, P. 90-91.
 15. Mishagin K.G., Matrosov V.V., Shalfeev V.D., Shohnin V.V., Experimental Investigation of Chaotic Oscillations and Chaos Control in Two Cascade-Connected Phase-Locked Loops // 2nd International Conference «Frontiers of Nonlinear Physics», Abstracts, Nizhny Novgorod – St.-Petersburg, Russia, July 5 – 12, 2004, P. 37-38.

Оглавление диссертации

Введение

Глава 1. Когерентное суммирование непрерывного лазерного излучения с использованием систем фазовой автоподстройки

- 1.1 Электрооптические системы фазовой автоподстройки и задача когерентного сложения мощностей
- 1.2 Математическая модель системы автоматической фазовой коррекции в оптическом волокне
- 1.3 Точность фазирования и динамические режимы системы автоматической фазовой коррекции
- 1.4 Фазирование в решетках волоконных усилителей

1.5 Выводы и обсуждение

Глава 2. Нелинейное фазирование в антенных решетках на основе коллективной динамики связанных фазоуправляемых генераторов

2.1 Нелинейное фазирование в активных антенных решетках

2.2. Управление поворотом диаграммы направленности в фазированных антенных решетках

2.3 Генератор с цепью фазовой автоподстройки. Уравнение модели

2.4 Метод фазирования на основе синхронизации генераторов общим опорным сигналом

2.5 Каскадное соединение фазовых систем

2.6 Организация взаимных связей с помощью систем фазовой автоподстройки

2.7 Скорость установления режима синхронизации

2.8 Оценка точности фазирования при случайном отклонении управляющих параметров

2.9 Управление нестационарным градиентным распределением фаз

2.10 Выводы

Глава 3. Хаотическая динамика ансамблей связанных фазовых систем

3.1 Введение

3.2 Классификация динамических режимов в ансамблях связанных фазовых систем

3.3 Исследование хаотической динамики в экспериментальной схеме двух каскадно-связанных фазовых систем

3.3.1 Описание экспериментальной установки

3.3.2 Математическая модель и динамика изолированной фазовой системы

3.3.3 Математическая модель экспериментальной схемы

3.3.4 Экспериментальные результаты

3.4 Генерация хаотических колебаний в экспериментальной схеме трех каскадно-связанных фазовых систем

3.5 Спектральные и корреляционные свойства хаотических колебаний, генерируемых в ансамблях связанных фазовых систем. Управление спектром

3.6 Синтез широкополосных сигналов в цепочке локально-связанных фазоуправляемых генераторов

3.7 Выводы

Заключение

Литература