



НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА СИСТЕМ ФАЗИРОВАНИЯ В АНТЕННЫХ РЕШЕТКАХ

Учебное пособие

К.Г. Мишагин, В.Д. Шалфеев, В.П. Пономаренко

© К.Г. Мишагин, В.Д. Шалфеев, В.П. Пономаренко, 2007
© Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского, 2007
Н. Новгород: Издательство Нижегородского госуниверситета, 2007. 188 с.
ISBN 978-5-91326-024-6

В пособии представлены различные варианты соединения генераторов и усилителей в активных антенных решетках с помощью систем фазовой автоподстройки с целью решения задачи фазирования. Изложен новый принцип управления фазовыми распределениями в антенных решетках, определяемый как нелинейное фазирование и основанный на использовании коллективной динамики активных элементов. Основное внимание уделено исследованию динамики рассматриваемых схем: анализ устойчивости режимов фазирования, изучение регулярных и хаотических автомодуляционных режимов. Представлены экспериментальные результаты по изучению хаотической динамики в ансамблях связанных систем фазовой автоподстройки. Пособие предназначено для аспирантов и студентов старших курсов, специализирующихся в области радиофизики, прикладной нелинейной динамики, теории управления, а также может быть полезно для инженеров и научных работников, занимающихся проектированием активных антенных решеток.

Оглавление

Введение

Глава 1. Фазирование в решетках усилителей

1.1. Фазовая автоподстройка в усилителе. 1.2. Стационарные режимы фазирования. 1.3. Динамика системы автоматического фазирования. 1.3.1. Модель САФ с одним состоянием равновесия. 1.3.2. Модель САФ с тремя состояниями равновесия. 1.3.3. Модель САФ с пятью состояниями равновесия. 1.4. Перестройка режимов системы автофазирования. 1.5. Фазирование в решетке усилителей. 1.6. Выводы.

Глава 2. Фазирование в решетках генераторов

2.1. Нелинейное фазирование в антенных решетках. 2.2. Электронное управление лучом. 2.3. Генератор с цепью фазовой автоподстройки. 2.4. Фазирование

на основе синхронизации генераторов общим опорным сигналом. 2.5. Каскадное соединение генераторов. 2.6. Организация взаимных связей. 2.7. Цепочка взаимосвязанных генераторов, синхронизируемых опорным сигналом. 2.8. Фазирование в двумерных решетках генераторов. 2.8.1. Каскадное соединение генераторов. 2.8.2. Взаимосвязанные генераторы. 2.8.3. Связанные генераторы с опорным сигналом. 2.9. Скорость установления режима синхронизации. 2.10. Точность фазирования. 2.11. Управление нестационарным фазовым распределением. 2.12. Выводы.

Глава 3. Хаотическая динамика систем фазирования

3.1. Хаотическая динамика САФ. 3.1.1. Математическая модель САФ. 3.1.2. Стационарные режимы фазирования. 3.1.3. Бифуркационная диаграмма динамических режимов. 3.1.4. Развитие динамических режимов при изменении параметра нелинейности. 3.1.5. Динамика модели САФ с тремя состояниями равновесия. 3.1.6. Динамика модели САФ с пятью состояниями равновесия. 3.1.7. Влияние начальной фазовой расстройки. 3.1.8. Выводы. 3.2. Хаотическая динамика ансамблей связанных ФАП. 3.2.1. Классификация динамических режимов. 3.2.2. Хаотическая динамика двух каскадно-связанных ФАП. 3.2.3. Генерация хаотических колебаний в схеме трех каскадно-связанных ФАП. 3.2.4. Спектральные и корреляционные свойства. 3.2.5. Формирование широкополосных сигналов. 3.2.6. Выводы.

Заключение

Приложение I. Фазирование в волоконно-оптическом усилителе

Приложение II. Влияние нелокальности связей на скорость синхронизации

Список литературы

Введение

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 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. Явление динамического хаоса и эффект хаотической синхронизации интересны с точки зрения приложения к широкополосным системам связи, радиолокации, а также для осуществления конфиденциальной передачи информации. Эффекты самоорганизации и

структурообразования могут быть использованы в системах обработки информации (обработка изображений).

В данном пособии рассматривается прикладная задача нелинейной динамики, связанная с исследованием динамических процессов в активных антенных решетках, имеющих в каждом канале усилитель или генератор, охваченный цепью автоматического управления фазой или частотой, соответственно. В усилителях цепь автоподстройки управляет фазовым сдвигом с целью его стабилизации. В генераторах управляемым параметром является частота генератора, при этом управляющий сигнал использует информацию о разности фаз между сигналом подстраиваемого генератора и опорным сигналом. Такая цепь автоматического управления частотой позволяет осуществить синхронизацию генератора опорным сигналом. В литературе по физике, радиотехнике, теории систем управления и т.д. используется разная терминология при описании систем автоматического управления фазой и частотой. Для определенности будем придерживаться следующей терминологии. Систему автоматической подстройки фазы в усилителях будем называть системой автоматического фазирования (САФ), а систему автоматической подстройки частоты, использующую информацию о разности фаз, будем называть системой фазовой автоподстройки (ФАП). Системы САФ и ФАП 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 сейчас являются неотъемлемой частью практически любых систем связи. В решетках усилителей и генераторов системы ФАП и САФ могут быть использованы не только для синхронизации, осуществления стабилизации параметров сигналов и управления ими относительно опорного сигнала, но также для организации взаимных связей между элементами. Использование взаимных связей открывает новые возможности для решения задачи автоматического фазирования в антенных решетках. Однако коллективная динамика ансамблей САФ и ФАП является существенно более сложной по сравнению с динамикой одного элемента, поэтому изучена сравнительно слабо. В пособии значительное внимание уделено описанию коллективной динамики связанных ФАП, представлены как теоретические, так и экспериментальные результаты. Приведены результаты моделирования ансамблей САФ.

В первой главе рассматривается задача автоматического фазирования в решетке усилителей с помощью САФ. Известно, что системы автоматического фазирования широко применяются для стабилизации фазы на выходе мощных усилителей СВЧ диапазона, используются при решении задачи когерентного сложения мощностей СВЧ сигналов. На данный момент представляется особенно интересным использование аналогичных электрооптических систем для фазирования в решетках оптических квантовых усилителей с целью решения важной задачи современной физики – получения мощного непрерывного лазерного излучения с высоким качеством пучка путем когерентного сложения мощностей нескольких источников. В связи с актуальностью данной задачи в первой главе представлено достаточно подробное исследование динамики модели САФ. Рассматриваемая здесь модель САФ является универсальной и подходит для описания электрооптических систем фазирования. Кроме этого представлены результаты моделирования усилителей, взаимосвязанных с помощью САФ.

Во второй главе рассматривается задача автоматического фазирования в решетке генераторов, связанных с помощью систем ФАП. В данном случае, в отличие от решетки усилителей, организация связей между элементами имеет принципиальное значение, так как дает не просто новое техническое решение, имеющее некоторые преимущества, а позволяет использовать новый принцип фазирования, который можно определить как нелинейное фазирование. Нелинейное фазирование основано на использовании коллективной динамики связанных генераторов для осуществления синхронизации и управления поворотом диаграммы направленности в антенной решетке. Такой подход имеет ряд существенных преимуществ в сравнении с традиционным способом фазирования в антенных решетках с помощью фазовращателей: 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. Использование систем ФАП для организации связей между генераторами позволяет обеспечить широкую полосу частот, внутри которой осуществляется синхронизация генераторов, исключает зависимость амплитуд колебаний от установившихся фазовых соотношений, способствует снижению фазовых шумов. Во второй главе рассмотрены различные схемы соединения генераторов в одномерных и двумерных антенных решетках. Основное внимание уделено возможности формирования и управления линейными градиентными фазовыми распределениями, а также устойчивости соответствующих стационарных решений.

Третья глава посвящена изучению хаотических автомодуляционных режимов в САФ и ФАП. Такие режимы являются нерабочими с точки зрения задачи фазирования в антенных решетках. Однако известно, что хаотические сигналы могут использоваться в качестве несущей в системах связи и радиолокации и имеют некоторые преимущества над регулярными сигналами благодаря своим свойствам (широкий спектр, резко спадающая автокорреляционная функция). Проблема использования динамического хаоса в системах связи изучается уже около пятнадцати лет, тем не менее, наряду с другими проблемными вопросами важной задачей в данном направлении остается создание высокоэффективных генераторов широкополосных хаотических колебаний (СВЧ диапазона, в частности). Одним из перспективных вариантов решения этой задачи является построение генераторов хаоса на основе систем САФ и ФАП. В третьей главе представлено теоретическое исследование хаотической динамики одиночной САФ и экспериментальное исследование хаотической динамики малых ансамблей связанных ФАП. Представлены спектральные и корреляционные характеристики хаотических колебаний, полученные в эксперименте.