

На правах рукописи



БАБАНОВ НИКОЛАЙ ЮРЬЕВИЧ

**АНАЛИЗ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И СИНТЕЗ КОНСТРУКЦИЙ
ПАССИВНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ
РАССЕИВАТЕЛЕЙ**

Специальность 05.12.04 - Радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

Владимир - 2015

Работа выполнена на кафедре информационных радиосистем ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева» (НГТУ).

Научный консультант:

Ларцов Сергей Викторович

Доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник УНИИР НГТУ.

Официальные
оппоненты:

Орлов Игорь Яковлевич

Доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры радиотехники ФГБОУ ВПО
«Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского-национальный
исследовательский университет».

Петров Евгений Петрович

Доктор технических наук, профессор,
Заведующий кафедрой радиоэлектронных
средств ФГБОУ ВПО «Вятский государственный
университет».

Щитов Аркадий Максимович

Доктор технических наук, старший научный
сотрудник, ведущий научный сотрудник
ОАО «ФНПЦ Нижегородский научно-
исследовательский приборостроительный
институт «Кварц» им. А.П. Горшкова».

Ведущая организация:

ФГУП «ФНПЦ Научно-исследовательский
институт измерительных систем им.
Ю.Е.Седакова», г. Нижний Новгород.

Защита диссертации состоится «16» февраля 2016 г. в 14-00 ч. на заседании диссертационного совета Д212.025.04 при Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д.87, ВлГУ, ФРЭМТ, корпус 3, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых и на сайте <http://www/vlsy.ru>.

Автореферат разослан «15» октября 2015г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д.87, ВлГУ, ФРЭМТ.

Ученый секретарь

Диссертационного совета

Доктор технических наук, профессор

А.Г. Самойлов

Введение

Актуальность темы. Настоящая работа относится к области исследования эффекта нелинейного рассеяния радиоволн на объектах, содержащих нелинейные элементы. Одним из перспективных направлений этих исследований сегодня является применение специально изготовленных пассивных нелинейных радиоответчиков (см. рис. 1).

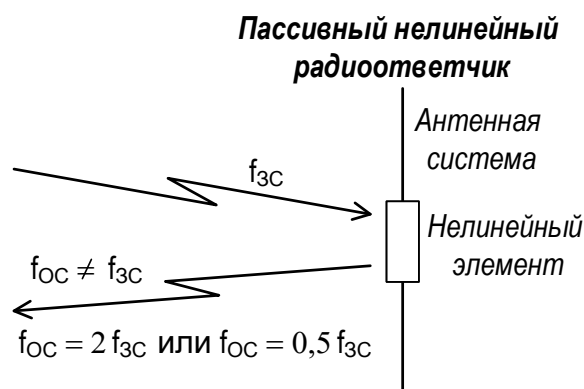


Рис. 1. Пассивный нелинейный радиоответчик

Пассивные нелинейные радиоответчики могут иметь очень простую конструкцию. Они состоят из антенной части (в простейшем случае дипольная антенна), нагруженной на нелинейный элемент. Принцип работы подобных устройств заключается в том, что они облучаются запросным сигналом с частотой $f_{зс}$. Этот сигнал принимается пассивным нелинейным радиоответчиком, где с ним происходит нелинейное преобразование, в результате которого часть энергии запросного сигнала переизлучается в окружающее пространство на другой частоте.

Сегодня известны два типа пассивных нелинейных радиоответчиков. Первым типом являются нелинейные рассеиватели, у которых ответный сигнал переизлучается на частоте гармоники запросного сигнала или на частоте комбинационного нелинейного продукта, если запросный сигнал многочастотный. Нелинейным преобразованием у нелинейного рассеивателя является искажение формы запросного сигнала из-за нелинейного характера вольт-амперной характеристики нелинейного элемента. В большинстве случаев, для нелинейных рассеивателей в качестве ответного сигнала используется переизлучаемая спектральная компонента на частоте второй гармоники запросного сигнала $f_{ос} = 2f_{зс}$.

Вторым типом пассивных нелинейных радиоответчиков являются параметрические рассеиватели. Здесь в качестве нелинейного элемента используется параметрический генератор, соответственно ответный сигнал - результат параметрической генерации, а запросный сигнал выступает сигналом накачки. Если параметрическим генератором является электрический параметрический контур, то ответный сигнал переизлучается на частоте

половинной субгармоники запросного сигнала $f_{0c} = 0,5f_{3c}$, соответственно параметрический контур настраивается на половинную частоту запросного сигнала, то есть половинную частоту сигнала накачки. Возможно использование в качестве нелинейной нагрузки двухчастотного параметрического генератора с собственными частотами f_1 и f_2 частота запросного сигнала должна удовлетворять условию $f_{3c} = f_1 \pm f_2$, при этом происходит генерация сигналов и на частоте f_1 и на частоте f_2 , а один из указанных сигналов выбирается в качестве ответного сигнала.

Работы в области исследования эффекта нелинейного рассеяния радиоволн, выполненные под руководством В.Б. Штейншлейгера, А.А. Горбачева, Н.С. Вернигорова, Г.Н. Парватова, Е.П. Чигина, Г.Д. Михайлова, Б.М. Петрова, Т.М. Заборонковой, Г.Н. Щербакова, Д.В. Семинихиной, С.В. Ларцова, С.Н. Разинькова, С.Н. Панычева показали, что с помощью пассивных нелинейных радиоответчиков могут решаться многие актуальные практические задачи: калибровка и оценка работоспособности нелинейных радиолокаторов, маркировка товаров, людей, объектов, грузов и маршрутов движения, создание нелинейных помех радиоприему, оценка параметров окружающей среды, создание эталонных безфидерных источников электромагнитного излучения в радиодиапазоне, определение структуры распределения поля вблизи источников электромагнитного излучения, и др.

Известные пассивные нелинейные радиоответчики очень просты по конструкции (в самом примитивном варианте это полупроводниковый диод, соединенный с куском проволоки). Если учесть, что у пассивных нелинейных радиоответчиков отсутствует элемент питания, они всегда готовы к использованию, дешевы, просты в изготовлении, малогабаритны, не требуют обслуживания и имеют практически неограниченный срок службы, то становятся понятным интерес исследователей к созданию систем радиомаркировки, ориентированных на их обнаружение.

Среди указанных можно выделить идеи, в которых подразумевается взаимодействие с маркером – нелинейным радиоответчиком на больших расстояниях и в условиях наличия переотражений от окружающих объектов и границы раздела сред. В частности, это задачи обнаружения оказавшихся за бортом людей, предварительно оснащенных спасательным жилетом с маркером – нелинейным рассеивателем, определение маршрута по предварительно установленным радиоответчикам, обозначение сброшенных с самолета грузов, разметка посадочных площадок и территорий с повышенной опасностью и т.д.

Степень разработанности темы К настоящему времени наибольший прогресс в исследованиях достигнут в разработке задачи разметки водных фарватеров бакенами с размещенными на них параметрическими рассеивателями.

В то же время, потенциал использования пассивных нелинейных радиоответчиков еще не оценен. Практическое применение нашли только маркеры товаров – нелинейные рассеиватели в системах сохранности товаров некоторых крупных магазинов.

По мнению автора, такое положение связано с недостаточной проработанностью вопросов синтеза конструкций и использования указанных устройств в практических задачах. Это связано с тем, что не была разработана их теория, так как они рассматривались как некоторый побочный, второстепенный продукт исследований и прикладного использования эффекта нелинейного рассеяния радиоволн. Такой подход долго не давал возможности выделить задачи разработки и применения пассивных нелинейных радиоответчиков в самостоятельную теорию.

Построению самостоятельной теории пассивных нелинейных радиоответчиков, которая позволит решать задачи анализа, моделирования и синтеза конструкций нелинейных и параметрических рассеивателей и посвящена предлагаемая к рассмотрению диссертация.

Цель работы

Целью работы является построение общей теории пассивных нелинейных радиоответчиков в виде нелинейных или параметрических рассеивателей, которая позволит проанализировать протекающие в них процессы, дать интерпретацию наблюдаемых свойств, поставить задачи синтеза и конструирования ПНР, дать предложения по их использованию в прикладных задачах, создать методы оценки и определить факторы и пути повышения эффективности их применения.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

- 1) Разработкой модели функционирования ПНР, позволяющей описывать на качественном и количественном уровне процессы, протекающие в ПНР; прогнозировать их реакцию на внешнее воздействие запросным сигналом; определять зависимости характеризующие свойства ПНР, которые при этом могли бы быть вычислены или измерены; использовать имеющиеся арсеналы аналитических и расчетных методов, развитые в нелинейной радиотехнике, электродинамике, теории распространения радиоволн;
- 2) Исследованием пассивных нелинейных радиоответчиков в виде нелинейных решения практических задач, изучения возможностей применения;
- 3) Исследованием пассивных нелинейных радиоответчиков в виде параметрических рассеивателей, включая анализ, синтез, создание конструкций для рассеивателей, включая анализ, синтез, создание конструкций для решения практических задач, изучения возможностей применения.

- 4) Изучением специфики использования пассивных нелинейных радиоответчиков при их практическом применении.

Предмет исследования:

Процессы преобразования запросного сигнала в пассивных нелинейных радиоответчиках - нелинейных или параметрических рассеивателях в ответный сигнал и обработки ответного сигнала в приемнике поискового устройства, особенности условий распространения запросных и ответных сигналов в среде распространения .

Новизна проведенных исследований.

Новизна состоит, прежде всего, в построении общей теории пассивных нелинейных радиоответчиков в виде нелинейных или параметрических рассеивателей, позволяющей проводить анализ протекающих процессов, дать интерпретацию наблюдаемых свойств, определить подходы к синтезу и конструированию таких радиоответчиков, выделить факторы и пути повышения эффективности их применения. Кроме этого, в диссертационной работе на основе математического моделирования и натурных экспериментов изучены свойства пассивных нелинейных радиоответчиков, исследованы проблемы приема сигналов от них, связанные с наличием когерентных помех от помеховых нелинейных рассеивателей, проведена модернизация существующих и предложены новые методы инструментальных измерений параметров и настройки таких ответчиков. высокую значимость имеет и предложенная процессная модель пассивного нелинейного радиоответчика, с помощью которой доказано, что эффективность систем радиомаркировки, использующих пассивные нелинейные и параметрические рассеиватели может быть повышена на основе учета их свойств. Также разработана теория формирования ответного когерентного сигнала от параметрического рассеивателя на основе использования явления синхронизации.

Теоретическая значимость исследования определяется тем, что:

- 1) доказано, что эффективность систем радиомаркировки, использующих пассивные нелинейные и параметрические рассеиватели, может быть увеличена на основе учета их свойств при помощи процессной модели пассивного нелинейного радиоответчика;
- 2) изложены факторы, позволяющие повысить эффективность систем радиомаркировки, использующих пассивные нелинейные радиоответчики, на основе учета их амплитудных и фазовых свойств;
- 3) раскрыты и обсуждены проблемы приема сигнала от пассивных нелинейных радиоответчиков, связанные с наличием когерентных помех от помеховых нелинейных рассеивателей;
- 4) изучены на основе математического моделирования и натурных экспериментов свойства пассивных нелинейных радиоответчиков;

- 5) проведена модернизация существующих методов инструментальных измерений параметров пассивных нелинейных радиоответчиков.

Значение полученных соискателем результатов для практики состоит в системном подходе к анализу свойств, измерению и моделированию характеристик, синтезу конструкций и использованию пассивных нелинейных и параметрических рассеивателей в задачах радиомаркировки, а также в разработанных способах и алгоритмах применения таких рассеивателей при обозначении путей следования, проходов, фарватеров, поиске жертв стихийных бедствий и катастроф, дистанционной идентификации грузов. В работе представлен ряд новых конструкций пассивных нелинейных радиоответчиков и систем из них, в том числе нелинейных рассеивателей-маркеров в виде четырехполюсников, нелинейных радиоответчиков, применяемых в качестве электронного номера, параметрических рассеивателей - датчиков среды, параметрических рассеивателей с расширенной частотной полосой, параметрических рассеивателей с нелинейным способом синхронизации, одноконтурных и двухконтурных параметрических рассеивателей – маркеров в виде четырехполюсников, отражательных решеток из нелинейных и параметрических рассеивателей. Введенные на основе процессной модели характеристики позволяют корректно формулировать задания на конструирование новых пассивных нелинейных радиоответчиков, как достижение объективных, измеряемых и не зависящих от внешних факторов зависимостей.

Основные защищаемые положения

1. Разработанная процессная модель пассивного нелинейного радиоответчика, позволившая:
 - 1) описать процессы, происходящие в пассивном нелинейном радиоответчике;
 - 2) определить зависимости, характеризующие свойства пассивного нелинейного радиоответчика;
 - 3) определить методы экспериментального измерения указанных характеристик пассивного нелинейного радиоответчика;
 - 4) определить пути математического вычисления указанных зависимостей с привлечением анализа эквивалентной схемы пассивного нелинейного радиоответчика;
 - 5) определить пути оптимизации структуры пассивных нелинейных радиоответчиков.
2. Результаты исследований пассивных нелинейных радиоответчиков - нелинейных рассеивателей, включающие:
 - 1) свойства нелинейных рассеивателей (на основе процессной модели и анализа эквивалентной схемы);
 - 2) конструкции нелинейных рассеивателей для:
 - маркировки объектов;

- измерения структуры электромагнитного поля;
 - антенных измерений;
 - 3) свойства нелинейных отражательных решеток и систем из динамических и стабильных нелинейных рассеивателей;
3. Результаты исследований пассивных нелинейных радиоответчиков – параметрических рассеивателей (ПР), включающие:
- 1) свойства ПР (на основе процессной модели и анализа эквивалентной схемы);
 - 2) новые конструкции ПР;
 - 3) натурные и модельные исследования свойств ПР и систем из ПР;
 - 4) разработку методов синхронизации при формировании ОС в ПР и компенсации синхронизирующих сигналов при приеме ОС;
4. Возможности использования (на основе системного подхода) НР и ПР в различных прикладных задачах.

Степень достоверности и обоснованности научных положений результатов проведенных исследований, рекомендаций и выводов.

Теоретические положения диссертационного исследования основываются на использовании теории радиотехнических систем, теории распространения радиоволн, теории нелинейных электрических цепей, а также на использовании методов экспериментального анализа и статистической обработки результатов эксперимента, методов математического моделирования.

Достоверность и обоснованность результатов обеспечены строгими математическими преобразованиями и экспериментальной проверкой; подтверждены сопоставлением результатов теоретических исследований с экспериментальными данными, полученными путем моделирования и натурных испытаний.

Результаты согласуются с современными научными представлениями и данными, полученными при обзоре отечественных и зарубежных источников, а также подтверждаются их представительным обсуждением при публикации в научных изданиях, в том числе в научных изданиях, входящих в перечень, рекомендуемый ВАК. Достоверность полученных результатов подтверждена наличием действующих патентов на изобретения.

Основные положения диссертации неоднократно докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях, включая международные.

Теоретические и прикладные результаты диссертационной работы **внедрены** в Федеральном государственном унитарном предприятии «Федеральный научно-производственный центр научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова», Федеральном государственном унитарном предприятии «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», Нижегородском военном институте инженерных войск (филиале) Федерального государственного военного образовательного

учреждения высшего профессионального образования «Военная академия войск радиационной, химической и биологической защиты и инженерных войск». Внедрение подтверждается актами, приложенными к диссертации.

Личный вклад

Работа выполнена при научной консультации д.т.н., профессора С.В. Ларцова, участвовавшего в обсуждении постановки задач диссертации, получении и обсуждении некоторых, особенно экспериментальных, результатов. Часть результатов является развитием исследований, выполненных автором при работе над кандидатской диссертацией, (научный руководитель д.т.н., профессор А.А. Горбачев). Работы, выполненные в рамках настоящей диссертации, носят комплексный характер и потребовали усилий коллектива специалистов, принимавших участие в проведении теоретических и экспериментальных исследований, которые проводились в течение 25 лет под руководством или при личном участии автора. В частности, в диссертации содержатся научные результаты, полученные совместно с А.С. Корсаковым при работе над его кандидатской диссертацией, защищенной под руководством автора. Следует отметить результаты, полученные совместно с аспирантом А.В. Ключевым, завершающим кандидатскую диссертацию под руководством автора.

Все выносимые на защиту результаты и положения, составляющие основное содержание диссертационной работы, разработаны и получены лично автором или при его непосредственном участии. В большинстве работ опубликованных в соавторстве соискателю принадлежит ведущая роль при постановке задач и их исследовании. К числу значимых результатов, полученных лично автором, следует отнести:

- процессную модель пассивного нелинейного радиоответчика, позволившую определить зависимости, характеризующие их свойства, методы экспериментального измерения и теоретического вычисления указанных характеристик, пути оптимизации структуры таких радиоответчиков;
- методологию моделирования пассивных нелинейных радиоответчиков (двухполюсников и четырехполюсников), базирующиеся на процессной модели и анализе их эквивалентных схем;
- теорию синхронизации параметрических рассеивателей;
- методологию измерений параметров пассивных нелинейных радиоответчиков;
- результаты натурных и модельных исследований свойств различных типов одиночных параметрических рассеивателей и систем из них;
- конструкции пассивных нелинейных радиоответчиков-нелинейных и параметрических рассеивателей и систем из них, используемых для радиомаркировки, антенных измерений, измерения структуры электромагнитного поля, маркировки объектов, как датчики среды, в качестве электронного номера,

– структурную схему системного подхода к синтезу системы, использующих пассивные нелинейные радиоответчики.

Роль автора в постановке задач, выдвижении идей, разработке основных положений, обосновании решений и научных рекомендаций носит определяющий характер.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на научных конференциях: всесоюзной научно-технической конференции "Развитие и внедрение новой техники радиоприёмных устройств и обработки сигналов", Москва, 1989; научно-технической конференции "Молодые учёные - производству радиоэлектронной промышленности", Горький, 1989; 6-й Всероссийской научно-технической конференции "Радиоприём и обработка сигналов", Н. Новгород, 1993; 12-th International Symposium on EMS, Wroclaw, 1994; 28-й Московской международной конференции по теории и технике антенн, Москва, 1998; международной конференции "100-летие начала использования электромагнитных волн для передачи сообщений и зарождения радиотехники", Москва, 1995; международной конференции "Физпром-96" (Физика и промышленность), Голицыно Московской обл., 1996; международной конференции "Marelec-97" (Marine Electromagnetics), Лондон, 1997; V международной научно-методической конференции преподавателей вузов, ученых и специалистов «Высокие технологии в педагогическом процессе», Н. Новгород, 2004; 8-й международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации», Владимир, 2009; XVII международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии ИСТ-2011», Н. Новгород, 2011; IX международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ-2011», Владимир-Суздаль, 2011; XIX международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии ИСТ-2013», Н. Новгород, 2013; XIX международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC-2013), Воронеж, 2013; Балтийском морском форуме, Светлогорск, 2013; X международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ-2013», Владимир, 2013; международной научно-практической конференции «Социально-экономические проблемы развития регионов: экономика, образование, управление и право», Н. Новгород, 2013; XX международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии ИСТ-2014», Н. Новгород, 2014; XXI международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии ИСТ-2015», Н. Новгород, 2015; XIX научной конференции по радиофизике, Н. Новгород, 2015.

Тема диссертации связана с тематическими планами Научно-исследовательского радиофизического института (НИРФИ) и выполненными

госбюджетными и хоздоговорными НИР, порученными НИРФИ решениями директивных органов СССР, в которых автор являлся одним из исполнителей: НИР «Чатра-РВО» (1981 – 1985), «Чашоба-РВО» (1985 – 1986), «Вектор-КГ» (1986 – 1987), «Чаша-2-14» (1986 – 1987), «Шассеры-РВО» (1987 – 1988), «Сандал» (1988 – 1989), «Чета-РВО» (1988 – 1989), а так же с базовой частью задания по научным исследованиям Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева в 2013 – 2015 гг.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4-х глав и заключения, содержит 342 страницы основного текста, 178 рисунков, 5 таблиц, основные выводы, список литературы из 218 наименований и 4-х приложений.

Основное содержание работы

Во **введении** обсуждается актуальность темы диссертации, указываются цель работы и решаемые задачи, предмет исследования, теоретическая значимость исследования и значение полученных соискателем результатов для практики, основные защищаемые положения.

В **первой главе** выполнен обзор, посвященный исследованию и прикладному использованию пассивных нелинейных радиоответчиков - нелинейных и параметрических рассеивателей в рамках исследований эффекта нелинейного рассеяния радиоволн.

Здесь же представлена теория описания свойств нелинейных и параметрических рассеивателей при помощи единого подхода, основанного на предложенной автором процессной модели пассивного нелинейного радиоответчика.

Теория описания свойств нелинейных и параметрических рассеивателей основана на описании процесса взаимодействия поисковой установки и пассивного нелинейного радиоответчика (ПНР), а так же процессов, протекающих в ПНР.

Процесс функционирования установки, использующей ПНР, проиллюстрировано на рис.2. Установка характеризуется параметрами на частоте запросного сигнала (ЗС): мощностью ЗС - $P_{ЗС}$, и частотой ЗС - $\omega_{ЗС}$ и коэффициентом усиления излучающей антенны установки $G_{ИА}$, зависящим от частоты ЗС - $\omega_{ЗС}$ и параметров направления на ПНР : азимута $\alpha_{ИА}$ и угла места $\beta_{ИА}$ и угла наклона плоскости поляризации – $\theta_{ИА}$, а на частоте ответного сигнала (ОС) она характеризуется частотой ОС - $\omega_{ОС}$ и параметрами приемной антенны поисковой установки: $S_{ПА}$, зависящей от частоты ОС - $\omega_{ОС}$, и параметров направления на ПНР : азимута $\alpha_{ПА}$ и угла места $\beta_{ПА}$ и угла наклона плоскости поляризации – $\theta_{ПА}$. Излучаемый ЗС в направлении ПНР удобно характеризовать интенсивностью волны приведенной к расстоянию 1 метр от излучающей антенны установки: $\Pi_{ИС}(\omega_{ЗС}, \alpha_{ИС}, \beta_{ИС}, \theta_{ИС})$, где $\alpha_{ИС}, \beta_{ИС}, \theta_{ИС}$ соответственно азимут, угол места и наклон плоскости поляризации

излучаемой волны ЗС (ограничимся случаем линейно-поляризованных антенн ПНР и установки).

Принимаемый ОС удобно характеризовать интенсивностью волны принимаемого сигнала, падающей на приемную антенну установки: $P_{\text{ПС}}(\omega_{\text{ОС}}, \alpha_{\text{ПС}}, \beta_{\text{ПС}}, \theta_{\text{ПС}})$, где $\alpha_{\text{ПС}}, \beta_{\text{ПС}}, \theta_{\text{ПС}}$ соответственно азимут, угол места и наклон плоскости поляризации волны принимаемого сигнала.

ПНР предлагается характеризовать его процессной моделью (см. рис.2), в которой, каждому последовательно происходящему процессу приводится в соответствие отдельный элемент: ЗС должен быть принят приемной антенной ЗС, канализирован при помощи тракта приемная антенна ЗС – генератор ОС к генератору ОС, где осуществляется нелинейное преобразование ЗС, затем сигнал, уже на частоте ОС, канализируется при помощи тракта генератор ОС – излучающая антенна ОС к излучающей антенне ОС, которая излучает ОС в пространство.

Среда распространения ЗС и ОС характеризуется безразмерными коэффициентами распространения $K_{\text{ЗС}}$ и $K_{\text{ОС}}$:

$$K_{\text{ЗС}} = P_{\text{ИС}}(\omega_{\text{ЗС}}, \alpha_{\text{ИС}}, \beta_{\text{ИС}}, \theta_{\text{ИС}}) / P_{\text{ЗС}}(\omega_{\text{ЗС}}, \alpha_{\text{ЗС}}, \beta_{\text{ЗС}}, \theta_{\text{ЗС}}) \text{ и} \quad (1)$$

$$K_{\text{ОС}} = P_{\text{ОС}}(\omega_{\text{ОС}}, \alpha_{\text{ОС}}, \beta_{\text{ОС}}, \theta_{\text{ОС}}) / P_{\text{ПС}}(\omega_{\text{ОС}}, \alpha_{\text{ПС}}, \beta_{\text{ПС}}, \theta_{\text{ПС}}) \quad (2)$$

В литературе функция, связывающая величину $P_{\text{ЗС}}(\omega_{\text{ЗС}}, \alpha_{\text{ЗС}}, \beta_{\text{ЗС}}, \theta_{\text{ЗС}})$, и реакцию ПНР на указанное воздействие в виде ОС - $P_{\text{ОС}}(\omega_{\text{ОС}}, \alpha_{\text{ОС}}, \beta_{\text{ОС}}, \theta_{\text{ОС}})$ получила название амплитудной характеристики (АХ).

$$P_{\text{ОС}} = \mathcal{F}(P_{\text{ЗС}}) \quad (3)$$

Из рис. 2 следует, что $P_{\text{ОС}}$ и $P_{\text{ЗС}}$ в (3) зависят от пространственно – поляризационных параметров взаимодействия поисковой установки и ПНР. Процессная модель позволяет охарактеризовать природу этой зависимости при помощи обобщенной амплитудной характеристики:

$$P_{\text{ОС}}(P_{\text{ЗС}}, \alpha_{\text{ЗС}}, \beta_{\text{ЗС}}, \theta_{\text{ЗС}}, \alpha_{\text{ОС}}, \beta_{\text{ОС}}, \theta_{\text{ОС}}) = D_{\text{ОС}}(\alpha_{\text{ОС}}, \beta_{\text{ОС}}, \theta_{\text{ОС}}) \mathcal{F}(P_{\text{ЗС}} D_{\text{ЗС}}(\alpha_{\text{ЗС}}, \beta_{\text{ЗС}}, \theta_{\text{ЗС}})), \quad (4)$$

где $D_{\text{ОС}}(\alpha_{\text{ОС}}, \beta_{\text{ОС}}, \theta_{\text{ОС}})$ и $D_{\text{ЗС}}(\alpha_{\text{ЗС}}, \beta_{\text{ЗС}}, \theta_{\text{ЗС}})$ нормированные диаграммы антенн ПНР на частотах ОС и ЗС.

Обобщенная амплитудная характеристика характеризует не только амплитудные, но и пространственно – поляризационные свойства ПНР, в частности, с помощью (4) может быть определен отклик системы в произвольном направлении как для однопозиционной ($\alpha_{\text{ЗС}} = \alpha_{\text{ОС}}, \beta_{\text{ЗС}} = \beta_{\text{ОС}}$), так и для двухпозиционной поисковой установки ($\alpha_{\text{ЗС}} \neq \alpha_{\text{ОС}}$ или $\beta_{\text{ЗС}} \neq \beta_{\text{ОС}}$).

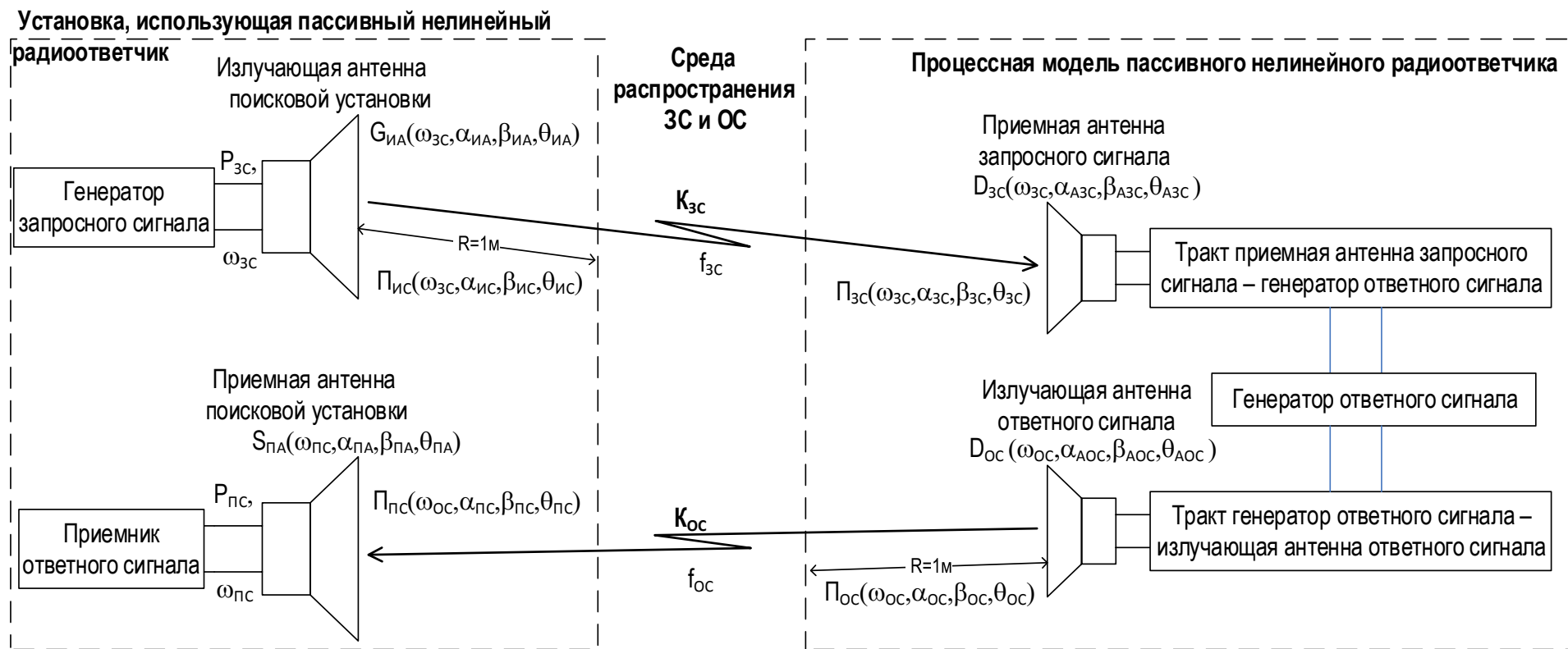


Рис.2. Процесс функционирования установки, использующей пассивный нелинейный радиоответчик

Обобщенная амплитудная характеристика это многомерная функция на которой могут быть проведены разрезы. Например, разрез при условиях $\Pi_{3C} = const$, $\beta_{3C} = const$, $\theta_{3C} = const$, $\beta_{OC} = const$, $\theta_{OC} = const$, $\alpha_{3C} = \alpha_{OC} - var$ соответствует диаграмме обратного нелинейного рассеяния.

Процессная модель ПНР позволяет достаточно легко при помощи выражений (1) и (2) написать вид основного уравнения поисковой системы, то есть определить связь $\Pi_{ИС}(\omega_{3C}, \alpha_{ИС}, \beta_{ИС}, \theta_{ИС})$ и $\Pi_{ПС}(\omega_{OC}, \alpha_{ПС}, \beta_{ПС}, \theta_{ПС})$:

$$\begin{aligned} \Pi_{ПС}(\Pi_{3C}, \alpha_{3C}, \beta_{3C}, \theta_{3C}, \alpha_{OC}, \beta_{OC}, \theta_{OC}, \omega_{OC}, \alpha_{ПС}, \beta_{ПС}, \theta_{ПС}) = \\ = D_{OC}(\alpha_{OC}, \beta_{OC}, \theta_{OC}) \mathcal{F}(D_{3C}(\alpha_{3C}, \beta_{3C}, \theta_{3C}) \Pi_{ИС}(\omega_{3C}, \alpha_{ИС}, \beta_{ИС}, \theta_{ИС}) / K_{3C}) / K_{OC} . \end{aligned} \quad (5)$$

Не смотря на то, что вид основного уравнения поисковой системы можно записать только в общем виде (5) сохраняется возможность выполнять трансформацию АХ (измеренной или рассчитанной) в кривые, позволяющие оценить характеристики функционирования поисковой установки.

Применение обобщенной амплитудной характеристики и нормированных диаграмм антенн ПНР на частотах ОС и ЗС с одной стороны облегчает целый ряд расчетных процедур. Введение указанных зависимостей корректно, если они могут быть найдены как экспериментальными, так и теоретическими (расчетными) методами.

АХ может быть найдена экспериментально прямым методом исходя их определения (2), для этого может быть использована измерительная установка (см. рис. 2), т.е. поисковая установка у которой есть возможность изменения уровня излучаемой мощности ЗС и измерения параметров $\Pi_{ИС}$ и $\Pi_{ПС}$.

$D_{OC}(\alpha_{OC}, \beta_{OC}, \theta_{OC})$ так же может быть найдена экспериментально прямым методом. По определению необходимо варьировать один из параметров $\alpha_{OC}, \beta_{OC}, \theta_{OC}$ путем изменения соответствующих параметров измерительной установки. Наиболее просто выполнять изменения θ_{OC} , для этого необходимо обеспечить возможность вращения плоскости поляризации приемной антенны измерительной установки и измерение поляризационной диаграммы полны ОС.

Измерение $D_{OC}(\alpha_{OC})$ формально предполагает вращение приемной антенны поисковой установки по окружности вокруг ПНР, а для измерения $D_{OC}(\beta_{OC})$ формально необходимо описать приемной антенной поисковой установки полуокружность вокруг ПНР в вертикальной плоскости. Указанные измерения проще выполнить, если вращать ПНР, соответственным образом разместив его на поворотной платформе, а излучающую антенну поисковой установки конструктивно совместить с ней, обеспечив неизменное взаимное пространственное положение ПНР и излучающей антенны поисковой установки (см. рис.3).

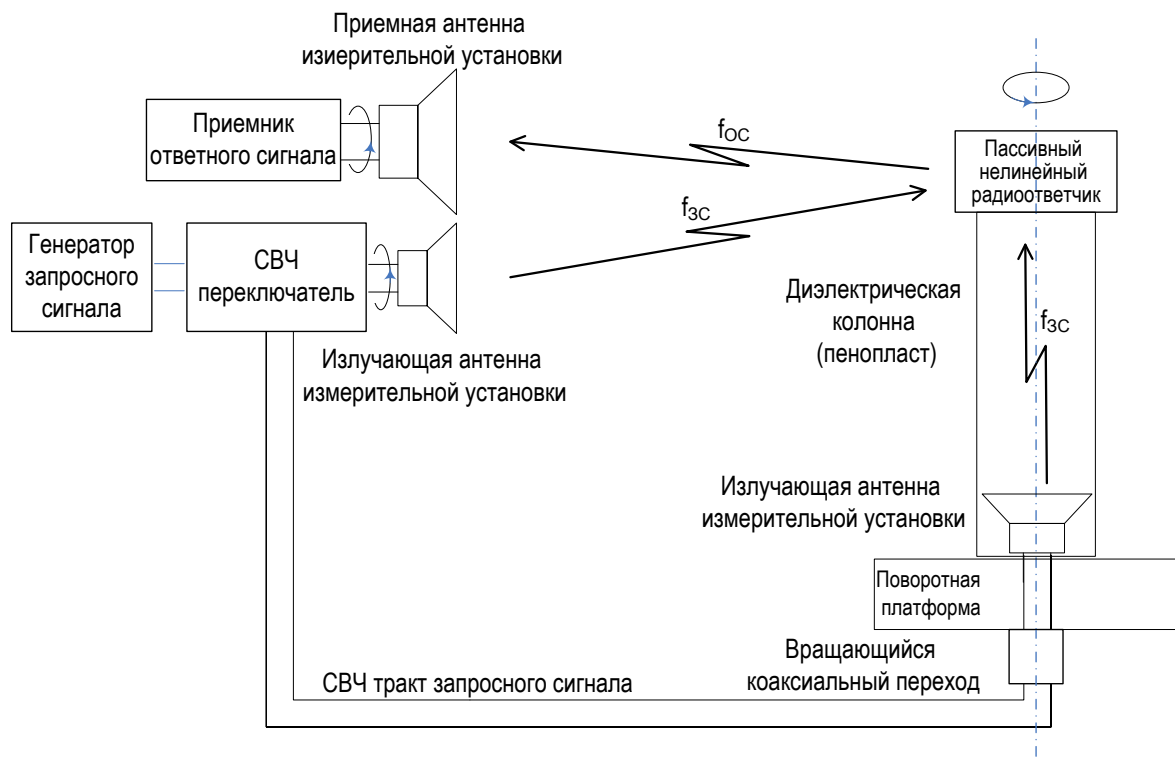


Рис. 3. Измерительная установка

Измерение $D_{ЗС}(\alpha_{ЗС}, \beta_{ЗС}, \theta_{ЗС})$ может быть осуществлено только косвенным методом, так как данная зависимость связана с ЗС, а сигнал принимается на частоте ОС. Соответственно необходимо обратное нелинейное преобразование АХ, которое обозначим как $\mathcal{F}^{-1}$.

Измерения предполагают фиксированное взаимное расположение приемной антенны измерительной установки и ПНР, соответственно $D_{ОС}(\alpha_{ОС}, \beta_{ОС}, \theta_{ОС}) = 1$ и

$$\mathcal{F}^{-1}(\Pi_{ОС}(\Pi_{ЗС}, \alpha_{ЗС}, \beta_{ЗС}, \theta_{ЗС}))/\Pi_{ЗС} = D_{ЗС}(\alpha_{ЗС}, \beta_{ЗС}, \theta_{ЗС}) . \quad (6)$$

Из (6) следует, что изменения $D_{ЗС}(\alpha_{ЗС}, \beta_{ЗС}, \theta_{ЗС})$ возможны при монотонном даже неоднозначном виде $\mathcal{F}^{-1}$. При этом, при измерениях целесообразно совмещать с поворотной платформой приемную антенну поисковой установки.

Серьезная проблема при измерениях $D_{ЗС}(\alpha_{ЗС}, \beta_{ЗС}, \theta_{ЗС})$ возникает из-за того, что диапазон измерений $D_{ЗС}(\alpha_{ЗС}, \beta_{ЗС}, \theta_{ЗС})$ не может превышать динамический диапазон изменения уровня ОС в АХ измеряемого ПНР. Такие ПНР достаточно типичны, в качестве примера на рис. 4 представлена АХ дипольного параметрического рассеивателя у которой изменение уровня ОС ограничено величиной 8 дБ.

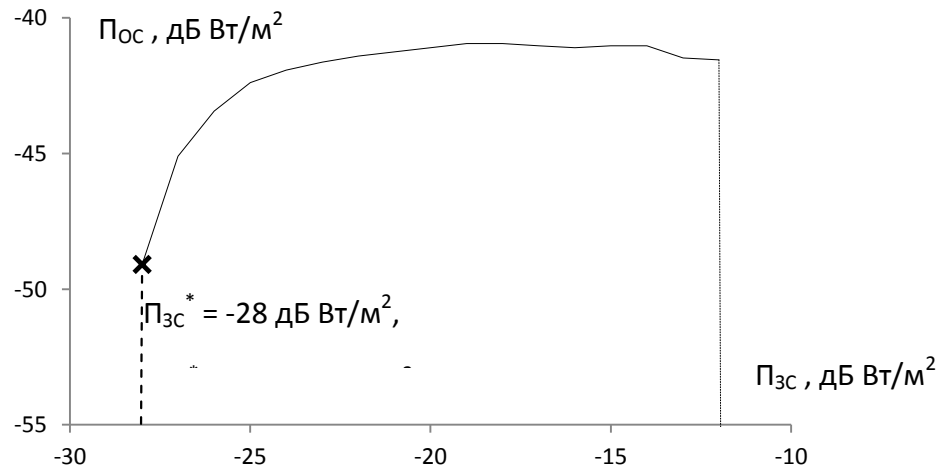


Рис. 4. Амплитудная характеристика дипольного параметрического рассеивателя, $f_{ЗС}=600$ МГц, $f_{ОС}=300$ МГц

Указанная проблема может быть решена путем использования при измерениях предложенного автором метода особой точки. Метод основан на том, что в особых точках АХ зафиксированы и априори известны значения $P_{ЗС}$ и $P_{ОС}$, при этом такая точка (момент возбуждения или срыва ОС, максимум, минимум насыщение) легко идентифицируется в зависимости $P_{ПС}$ от $P_{ИС}$, если есть возможность изменять уровень $P_{ИС}$. В этот момент легко могут быть определены искомые коэффициенты $K_{ЗС}$ и $K_{ОС}$, соответственно измерения выполняются не для условия $P_{ИС} = const$, а для условия $P_{ЗС} = const$.

Введение указанных выше трех характеристик ПНР позволяют корректно формулировать задания на создание ПНР. Описанные выше инструментальные методы измерения открывают возможность ставить задачу конструирования новых ПНР как достижение объективных, измеряемых и не зависящих от внешних факторов зависимостей.

Говоря о теоретических (расчетных) методах нахождения $D_{ЗС}$ и $D_{ОС}$ и АХ, следует отметить, что задача нахождения $D_{ЗС}$ и $D_{ОС}$ линейна, для ее решения может быть использована хорошо развитая теория расчета линейных антенн. Поэтому задачу определения нормированных диаграмм антенн ПНР $D_{ОС}(\alpha_{ОС}, \beta_{ОС}, \theta_{ОС})$ и $D_{ЗС}(\alpha_{ЗС}, \beta_{ЗС}, \theta_{ЗС})$ будем считать решенной и выходящей за рамки настоящего исследования.

Для нахождения АХ необходимо решить нелинейную задачу с использованием существующего арсенала теоретических и расчетных методов, разработанных для анализа электрических схем. Для этого представим ПНР в виде эквивалентной схемы.

Традиционно переход от ПНР (см. рис. 1) к его эквивалентной схеме выполняют на основе теоремы Тевенина, в соответствии с которой антенна, принимающая ЗС, представляется источником ЭДС $e(t)$ с внутренним сопротивлением, равным сопротивлению $R_A(\omega_{ЗС})$ излучения антенны принимающей ЗС на частоте ЗС. Нагрузка ПНР представляется нелинейным сопротивлением $R_{НЭ}$.

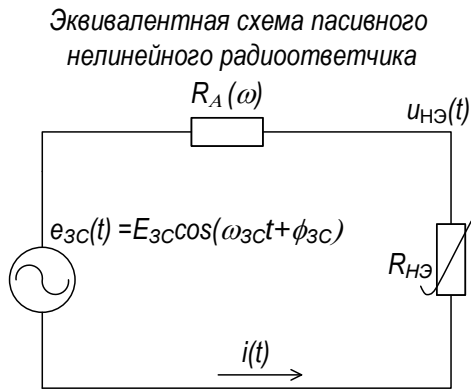


Рис. 5. Эквивалентная схема пассивного нелинейного радиоответчика

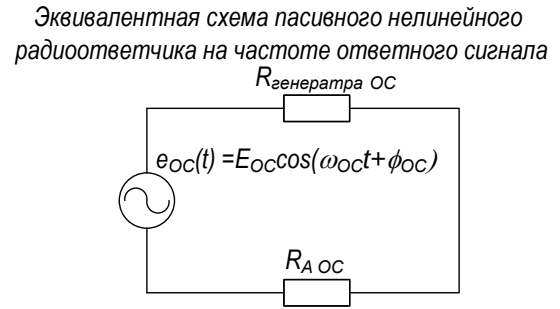


Рис. 6. Эквивалентная схема пассивного нелинейного радиоответчика на частоте ОС

Традиционной целью анализа эквивалентной схемы является получение зависимости:

$$I_{OC} = I_{OC}(E_{3C}), \quad (7)$$

где E_{3C} – амплитуда ЭДС запросного сигнала, формируемого в ПНР облучающей волной ЗС, I_{OC} – амплитуда тока ответного сигнала, протекающего через сопротивление излучения антенны ПНР на частоте ОС.

С точки зрения процессной модели ПНР целью анализа является получение АХ, то есть зависимости (3). Поэтому возникает задача корректного перехода от (7) к (3).

Такой переход можно выполнить на основе закона сохранения энергии. Мощность ЗС запросного сигнала, циркулирующая в схеме ПНР (см. рис. 5) можно определить как:

$$P_{3C} = E_{3C}^2 / (R_A(\omega_{3C}) + R_{HЭ}(\omega_{3C})), \quad (8)$$

С точки зрения процессной модели мощность ЗС попадающая в ПНР определяется соотношением

$$P_{3C} = S_{3C} \Pi_{3C} (1 - \Gamma_{3C}), \quad (9)$$

где S_{3C} – площадь антенны ПНР, принимающей ЗС, Γ_{3C} – коэффициент отражения в тракте приемная антенна ЗС – генератор ОС, который можно определить как: $\Gamma_{3C} = (R_A(\omega_{3C}) - R_{HЭ}(\omega_{3C})) / (R_A(\omega_{3C}) + R_{HЭ}(\omega_{3C}))$, а $R_{HЭ}(\omega_{3C})$ можно определить как:

$$R_{HЭ}(\omega_{3C}) = U_{HЭ 3C} / I_{3C}, \quad (10)$$

где $U_{HЭ 3C}$ – напряжение на нелинейном элементе на частоте ЗС, I_{3C} – ток в цепи на частоте ЗС.

Из выражений (8) - (10) следует, что величина ЭДС определяется величиной сопротивления нелинейного элемента, это сопротивление, в свою очередь зависит от напряжения на нем, которое зависит от величины ЭДС. Другими словами, прямая задача нахождения величины ЭДС по значению интенсивности волны облучающей волны ЗС связана с итерационным процессом. Поэтому целесообразно решать обратную задачу (без итераций)

определения интенсивности волны облучающей волны ЗС по величине ЭДС, которую можно решать на основе результатов анализа эквивалентной схемы. Для этого, кроме зависимости (7) необходимо одновременно найти зависимости:

$$U_{HЭ} = U_{HЭ}(E_{ЗС}); I_{ЗС} = I_{ЗС}(E_{ЗС}) . \quad (11)$$

Величину интенсивности волны ОС, переизлучаемой ПНР, можно найти традиционно:

$$P_{ОС} = I_{ОС}^2 R_A(\omega_{ОС}) G_{ОС} / 4\pi . \quad (12)$$

где $G_{ОС}$ – коэффициент усиления по мощности антенны ПНР, переизлучающей ОС в пространство.

Таким образом, выражения (7) – (12) позволяют находить АХ на основе результатов анализа эквивалентной схемы, то есть зависимостей (7) и (11) .

С задачей анализа эквивалентной схемы ПНР тесно связана задача оптимизации структуры ПНР. С точки зрения процессной модели она может ставится как достижение наилучшего согласования прохождения ЗС в тракте приемная антенна ЗС – генератор ОС и прохождения ОС в тракте генератор ОС – излучающая антенна ОС. Выполненный выше анализ показывает, что наилучшее согласование в тракте приемная антенна ЗС – генератор ОС возможно при достижении условия $R_A(\omega_{ЗС}) = R_{HЭ}(\omega_{ЗС})$. При этом $R_{HЭ}$ зависит от величины ЭДС запросного сигнала, а R_A нет. Это говорит о том, что согласование в тракте приемная антенна ЗС – генератор ОС возможно только при каком-то одном значении ЭДС, то есть при одном значении величины интенсивности волны ЗС, облучающей ПНР.

На частоте ОС эквивалентная схема ПНР имеет вид, представленный на рис. 6. Схема отражает то, что нелинейный элемент на частоте ОС выступает как некоторый эквивалентный генератор, имеющий собственное внутреннее сопротивление, который нагружен на антенну, переизлучающую ОС. Таким образом, все ЭДС генерируемого ОС распределяется между внутренним сопротивлением генератора и сопротивлением антенны. При этом сопротивление нелинейного элемента на частоте ответного сигнала $R_{HЭ}(\omega_{ОС})$ зависит от величины ЭДС запросного сигнала и величин R_A , как на частоте ЗС , так и на частоте ОС. Соответственно достижение согласования антенны ПНР и нелинейного элемента на частоте ОС так же возможно при определенном значении уровня ЗС и сопряжено с итерационной процедурой согласования $R_A(\omega_{ОС})$ и $R_{HЭ}(\omega_{ОС})$.

В указанных условиях задача оптимизации в тракте генератор ОС – излучающая антенна ОС ставится и может быть решена как задача нахождения значения сопротивления излучения антенны на частоте ОС, при котором максимизируется мощность ОС, переизлучаемая этой антенной в пространство. Могут быть предложены и другие критерии оптимизации, например, определение $R_A(\omega_{ЗС})$ и $R_A(\omega_{ОС})$ при которых максимизируется

коэффициент преобразования ЗС в ОС или достигается минимальный уровень возбуждения ПНР (в пороговых системах).

Отметим, что при анализе нужно учитывать, что все использованные величины, в общем случае комплексные.

Вторая глава посвящена исследованию радиоответчиков - нелинейных рассеивателей (НР). НР достаточно давно исследуется в рамках исследований эффекта нелинейного рассеяния радиоволн, поэтому первоначально описаны известные из научной литературы методы описания НР: на основе эквивалентной схемы, на основе анализа нелинейных электродинамических уравнений, о как совокупности невзаимодействующих элементов.

Здесь же представлены результаты анализа простейших НР на основе подхода предложенного автором на основе процессной модели, в частности показано, что легко может быть вычислена нормированная диаграмма обратного нелинейного рассеяния взаимодействия. В качестве примера, на рис.7 представлены результаты расчета для дипольного НР с размерами $1,25\lambda_{ЗС}$, находящемся в режиме слабого взаимодействия для двухпозиционной измерительной установки, которые хорошо согласуются с экспериментом.

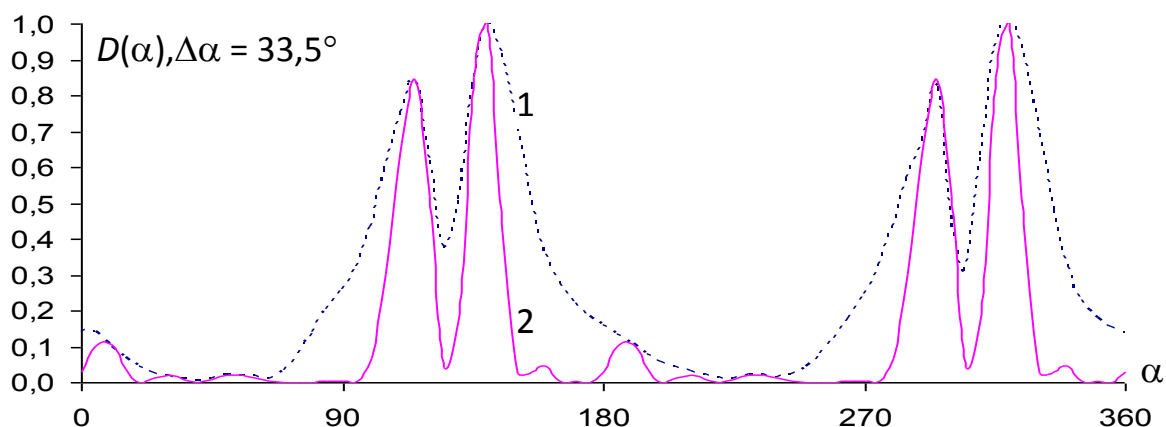


Рис. 7. Нормированная диаграмма обратного нелинейного рассеяния диполя, нагруженного на полупроводниковый диод (угол между направлениями на излучающую и приемную антенны $\Delta\alpha = 33,5^\circ$). 1- эксперимент, 2 – расчет

Также выполнено моделирование реакции на воздействие непрерывного ЗС на дипольный полуволновой (на частоте ЗС) НР, нагруженный на полупроводниковый диод, на частоте второй гармоники ЗС. Представление НР в виде эквивалентной схемы проиллюстрировано на рис. 8.

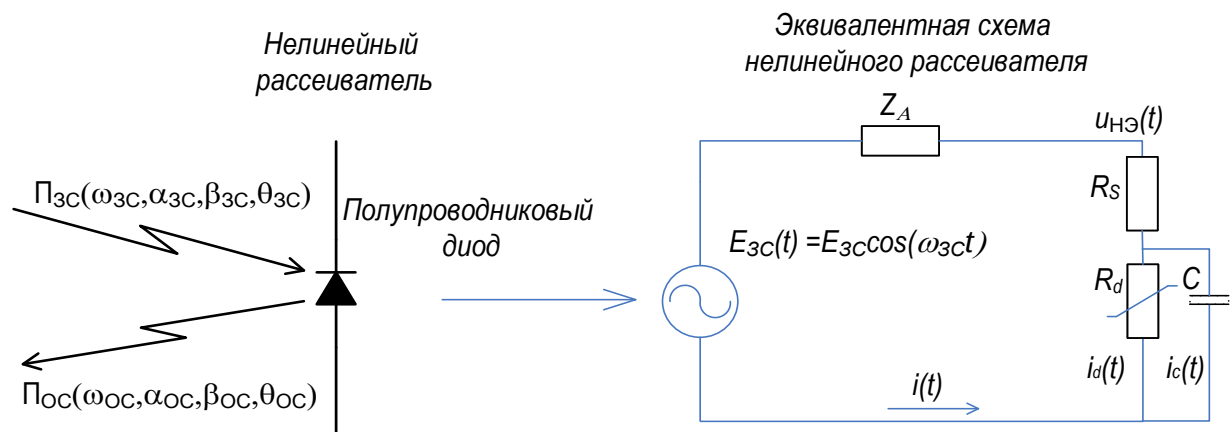


Рис. 8 Представление нелинейного рассеивателя в виде эквивалентной схемы

Для экспоненциальной аппроксимации тока проводимости через диод уравнение, описывающее эквивалентную схему данного НР, легко найти на основе законов Кирхгофа:

$$\frac{dU_d}{dt} = \frac{\frac{E_{3C} \cdot \cos(\omega t) - U_d}{(Z_A + R_s)} - I_s \cdot \left(\exp\left(\frac{U_d}{\eta \cdot V_t}\right) - 1 \right)}{C} \quad (13)$$

Решение уравнения (13) в программной среде National Instruments Labview 2012 с учетом методики пересчета результатов моделирования в значения интенсивности волн ЗС и ОС позволило найти АХ данного дипольного НР (см. рис. 9), которая оказалась в хорошем и количественном и качественном соответствии с экспериментально измеренными АХ.

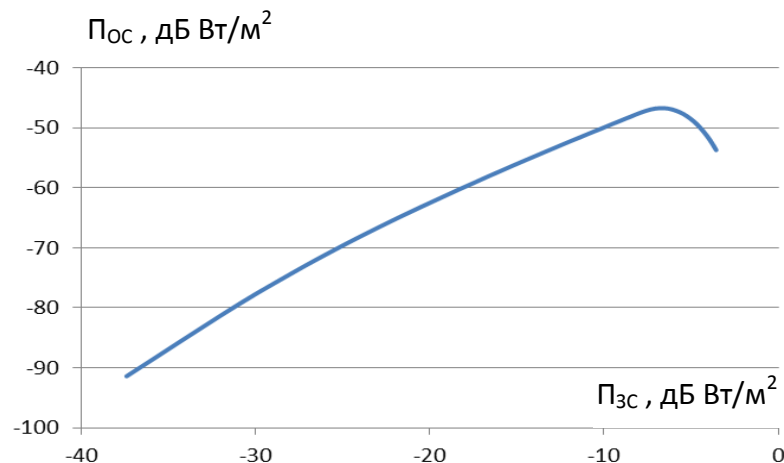


Рис. 9. Рассчитанная амплитудная характеристика дипольного НР

Во второй главе приведены результаты разработки НР - радиомаркеров в виде четырехполюсников. Исследования показали, что наилучшей конструкцией нелинейного элемента для НР – радиомаркера является хорошо известная схема удвоителя напряжения в виде диодного моста, которая кроме высокой эффективности преобразования обеспечивает хорошую развязку

входа и выхода нелинейного элемента, что облегчает независимую настройку антенн маркеров.

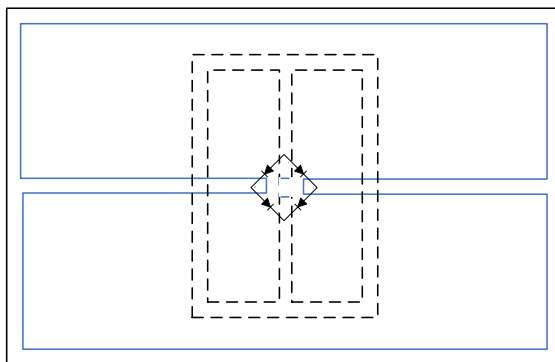


Рис. 10. Эскиз приемной и переизлучающей антенн рефлেকторного НР – маркера

На рис. 10 представлен эскиз приемной и переизлучающей антенн рефлекторного НР – маркера, которые были реализованы в виде двухсторонней печатной платы из фольгированного стеклотекстолита. На сегодняшний день указанная конструкция НР является наиболее эффективной из известных НР - пассивных радиоответчиков. Дальность обнаружения такого НР составила 290 метров при приповерхностном распространении ЗС и ОС и размещении НР на высоте 1,5 метра.

Представлены также результаты анализа вида диаграмм обратного нелинейного рассеяния для 2-х возможных типов отражательных решетки из НР. Кроме того, на основе представлений НР при помощи процессной модели, рассмотрены особенности приема ОС от динамического НР на фоне сигналов, образованных помеховыми НР. Данная задача может возникнуть при использовании НР в качестве датчиков динамически изменяющейся среды.

Приведены результаты экспериментальных исследований по изучению возможности использования боковых волн при нелинейном зондировании. Обнаружено, что комбинированные эффекты (формирование ЗС при помощи боковой волны и прием ОС в виде плоской волны) могут быть обеспечить больший уровень ОС, чем при использовании только боковой или только плоской волны для ЗС и ОС.

Рассмотрен также случай, когда для исследований или контроля над процессами доступна только одна, достаточно узкая частотная полоса. Показано, что при этом в качестве ЗС можно использовать ЗС, состоящий из двух близких частот $f_{ЗС1} \approx f_{ЗС2}$, а в качестве ОС может быть использован комбинационный нелинейный продукт третьего порядка:

$$f_{ОС} = 2f_{ЗС1} \pm f_{ЗС2} \approx f_{ЗС1} \approx f_{ЗС2} . \quad (14)$$

Такой ОС будет сопряжен с появлением нелинейной помехи на той же частоте, соответственно для обеспечения данного режима работы необходимо предусмотреть меры по ее устранению, в частности защите антенн и генераторов ЗС1 и ЗС2 при помощи вентиля и компенсации по крайней мере одного из ЗС на входе приемника.

Третья глава посвящена исследованию пассивных нелинейных радиоответчиков - параметрических рассеивателей.

На основе анализа имеющихся публикаций, выделены основные свойства параметрических рассеивателей, существенные для использования их в качестве ПНР, поставлены связанные с учетом их свойств проблемные задачи, которые необходимо решить при их исследовании, намечены направления решения этих задач. Отмечается, что исследованы в основном дипольные ПР (рис.11), при этом с точки зрения амплитудных (энергетических) свойств существенным является то, что генерация ОС возможна лишь в ограниченном диапазоне интенсивностей волны ЗС (см. рис.4). Соответственно увеличение мощности ЗС, выступающего сигналом накачки, после определённого значения не приводит к росту мощности ОС.

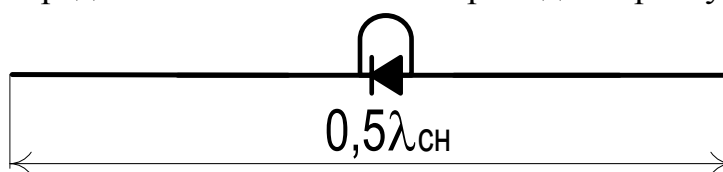


Рис. 11. Дипольный параметрический рассеиватель

С точки зрения частотных свойств существенно, что генерация ответного сигнала на частоте половинной субгармоники сигнала накачки возможна лишь в узкой полосе частот (8-10%), зависящей от уровня запросного сигнала. Соответственно возникает проблема, связанная с тем, что ПР должен сохранять свою работоспособность при различных условиях эксплуатации, в частности в широком диапазоне температур. Изменение температуры окружающей среды влияет на величину емкости диода и, как следствие, при изменении температуры частота сигнала накачки может «выйти» из полосы генерации. Не ясно возможно или нет применение широкополосных сигналов накачки.

Поэтому необходимо: 1) исследование зависимости частотных параметров ПР от температуры окружающей среды и 2) изучение возможности расширения полосы генерации у ПР.

Фазовые свойства ПР характеризуются тем, что фаза ОС φ_{OC} , генерируемого ПР на частоте субгармоники СН, является случайной величиной и может быть определена лишь с точностью до постоянной π : $\varphi_{OC} = \varphi_{CH} / 2 + i \cdot \pi$, (где $i = 1$ или $i = 0$). В результате При облучении ПР импульсной последовательностью радиоимпульсов СН с известными начальными фазами формируется последовательность радиоимпульсов ОС на половинной частоте СН, начальная фаза которых подчиняется бинарному случайному закону, а для системы из нескольких ПР диаграмма обратного нелинейного рассеяния на частоте ОС носит случайный характер.

Исходя из приведённого выше анализа, решение задач повышения эффективности поисковых систем, использующих ПР, сконцентрировано на

двух направлениях: на увеличении чувствительности приемника поисковой установки и на поиске конструкций ПР, обеспечивающих повышенный уровень ответного сигнала.

Первое направление связано с необходимостью организации когерентного накопления импульсов ОС от ПР. Здесь необходимо преодолеть две особенности свойств ПР, упомянутые выше, а именно случайность фазы ответного сигнала при облучении ПР когерентной последовательностью СН и слабый уровень ответного сигнала.

Второе направление связано с поиском новых видов и типов ПР, отличных от единственного исследованного в литературе ПР в виде диполя, нагруженного на параметрический контур с диодом в качестве нелинейной емкости. Перспективными направлениями здесь является синтез конструкций ПР в виде четырехполюсников (трудностью является отсутствие математической модели ПР на которой можно апробировать и «отработать» новые конструкции) и формирование группового ПР в виде некоторой упорядоченной структуры (здесь трудностями являются наличие «глубоких нулей» и случайность вида диаграммы обратного нелинейного рассеяния).

При синтезе конструкций ПР сначала эвристически были предложены новые виды ПР, которые в дальнейшем апробировались при помощи натурных экспериментов и математического моделирования.

Так с целью расширения полосы генерации ПР было предложено увеличить число параметрических генераторов (ПГ) в нагрузке. На рис. 12 представлена структурная схема дипольного ПР с нагрузкой из двух последовательно-включенных ПГ. Число ПГ в нагрузке ПР может быть и больше чем два.

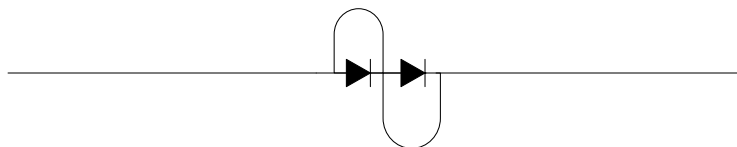


Рис. 12. Схема дипольного ПР с нагрузкой из двух последовательно-включенных ПГ

Идея поиска конструкций ПР – четырехполюсников основана так же на использовании в нагрузке нескольких ПГ. На рис. 13-15 представлены структурные схемы двухгенераторного ПР, мостового ПР и двухконтурного ПР.

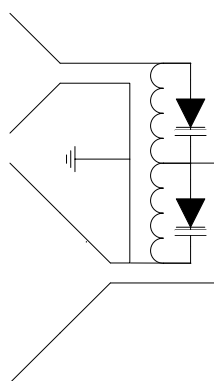


Рис. 13. Структурная схема

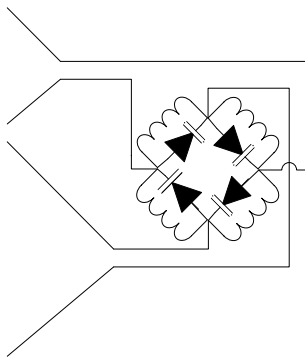


Рис. 14. Структурная схема

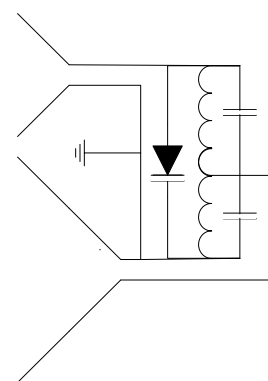


Рис. 15. Структурная схема

Апробация новых видов ПР и исследования свойств ПР выполнялась на измерительных установках, вариант которых представлен на рис. 16.

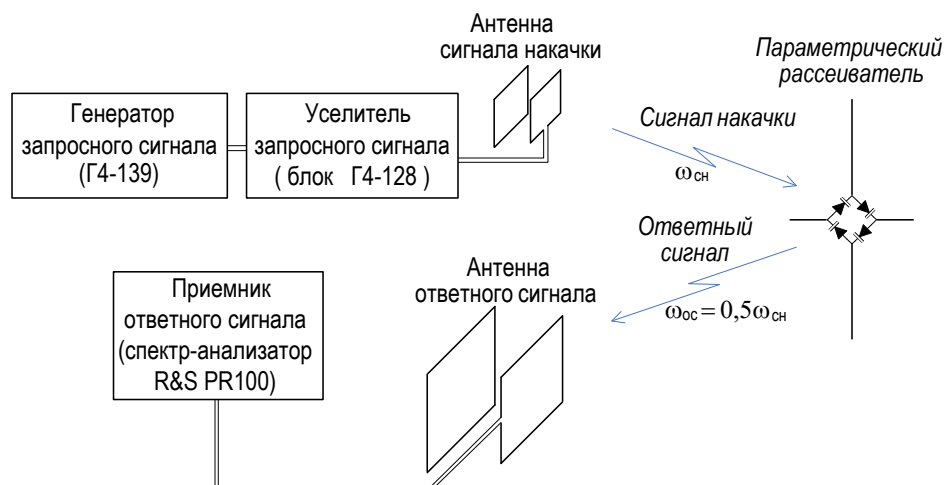


Рис. 16. Вариант построения измерительной установки

Измеренные АХ представлены на рис. 17 и 18. Из рис. 18 следует, что самым эффективным по уровню ОС и по уровню СН, при котором происходит возбуждение ПР оказался мостовой ПР, при этом использование антенны ОС в виде двойного петлевого вибратора с сопротивлением 700 Ом (получено в результате моделирования мостового ПР) привело к увеличению выходного сигнала примерно на 6 дБ. Кроме того зафиксирована тенденция, что увеличение числа ПГ в нагрузке дипольных ПР приводит к увеличению минимального уровня СН, необходимого для возбуждения ПР и одновременно к увеличению уровня максимального ОС. Увеличение числа ПГ в нагрузке ПР так же можно рассматривать как путь увеличения полосы генерации ПР.

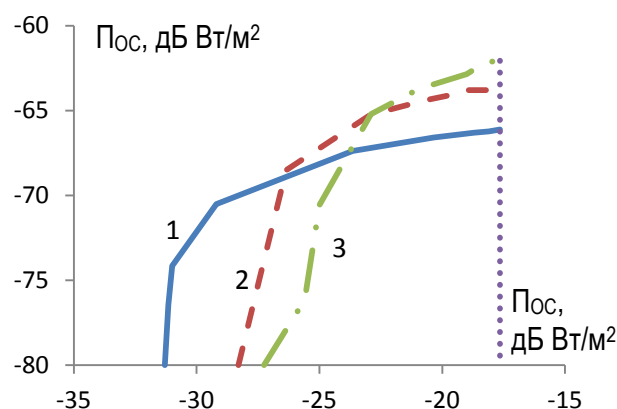


Рис. 17. Экспериментальные амплитудные характеристики дипольных ПР с несколькими ПГ в нагрузке: 1- с одним ПГ, 2- с двумя ПГ, 3- с тремя ПГ

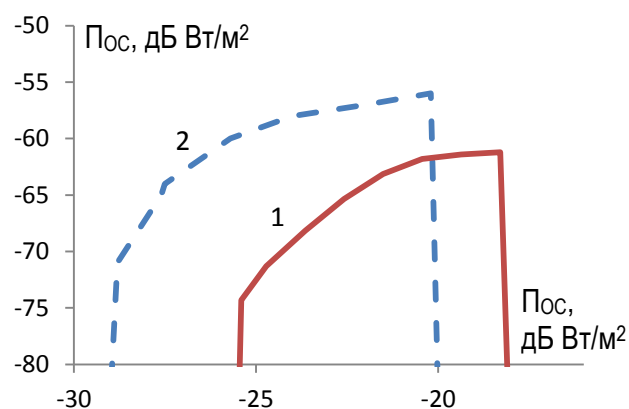


Рис. 18. Экспериментальные амплитудные характеристики мостового ПР: 1- с дипольными антеннами ($R \approx 70 \text{ Ом}$), 2- с двойным петлевым вибратором ($R \approx 700 \text{ Ом}$) в качестве антенны ОС

Еще одним экспериментальным полученным результатом оказалось то, что могут быть использованы и ПГ других типов, например с индуктивностью в виде СВЧ коаксиального резонатора. Величина ОС от рамочного ПР (рис. 19) с индуктивностью в виде коаксиального резонатора оказалась ниже~ на 5 дБ по сравнению с аналогичным ПР с традиционной проволочной индуктивностью (рис. 20).

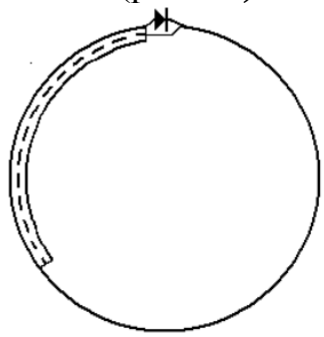


Рис. 19. Рамочный ПР с индуктивностью в виде коаксиального резонатора

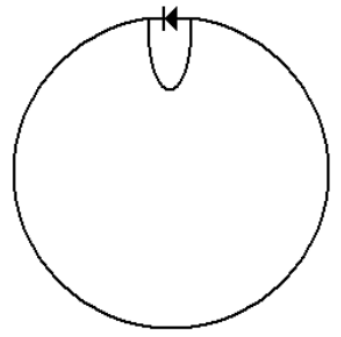


Рис. 20. Рамочный ПР с проволочной индуктивностью

Кроме того, было экспериментально обнаружено, что ПР при сильных сигналах накачки, может перейти в режим генерации шумового колебания во всей рабочей полосе частот генерации ОС.

При исследовании влияния температуры окружающей среды на ПР было обнаружено, что её снижение приводит к изменению порога возбуждения и сужению полосы генерации субгармонического параметрического рассеивателя, при этом центральная частота полосы генерации не изменяется. Графики зависимости параметров ОС от температуры представлены на рис. 21 и 22.

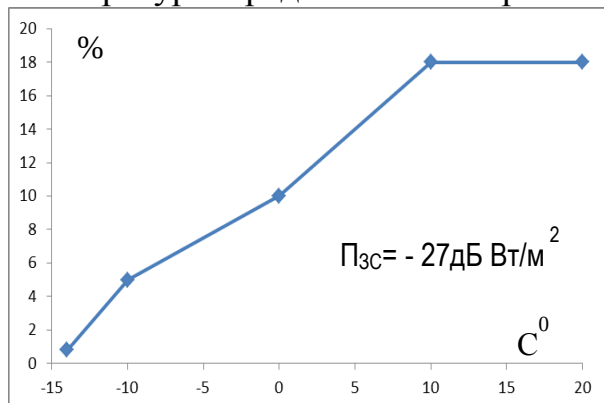


Рис. 21. Зависимость полосы генерации ПР от температуры окружающей среды

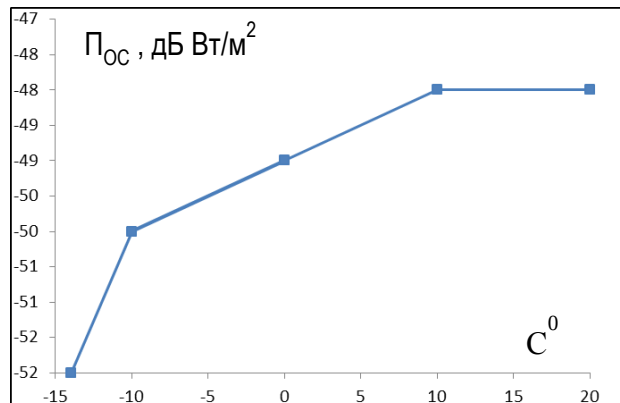


Рис. 22. Зависимость максимального уровня ОС от температуры окружающей среды

Для учета амплитудных свойств было предложено использовать СН в виде серий последовательностей одинаковой длительности из большого количества радиоимпульсов, при этом амплитуда радиоимпульсов должна меняться от группы к группе на величину несколько меньше динамического диапазона ПР, при котором происходит генерация в ПР. (см. рис. 23). При таком СН одна из групп СН будет преобразована в ПР в последовательность ОС.

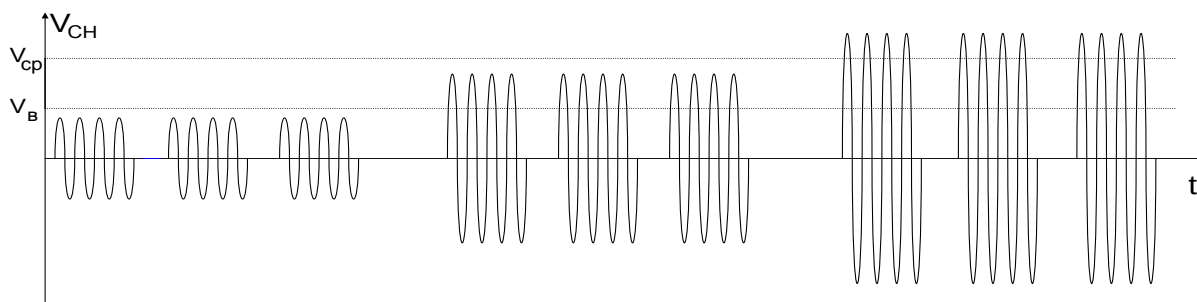


Рис. 23. Условная временная зависимость серий радиоимпульсов СН

Учет фазовых свойств ПР связан с хорошо известным свойством ПГ синхронизироваться при возбуждении внешним сигналом на частоте генерации. Действительно, если одновременно с последовательностью из n радиоимпульсов СН излучать последовательность коротких радиоимпульсов синхронизирующих сигналов (СС), то фаза СС «задаст» фазу радиоимпульсов ОС, которая окажется когерентной последовательностью из n радиоимпульсов ОС, закодированной по известному закону. Соответственно эту когерентную последовательность радиоимпульсов ОС можно будет подвергнуть когерентной обработке в приемнике, подняв его чувствительность в $n^{1/2}$ раз.

Однако последовательность радиоимпульсов СС будет когерентной помехой радиоприему, ее радиоимпульсы многократно отражаясь от подстилающей поверхности и окружающих предметов сведут на нет увеличение чувствительности приемника за счет когерентной обработки.

Поэтому задача увеличения чувствительности приемника ОС поисковой установки была сформулирована следующим образом:

- 1) *обеспечение присутствия синхросигнала в момент возбуждения параметрического рассеивателя;*
- 2) *компенсация помехового действия синхросигнала на входе приемника ответного сигнала.*

Решение указанной задачи представляет собой комплекс мер, обеспечивающих выполнение указанных выше 2-х условий, названный нами **«теорией синхронизации»**. Теория разрабатывалась из предположения, что ЗС будет состоять одновременно из радиоимпульсов СН и СС, которые будут излучаться сериями последовательностей. Поэтому в приемнике поисковой установки должны быть предусмотрены меры по обработке одиночных радиоимпульсов ОС, серий радиоимпульсов ОС и последовательности серий ОС, снижающие помеховое воздействие радиоимпульсов СС.

Первая проблема, решенная с помощью теории синхронизации, связана с тем, что из-за разницы в значениях частот СН и СС (они отличаются в 2 раза) могут на небольшое значение различаться пути СН и СС, излученные в синхронизме, т.е. при условии $0,5\varphi_{\text{СН}} = \varphi_{\text{СС}}$. Эти фазы получают могут

получить приращения, так что $0,5\Delta\varphi_{\text{CH}} \neq \Delta\varphi_{\text{CC}}$, при этом может быть выполнено условие:

$$0,5(\varphi_{\text{CH}} + \Delta\varphi_{\text{CH}}) - (\varphi_{\text{CC}} + \Delta\varphi_{\text{CC}}) \approx 0,5\pi, \quad (15)$$

при котором синхронизации ОС от СС не будет происходить.

Решением указанной проблемы является излучение еще одной последовательности ЗС, для которой радиоимпульсы СН инвертированы (что просто технически). То есть выполняется условие $0,5\varphi_{\text{CH}} + \pi = \varphi_{\text{CC}}$, соответственно, если верно (15), то:

$$0,5(\varphi_{\text{CH}} + \pi + \Delta\varphi_{\text{CH}}) - (\varphi_{\text{CC}} + \Delta\varphi_{\text{CC}}) \approx 0, \quad (16)$$

т.е. синхронизация будет происходить.

При обработке серий и последовательностей серий проблема синхронизации заключается в том, что, с одной стороны, последовательность радиоимпульсов СС должна быть закодирована так, чтобы при синхронизации обеспечить формирование последовательности радиоимпульсов ОС с заданным законом кодирования, на который настроен приемник поисковой установки, а, с другой стороны, последовательность радиоимпульсов СС должна быть закодирована так, чтобы она подавлялась или по крайней мере не накапливалась в приемнике.

Платой за выполнение данных противоречивых требований является отказ от полного синхронизма в последовательности ОС на время, не превышающее длительность синхроимпульса, который может быть много меньше, чем длительность радиоимпульса ОС. При этом СС предложено формировать в виде, следующих друг за другом через короткий временной промежуток двух коротких одинаковых, но противофазных радиоимпульсов что позволяет выполнять синхронизацию или от первого или от второго из синхроимпульсов (для этого нужно варьировать передний фронт радиоимпульса СН) и, соответственно, задавать закон кодирования радиоимпульсов ОС, отличный от закона кодирования радиоимпульсов СС.

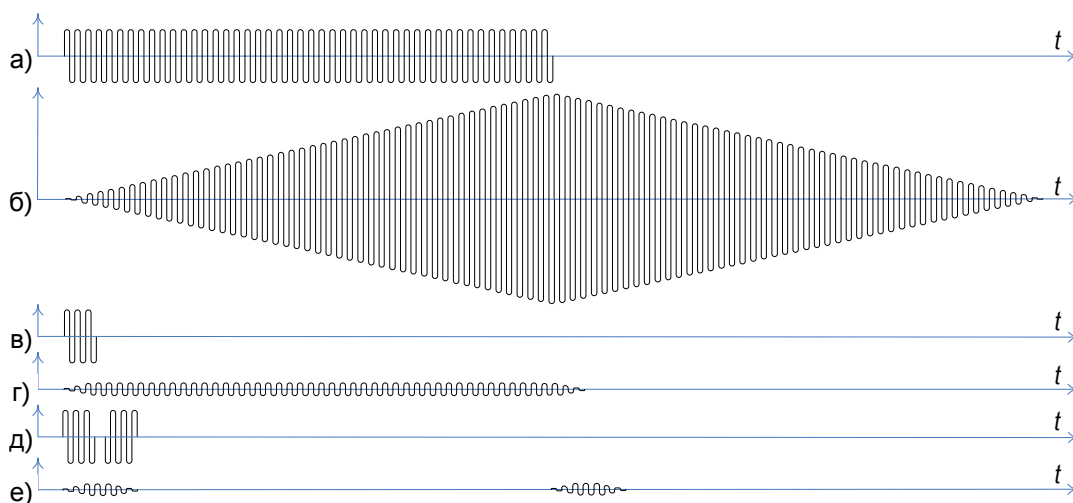


Рис. 24. Условные осциллограммы радиоимпульсов ОС и СС

На рис. 24 представлены условные осциллограммы радиоимпульса ОС (а), результата его прохождения через согласованный с ним фильтр (б), СС в виде одиночного радиоимпульса (в), результата его прохождения через согласованный с ОС фильтр (г), СС в виде пары радиоимпульсов (д), результата их прохождения через согласованный с ОС фильтр (е). Из рис. 24 видно, что для СС в виде пары радиоимпульсов происходит частичная взаимокompенсация, что снижает их помеховое влияние на приемник, по сравнению с одиночным радиоимпульсом СС.

Условные осциллограммы, поясняющие процесс формирования последовательности из 3-х радиоимпульсов ОС в ПР и обработка последовательностей СС и ОС в приемнике представлены на рис. 25.

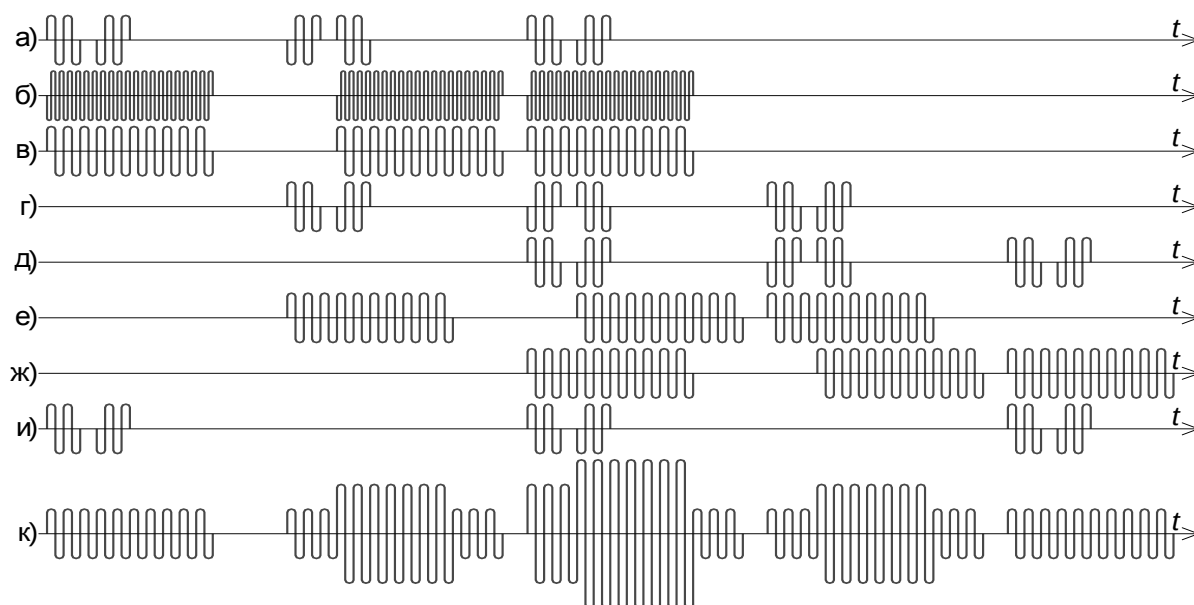


Рис. 25. Условные осциллограммы для обработки последовательностей (3 импульса) СС и ОС

Здесь на кривой (а) отображена условная осциллограмма последовательности парных радиоимпульсов СС закодированной по закону 1,-1,1; на кривой (б) представлена несинхронная последовательность радиоимпульсов СН; в результате взаимодействия в ПР последовательностей радиоимпульсов СС и СН формируется последовательность радиоимпульсов ОС, отображённая на кривой (в), которая закодирована по закону 1,1,1; на кривых (г) и (д) представлены последовательности парных радиоимпульсов СС, сдвинутые на период и на два периода следования импульсов СС (процесс оптимальной обработки последовательности в приемнике, настроенном на последовательность, закодированную по закону 1,1,1); на кривых (е) и (ж) представлены последовательности радиоимпульсов ОС, сдвинутые на период и на два периода следования импульсов СС. На кривой (и) представлен результат обработки последовательности СС в приемнике, настроенном на последовательность, закодированную по закону 1,1,1, где видно, что когерентного сложения не произошло. На кривой (к) представлен результат обработки последовательности ОС в приемнике, настроенном на

последовательность, закодированную по закону 1,1,1, где видно, что произошло когерентное сложение.

Условные осциллограммы, поясняющие процесс формирования серии из 2-х последовательностей из 4-х радиоимпульсов ОС в ПР и обработка этой серии вместе с соответствующими последовательностями СС в приемнике представлены на рис. 26.

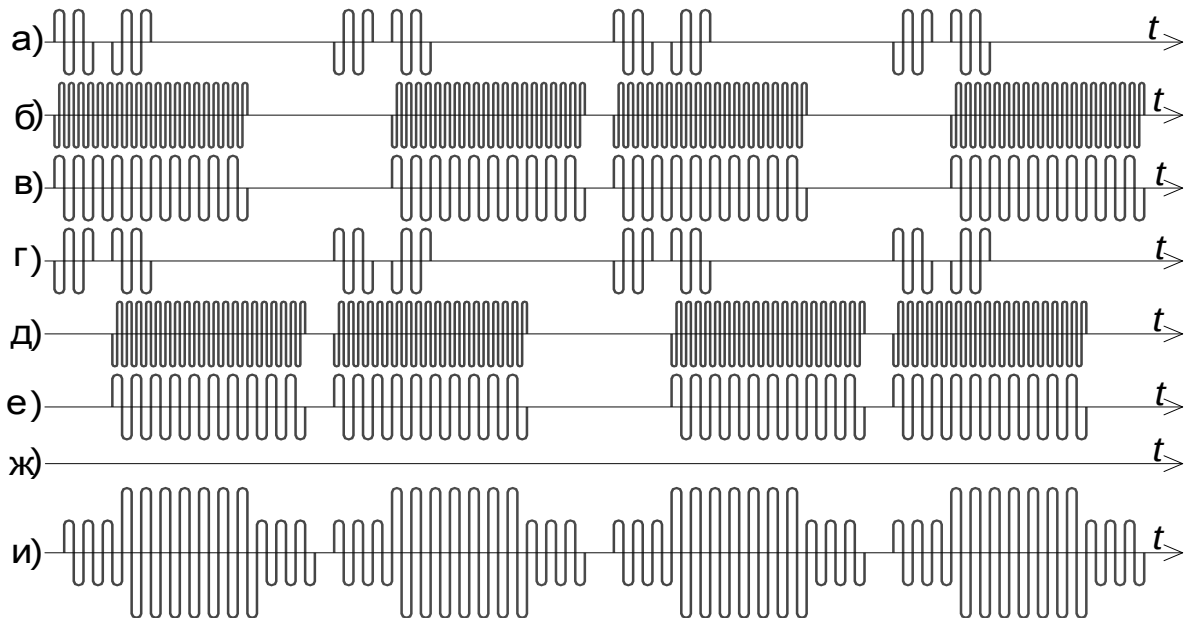


Рис. 26. Условные осциллограммы для обработки последовательностей (4 импульса) СС и ОС

На кривой (а) отображена условная осциллограмма первой из серии последовательности парных радиоимпульсов СС закодированной по закону 1,-1,1,-1; на кривой (б) представлена несинхронная последовательность радиоимпульсов СН; в результате взаимодействия в ПР последовательностей радиоимпульсов СС и СН формируется последовательность радиоимпульсов ОС, отображённая на кривой (в), которая закодирована по закону 1,1,1,1; на кривой (г) отображена условная осциллограмма второй из серии последовательности парных радиоимпульсов СС закодированной по закону -1,1,-1,1; на кривой (д) представлена несинхронная последовательность радиоимпульсов СН; в результате взаимодействия в ПР последовательностей радиоимпульсов СС и СН формируется последовательность радиоимпульсов ОС, отображённая на кривой (е), которая закодирована по закону 1,1,1,1. Обработка в серии сводится к суммированию первой и второй последовательностей СС и ОС. Результаты суммирования последовательностей СС представлены на кривой (ж), где видно, что так как первая (а) и вторая (г) последовательности СС противофазные - они взаимно компенсируются. Результаты суммирования последовательностей ОС представлены на кривой (и), где видно, что, так как первая (в) и вторая (е) последовательности ОС синфазны и несколько несинхронны - они суммируются со сдвигом.

Предложенная технология может быть распространена на случай использования СН в виде радиоимпульсов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). ОС соответственно тоже являются ЛЧМ радиоимпульсами, которые могут быть сжаты в согласованном фильтре. Для того, чтобы радиоимпульсы СС не накапливались в согласованном фильтре их целесообразно формировать в виде ЛЧМ радиоимпульсов с обратным законом изменения частоты. Для обеспечения возможности обработки последовательностей и серий из последовательностей ОС, также применяются СС в виде парных противофазных ЛЧМ радиоимпульсов, при этом синхронизация осуществляется то от конца первого из синхроимпульсов, то от начала второго, когда их мгновенные частоты совпадают с частотами ОС, возбуждаемого в ПР. Соответственно, временной промежуток между синхроимпульсами равен их длительности. Прохождение ЛЧМ ОС и ЛЧМ СС с обратным знаком через фильтр, согласованный с ЛЧМ ОС моделировалось с помощью программного комплекса LabVIEW. Результаты моделирования представлены на рис. 27, 28.

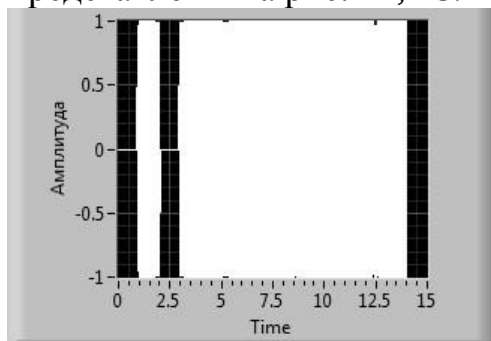


Рис. 27. Смесь радиоимпульсов СС и ОС с ЛЧМ с обратными законами на входе фильтра, согласованного с ОС

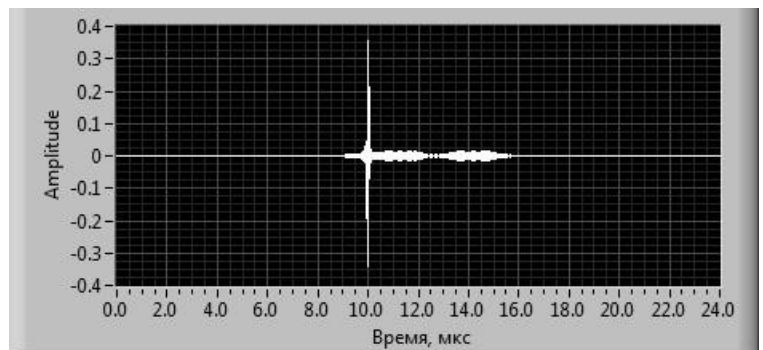


Рис. 28. Смесь радиоимпульсов СС и ОС с ЛЧМ с обратными законами на выходе фильтра, согласованного с ОС

Из результатов машинного эксперимента следует, что происходит компрессия на величину базы ОС, при ослаблении радиоимпульсов СС.

В диссертации рассмотрены две возможности осуществления внеполосной синхронизации при формировании ОС (частота СС не совпадает с частотой ОС).

Первая из них связана с использованием двухконтурного ПР, имеющего две разные частоты генерации ОС f_1 и f_2 , которые связаны с СН соотношением $f_{\text{СН}} = f_1 + f_2$. Фазы СН и ОС связаны тем же соотношением $\varphi_{\text{СН}} = \varphi_1 + \varphi_2$. Одновременное облучение двухконтурного ПР сигналом с частотой f_1 и СН приведёт к возбуждению ОС на частоте f_2 с определенной фазой $\varphi_{\text{СН}} - \varphi_1 = \varphi_2$.

Вторая возможность связана с идеей формирования источника СС непосредственно в ПР, например, введя в конструкцию ПР дополнительного НР (см. рис. 29). Данный НР можно облучить таким вспомогательным сигналом, что в результате нелинейного преобразования на НР будет

переизлучаться сигнал с частотой ОС, который можно использовать как синхронизирующий. Такой вид синхронизации ПР был назван «нелинейной» синхронизацией.

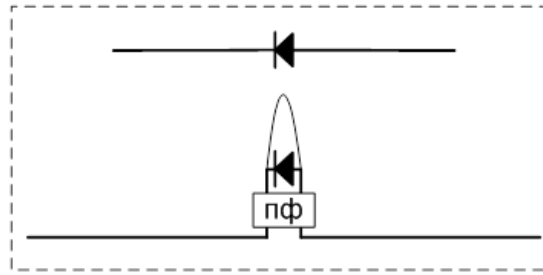


Рис. 29. Конструкция ПР для нелинейного способа синхронизации

В качестве вспомогательного сигнала может быть использован сигнал с частотой $f_{\text{BC}} = 0,5 \cdot f_{\text{OC}} = 0,25 \cdot f_{\text{CH}} = 0,5 \cdot f_{\text{CC}}$.

Вспомогательный сигнал может быть двухчастотный с частотами f_{BC1} и f_{BC2} , тогда $f_{\text{BC1}} \pm f_{\text{BC2}} = f_{\text{CC}} = f_{\text{OC}} = 0,5 \cdot f_{\text{CH}}$.

Синхронизирующий сигнал может быть результатом нелинейного взаимодействия на НР вспомогательного сигнала и СН. Для этого $f_{\text{BC}} = 1,5 \cdot f_{\text{CH}}$ тогда: $f_{\text{BC}} - f_{\text{CH}} = 1,5 \cdot f_{\text{CH}} - f_{\text{CH}} = 0,5 \cdot f_{\text{CH}} = f_{\text{CC}} = f_{\text{OC}}$.

Использование явления синхронизации позволяет решить проблему формирования структур из ПР. К настоящему времени известно три механизма синхронизации групп из ПР: 1) облучение группы из ПР ЗС в составе СН и СС; 2) введение в группу «лидера» - ПР с наименьшими уровнем возбуждения по сравнению с остальными, тогда монотонное увеличение уровня СН приведет к тому, что лидер возбуждётся первым, а затем будет источником СС для остальных ПР в группе; 3) введение в группу НР с использованием нелинейного способа синхронизации, описанного выше.

Последовательное использование двух из названных механизмов синхронизации системы ПР позволяет формировать суммарную диаграмму обратного нелинейного рассеяния от системы из ПР, не содержащую глубоких «нулей». На рис. 30 представлена, рассчитанная диаграмма обратного нелинейного рассеяния группового радиомаркера, состоящего из 12 ПР с лидером – НР в центре, условный вид которого показан на рис. 31. Ввиду симметричности ДОНР на рис. 30 представлен её участок шириной в 30° .

Суммарный вклад от данной системы во всех направлениях по крайней мере на 11 дБ превышает отклик от одиночного ПР.

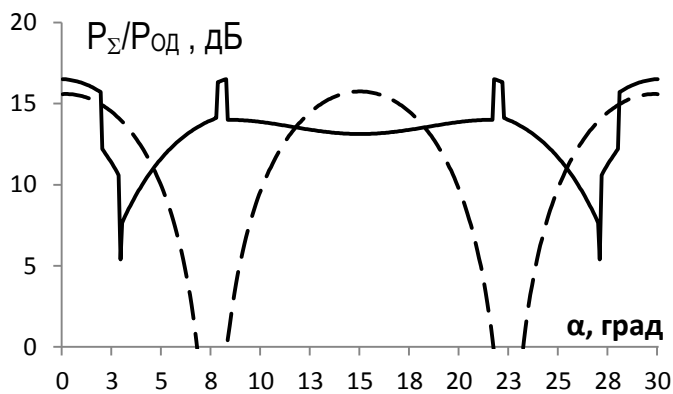


Рис. 30. Пунктир – синхронизация от СС, сплошная – от НР

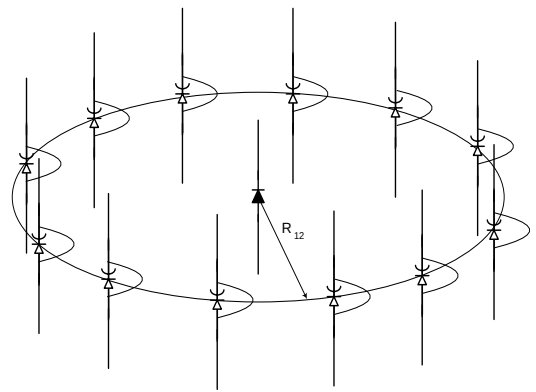


Рис.31. Групповой ПР из 12 ПР с лидером – НР ($R_{12}=1,19\lambda_{ос}$)

Как отмечалось выше для апробации новых типов ПР необходима разработка их математических моделей, удобных для проведения дальнейших расчетных экспериментов. В литературе отсутствовали работы по разработке теории или моделированию ПР, однако существуют работы, посвященные теоретическому изучению и моделированию параметрических явлений. Активное исследование нелинейно-параметрических явлений в радиоцепях ведется в Воронежском государственном университете под руководством профессоров Бирюка Н.Д. и Нечаева Ю.Б. Исследования параметрических систем в высших зонах неустойчивости колебаний ведутся в Южно-Российском государственном техническом университете д.ф.-м.н. Л.В.Черкесовой.

При моделировании ПР первоначально была исследована резистивная модель дипольного ПР (см. рис. 32), в которой антенна диполя моделировалась активным сопротивлением.

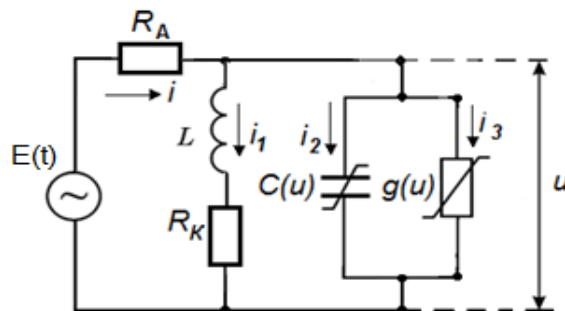


Рис. 32. Резистивная модель дипольного параметрического рассеивателя

Моделирование сводится к анализу базовых уравнений Кирхгофа,

$$\begin{cases} L \frac{di_1}{dt} + i_1 R_K + i R_A = E, \\ i = i_1 + i_2 + i_3. \end{cases}$$

которые, с помощью полиномиальной аппроксимации тока, протекающего через нелинейную емкость, и экспоненциальной аппроксимации тока

проводимости через р-п переход преобразуются в дифференциальное уравнение 2-го порядка, являющимся математической моделью дипольного ПР:

$$\frac{d^2 u}{dt^2} = - \left\{ \frac{du}{dt} \left[\frac{g_0}{C_0} e^{bu} (1 + bu) + \frac{R_k}{L} \sum_{n=0}^N (n+1) \beta_n u^n + \frac{1}{C_0 R_f} \right] + \left(\frac{du}{dt} \right)^2 \sum_{n=0}^N n(n+1) \beta_n u^{n-1} + \right. \\ \left. + \omega_0^2 \left[u \left[R_k \left(g_0 e^{bu} + \frac{1}{R_A} \right) + 1 \right] - \left(\frac{L}{R_A} \frac{dE}{dt} + \frac{R_k}{R_A} E \right) \right] \right\} / \left(\sum_{n=0}^N (n+1) \beta_n u^n \right) \quad (17)$$

Численное решение уравнения (17) после замены переменных сводится к решению системы двух дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{cases} x1 = \frac{dx}{dt} \\ \frac{dx1}{dt} = F_1 \end{cases}, \quad \text{где } x = u; \quad (18)$$

$$F_1 = - \left\{ x1 \left[\frac{g_0}{C_0} e^{bx} (1 + bx) + \frac{R_k}{L} \sum_{n=0}^N (n+1) \beta_n x^n + \frac{1}{C_0 R_f} \right] + (x1)^2 \sum_{n=0}^N n(n+1) \beta_n x^{n-1} + \right. \\ \left. + \omega_0^2 \left[x \left[R_k \left(g_0 e^{bx} + \frac{1}{R_A} \right) + 1 \right] - \left(\frac{L}{R_A} \frac{dE}{dt} + \frac{R_k}{R_A} E \right) \right] \right\} / \left(\sum_{n=0}^N (n+1) \beta_n x^n \right).$$

Для учета частотных свойств антенн ПР была разработана резонансная модель, в которой антенна представлялась последовательным электрическим контуром, что позволило перейти к моделированию ПР - четырехполюсников, в частности мостового ПР. Схема мостового ПР представлена на рис. 33.

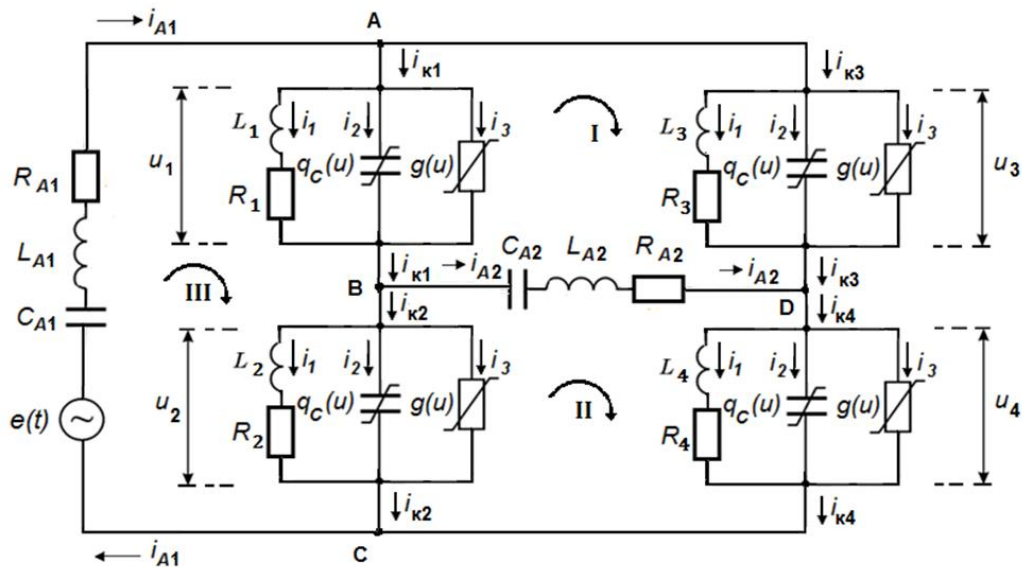


Рис. 33. Эквивалентная схема мостового параметрического рассеивателя

Система базовых уравнений мостового ПР имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{A1} = i_{K1} + i_{K3} \\ i_{K1} = i_{K2} + i_{A2} \\ i_{A2} = i_{K4} - i_{K3} \\ -u_1 + u_3 - u_{A2} = 0 \\ -u_2 + u_{A2} + u_4 = 0 \\ u_{A1} + u_1 + u_2 = e(t) \\ \frac{d^2 i_{A1}}{dt^2} = - \left(\frac{R_{A1}}{L_{A1}} \frac{di_{A1}}{dt} + \frac{1}{L_{A1} C_{A1}} i_{A1} \right) + \frac{R_{A1}}{L_{A1}} \left(\frac{de(t)}{dt} - \frac{du_1}{dt} - \frac{du_2}{dt} \right) \\ \frac{d^2 i_{A2}}{dt^2} = - \left(\frac{R_{A2}}{L_{A2}} \frac{di_{A2}}{dt} + \frac{1}{L_{A2} C_{A2}} i_{A2} \right) + \frac{1}{L_{A2}} \left(\frac{du_2}{dt} - \frac{du_4}{dt} \right) \end{array} \right. \quad (19)$$

Уравнения (19) преобразуются в систему (20) из 10 дифференциальных уравнений 2-го порядка, являющимися математической моделью мостового ПР.

$$\begin{aligned} \frac{d^2 i_{A1}}{dt^2} &= \frac{d^2 i_{A1}}{dt^2} = \frac{1}{L_{A1}} \left(\frac{de(t)}{dt} - \frac{d}{dt} (u_1 + u_2) - R_{A1} \frac{di_{A1}}{dt} - \frac{1}{C_{A1}} i_{A1} \right) \\ \frac{d^2 i_{A2}}{dt^2} &= \frac{1}{L_{A2}} \left(\frac{du_2}{dt} - \frac{du_4}{dt} - R_{A2} \frac{di_{A2}}{dt} - \frac{1}{C_{A2}} i_{A2} \right); \\ \frac{d^2 i_{K1}}{dt^2} &= \frac{1}{L_{A1}} \left(\frac{de(t)}{dt} - \frac{du_2}{dt} - R_{A1} \frac{di_{K1}}{dt} - \frac{i_{K1}}{C_{A1}} \right); \\ \frac{d^2 i_{K2}}{dt^2} &= \frac{1}{L_{A1}} \left(-\frac{du_4}{dt} - R_{A1} \frac{di_{K2}}{dt} - \frac{i_{K2}}{C_{A1}} \right); \\ \frac{d^2 i_{K3}}{dt^2} &= \frac{1}{L_{A1}} \left(-\frac{du_1}{dt} - R_{A1} \frac{di_{K3}}{dt} - \frac{i_{K3}}{C_{A1}} \right); \\ \frac{d^2 i_{K4}}{dt^2} &= \frac{1}{L_{A1}} \left(\frac{de(t)}{dt} - \frac{du_3}{dt} - R_{A1} \frac{di_{K4}}{dt} - \frac{i_{K4}}{C_{A1}} \right); \\ \frac{d^2 u_1}{dt^2} &= - \left\{ \frac{du_1}{dt} \left[\frac{D_1 E_1}{C_{01}} + \frac{R_1}{L_1} A_1 \right] + \left(\frac{du_1}{dt} \right)^2 B_1 + \omega_{01}^2 \left[u_1 (R_1 D_1 + 1) - \left(L_1 \frac{di_{k1}}{dt} + i_{k1} R_1 \right) \right] \right\} / A_1; \\ \frac{d^2 u_2}{dt^2} &= - \left\{ \frac{du_2}{dt} \left[\frac{D_2 E_2}{C_{02}} + \frac{R_2}{L_2} A_2 \right] + \left(\frac{du_2}{dt} \right)^2 B_2 + \omega_{02}^2 \left[u_2 (R_2 D_2 + 1) - \left(L_2 \frac{di_{k2}}{dt} + i_{k2} R_2 \right) \right] \right\} / A_2; \\ \frac{d^2 u_3}{dt^2} &= - \left\{ \frac{du_3}{dt} \left[\frac{D_3 E_3}{C_{03}} + \frac{R_3}{L_3} A_3 \right] + \left(\frac{du_3}{dt} \right)^2 B_3 + \omega_{03}^2 \left[u_3 (R_3 D_3 + 1) - \left(L_3 \frac{di_{k3}}{dt} + i_{k3} R_3 \right) \right] \right\} / A_3; \\ \frac{d^2 u_4}{dt^2} &= - \left\{ \frac{du_4}{dt} \left[\frac{D_4 E_4}{C_{04}} + \frac{R_4}{L_4} A_4 \right] + \left(\frac{du_4}{dt} \right)^2 B_4 + \omega_{04}^2 \left[u_4 (R_4 D_4 + 1) - \left(L_4 \frac{di_{k4}}{dt} + i_{k4} R_4 \right) \right] \right\} / A_4. \end{aligned} \quad (20)$$

Далее система (20) была преобразована в систему из 20 дифференциальных уравнений 1-го порядка, аналогичных (18), удобных для выполнения математического моделирования, которое осуществлялось средствами программного комплекса LabVIEW. Результаты численного моделирования преобразовывались в искомую амплитудную характеристику ПР (см. рис. 34) при помощи методики, описанной в разделе 1.

Сравнение результатов математического моделирования и натурного эксперимента показало (см. рис. 18) хорошее количественное и качественное соответствие, что позволило сделать вывод о верификации разработанных математических моделей ПР и продолжить исследования свойств ПР, в частности, их временных и частотных свойств.

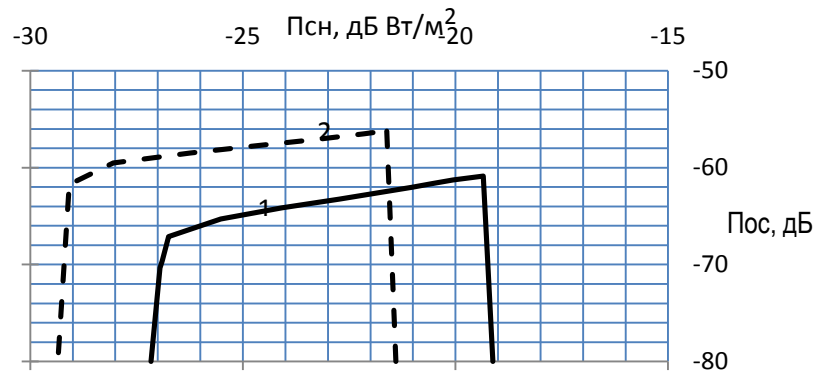
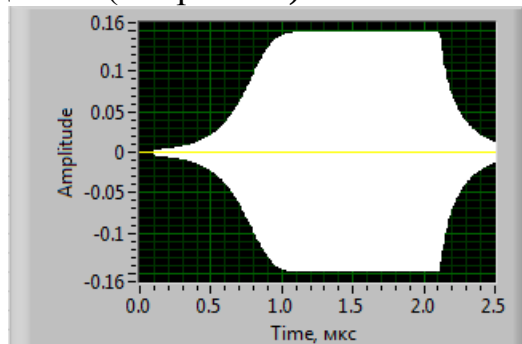
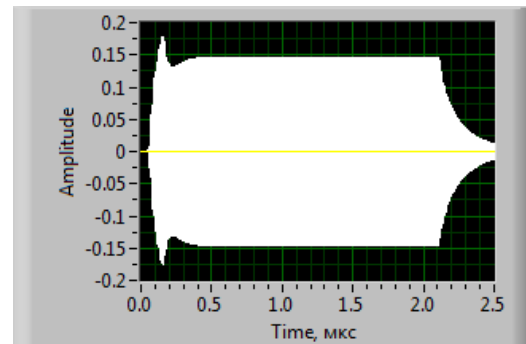


Рис. 34. Рассчитанные амплитудные характеристики мостового ПР: 1- с дипольными антеннами ($R \approx 70 \text{ Ом}$), 2- с двойным петлевым вибратором ($R \approx 700 \text{ Ом}$) в качестве антенны ОС

На основе машинного эксперимента было определено, что СС должен быть достаточно интенсивным по сравнению с СН (меньше примерно на величину добротности параметрического контура) чтобы «подготовить» контур к возбуждению и обеспечить уменьшение времени переходных процессов (см. рис. 35).



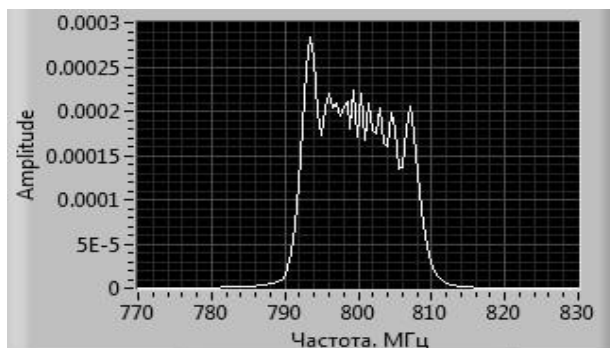
а)



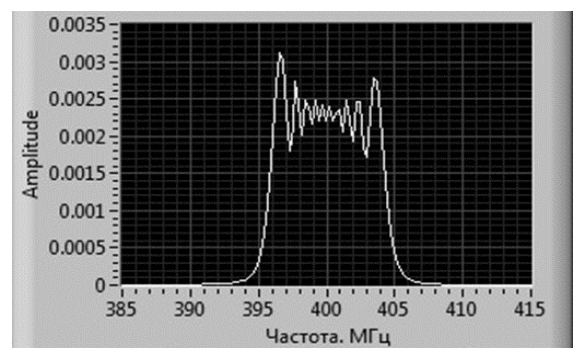
б)

Рис. 35. Результат формирования ОС в мостовом ПР без синхронизации (а) и с синхронизацией (б). $U_{\text{отн}} = 0,15$; $T_{\text{ос}} = 2 \text{ мкс}$, $T_{\text{сс}} = 0,1 \text{ мкс}$

Исследования так же показали, что и для ПР с несколькими ПГ в нагрузке при с использованием СН с ЛЧМ формируется ОС с ЛЧМ, который в дальнейшем может быть с компрессирован в согласованном фильтре. Спектрограммы СН и ОС с ЛЧМ представлены на рис. 36.



а)



б)

Рис. 36. Спектрограммы: а) ЛЧМ импульса накачки; б) ОС, при $f_{\text{ОН}} = 800 \text{ МГц}$; $\Delta f_{\text{дев}} = 20 \text{ МГц}$; $t_{\text{СН}} = 2 \text{ мкс}$

В диссертации исследован вопрос, о нахождении оптимальной структуры ПР. Данная задача нелинейная, то есть результат зависит от интенсивности волны СН, облучающей ПР. Под оптимумом понимается, что при определенном уровне СН достигаются такие согласования системы параметрических генераторов с антенной, принимающей СН, и с антенной, переизлучающей ОС, при которых максимизируется величина ОС или достигается наибольшее значение коэффициента преобразования энергии волны СН в энергию волны ОС.

На рис. 37 представлены графики сопротивления системы ПГ на частоте СН при различных R_{A2} . На рис. 38 представлены зависимости P_{OC} мощности ОС и коэффициента преобразования K от сопротивления R_{A2} при $R_{A1} = 73$ Ом. Из них следует, что оптимум достигается при $R_{A1}=73$ Ом и $R_{A2}\approx 700$ Ом. Указанный вывод подтверждается рассчитанной (рис 34) и экспериментально измеренной (рис. 18) амплитудными характеристиками.

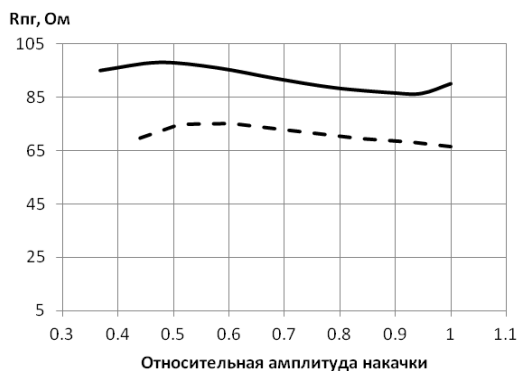


Рис.37. Сопротивление системы параметрических генераторов на частоте сигнала накачки при различных R_{A2}

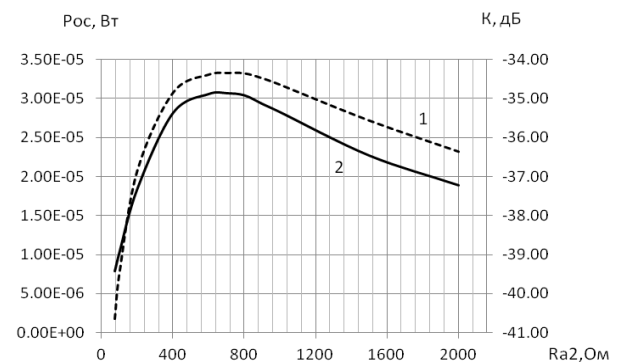


Рис.38. Зависимость коэффициента преобразования K (1) и мощности ОС P_{oc} (2) от сопротивления R_{A2} при $R_{A1}=73$ Ом

Указанная методология моделирования была применена для разработки математических моделей ПР, нагруженных на несколько, соединенных последовательно ПГ и для двухконтурных ПР. Машинные эксперименты подтвердили свойства ПР с несколькими ПГ в нагрузке, обнаруженные в натурных экспериментах.

В диссертации исследовано 2 типа двухконтурных ПР с собственными частотами контуров f_1 и f_2 : двухконтурный ПР с резонансной накачкой, у которого $f_{CH} = f_1$; $f_{OC} = 0,5f_1 = f_2$, и двухчастотный ПР, у которого $f_{CH} = f_1 + f_2$; $f_{OC1} = f_1$; $f_{OC2} = f_2$. Анализ двухконтурных ПР показал, что в системах наблюдаются процессы синхронизации, указанные выше. Кроме того, между контурами всегда существует перекачка энергии, при этом могут наблюдаться автомодуляционные явления, пример которых представлен на рис. 39.

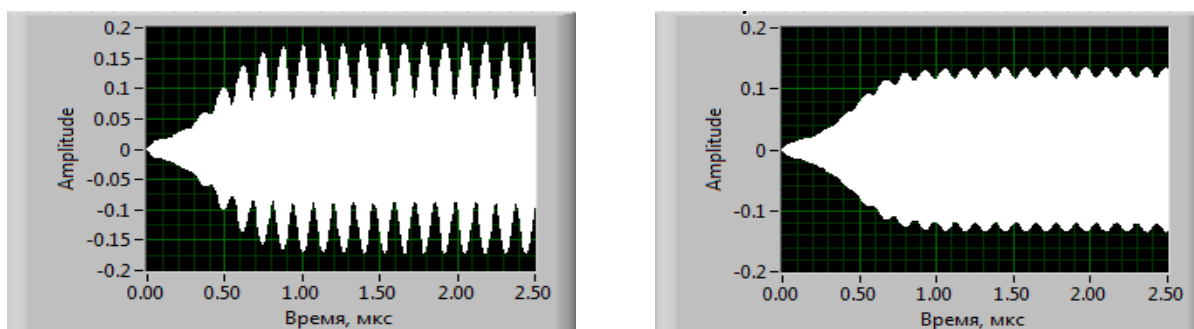


Рис. 39. Формы колебаний с автомодуляцией в контурах двухконтурного ПР

В четвёртой главе рассмотрены некоторые прикладные задачи в которых могут найти применение нелинейные и параметрические рассеиватели. С точки зрения применения ПНР в прикладных задачах они также могут быть разделены на два класса: ПНР – радиомаркеры и ПНР – датчики среды. Соответственно для решения конкретной прикладной задачи должна быть создана система, состоящая из поисковой или измерительной установки и ПНР. При создании такой системы, нужно учитывать факторы, связанные с возможностями аппаратуры установки, условиями распространения ЗС и ОС, особенностями преобразования ЗС в ОС в ПНР. При построении эффективной структуры таких систем (включая структуру ПНР) и режима их работы необходимо применять системный анализ в соответствии со структурной схемой представленной на рис. 40.

В качестве примеров обсуждены задачи использования ПНР в качестве пассивных радиомаркеров для обозначения маршрутов, маркировки индивидуальных средств спасения терпящих бедствие на воде и т.д.

Кроме того, в данной главе рассмотрены задачи, в которых ПНР используется в качестве датчиков среды.

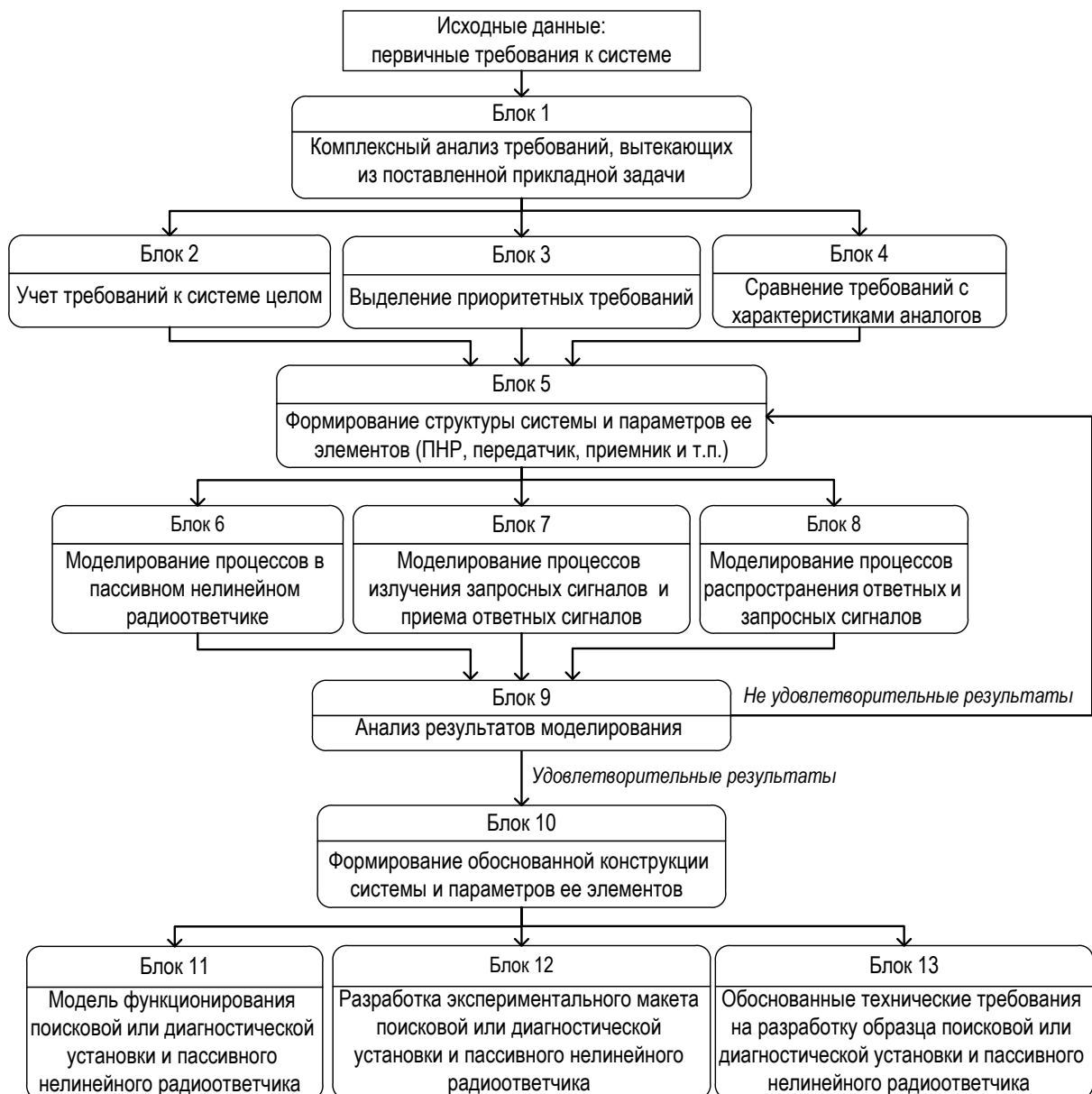


Рисунок 40. Структурная схема системного подхода к синтезу конструкции системы: поисковая или измерительная установка – пассивный нелинейный радиоответчик

В частности представлен НР, на нелинейный элемент которого может быть подано запирающее напряжение при помощи присоединения к нему фотодиода, на который, в свою очередь, подается световой поток через световолоконный световод (см. рис. 41). Уровень ОС при этом снижается практически до нуля (в эксперименте наблюдалось снижение уровня ОС на 40дБ). Матрица из таких управляемых световым потоком НР (см. рис. 42) может быть использована для исследования пространственной структуры электромагнитного поля на основе поочередного опроса.

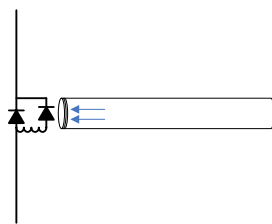


Рис. 41 Конструкция НР с управлением световым потоком

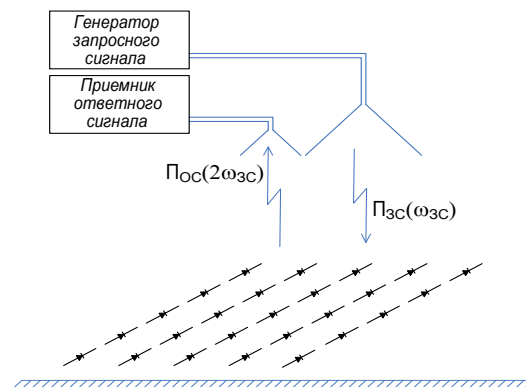


Рис. 42 Конструкция устройства, для исследования электромагнитного поля

Другим примером устройств для исследования структуры поля является использование НР с особой точкой в АХ. Методология таких измерений описана выше. Кроме задачи исследования структуры поля НР с особой точкой могут быть использованы для без фидерных измерений эффективной площади антенны и коэффициента экранирования в экранированных комнатах.

Среди ПНР можно выделить устройства, способные модулировать ОС определенной информацией, хранящейся в электронной памяти ПНР. Такие ПНР работают в режиме транспондера. Для начала работы такого ПНР необходимо обеспечить их электронную память питанием, для этого в конструкции ПНР – транспондеров должен содержаться источник ЭДС, например, емкость, заряжающаяся от ЗС. Такие устройства можно условно отнести к пассивным радиоответчикам, так как энергия ЭДС не используется для генерации ОС. В диссертации обсуждается применение ПР в качестве электронного номера (при его работе в режиме транспондера), для чего в состав ПР включен заряжаемый от внешнего поля источник питания, элемент памяти и управляемый элемент, наличие напряжения на котором приводит к срыву генерации у ПГ.

Заключение

Таким образом, в диссертационном исследовании построена общая теория пассивных нелинейных радиоответчиков в виде нелинейных или параметрических рассеивателей, основанная на применении предложенной автором их процессных моделей. Это позволило описать процессы, протекающие в пассивных нелинейных радиоответчиках, изучить, учесть и использовать свойства нелинейных или параметрических рассеивателей, предложить новые конструкции пассивных нелинейных радиоответчиков, предсказывать их реакцию на воздействие запросными сигналами на основе моделирования, рассмотреть направления их использования в прикладных задачах, предложить пути повышения эффективности их применения.

Основными научными результатами исследований являются:

1. Разработана процессная модель пассивного нелинейного радиоответчика, позволившая на основе ее анализа: описать характеристики такого радиоответчика; определить конструкции пассивных нелинейных радиоответчиков; определять с помощью преобразования измеренных или рассчитанных амплитудных характеристик радиомаркеров зависимости, характеризующие эффективность их применения.
2. Показано, что для описания пассивного нелинейного радиоответчика достаточно определение трех его характеристик: амплитудной характеристики и нормированных диаграмм направленности его приемной и передающей антенн, позволяющих корректно формулировать задания на конструирование новых пассивных нелинейных радиоответчиков как достижение объективных, измеряемых и не зависящих от внешних факторов зависимостей.
3. Введено уточненное определение амплитудной характеристики пассивного нелинейного радиоответчика как зависимости уровня интенсивности информативной составляющей в спектре рассеянного им сигнала от величины интенсивности запросного сигнала, определенной на фиксированном расстоянии от него.
4. На основе анализа процессной модели сделан вывод, который в дальнейшем подтверждён математическим моделированием и натурными экспериментами, что для пассивных нелинейных радиоответчиков – нелинейных и параметрических рассеивателей структура в виде четырехполюсника, у которого к разным входам подключены приемная и переизлучающая антенны, наиболее перспективна для решения задач радиомаркировки.
5. Определены факторы, позволяющие повысить эффективность систем радиомаркировки, использующих параметрические рассеиватели на основе учета их амплитудных и фазовых свойств, в частности, предложено формировать запросный сигнал в виде серий или групп серий из последовательностей радиоимпульсов с равной амплитудой, изменяя амплитуду сигнала накачки при переходе от серии к серии или от одной группы серий к другой группе серий.
6. Создана теория синхронизации ответного сигнала в параметрических рассеивателях, в рамках которой показано, что для организации устойчивого формирования когерентных радиоимпульсов ответного сигнала, переизлученных от параметрического рассеивателя необходимо кроме радиоимпульсов сигнала накачки облучать параметрический

рассеиватель волной синхронизирующего сигнала с частотой ответного сигнала, при этом необходимо обеспечить условия при которых фаза радиоимпульсов ответного сигнала и фаза радиоимпульсов синхронизирующего сигнала не находятся в квадратуре; показано, что задача приема когерентной последовательности ответного сигнала от параметрического рассеивателя, полученной изложенным выше образом, сводится к задаче применения стандартных оптимальных методов приема при одновременной компенсации указанных синхронизирующих радиоимпульсов, являющихся когерентной помехой на входе приемника поисковой установки, предложены методы компенсации этой помехи при обработке; показано, что возможны формирование в параметрическом рассеивателе и реализация когерентного накопления ответного сигнала в приемном устройстве при использовании в качестве сигнала накачки линейно-частотно-модулированных радиоимпульсов; показано, что при реализации когерентного накопления ответного сигнала при облучении двухконтурного параметрического рассеивателя могут возникать комбинационные нелинейные помехи, являющиеся когерентной помехой радиоприему, предложены методы компенсации или ослабления этой помехи; предложен нелинейный метод формирования синхронизирующего сигнала.

7. Показано, что на основе упорядоченных структур из параметрических рассеивателей могут быть сформированы отражательные решетки с повышенным уровнем ответного сигнала и заданной формой диаграммы обратного нелинейного рассеяния, в частности, не содержащей глубоких нулей.
8. На основе взаимодействия процессной модели и анализа эквивалентной схемы пассивного нелинейного радиоответчика разработана методология математического моделирования, с помощью которой осуществлено численное моделирование реакции пассивных нелинейных радиоответчиков разных типов (дипольного нелинейного рассеивателя, дипольного одnogенераторного параметрического рассеивателя, дипольного двухгенераторного параметрического рассеивателя, мостового параметрического рассеивателя, двухгенераторного параметрического рассеивателя - четырехполюсника, двухконтурных параметрических рассеивателей) на запросный сигнал.
9. Разработаны конструкции измерительных стендов, методики проведения экспериментов и экспериментально исследованы свойства вновь предложенных конструкций параметрических рассеивателей; обнаружено, что снижение температуры окружающей среды приводит к изменению

порога возбуждения и сужению полосы генерации субгармонического параметрического рассеивателя с сохранением центральной частоты полосы генерации; показано, что свойства субгармонических параметрических рассеивателей с «закрытым» резонатором аналогичны свойствам субгармонических параметрических рассеивателей с «открытым» резонатором; обнаружено, что амплитудная характеристика субгармонического параметрического рассеивателя может иметь две области: генерации субгармоники и генерации шумового колебания во всей рабочей полосе частот генерации ответного сигнала;

10. Предложены новые, защищенные патентами, конструкции пассивных нелинейных радиоответчиков - нелинейных и параметрических рассеивателей и систем из них.
11. Предложены новые, защищенные патентами, методы применения пассивных нелинейных ответчиков - нелинейных и параметрических рассеивателей, позволяющие исследовать пространственную структуру распределения электромагнитных полей на основе формирования матрицы из нелинейных рассеивателей, имеющих в своем составе фотодиод; измерять бесфидерным способом эффективную площадь антенны на основе включения данной антенны в состав пассивного нелинейного маркера, у которого в амплитудной характеристике содержится особая точка, например, экстремум или скачек; использовать параметрический рассеиватель в качестве электронного идентификатора или пломбы.
12. Проведен анализ перспективных направлений применения систем радиомаркировки, использующих пассивные нелинейные и параметрические рассеиватели. Предложено использовать системный анализ для создания аппаратуры, решающей задачи по применению пассивных нелинейных радиоответчиков в качестве радиомаркеров, датчиков среды или транспондеров, в частности, задач обозначения маршрутов на основе одновременного использования в качестве пассивных нелинейных радиоответчиков круговых структур из субгармонических нелинейных рассеивателей и методов формирования последовательностей радиоимпульсов ответного сигнала с детерминированным законом изменения фазы; задач маркировки индивидуальных средств спасения пострадавших при природных и техногенных катастрофах; задач измерения пространственных параметров электромагнитных полей; задач электронной идентификации.

Автор выражает признательность своим коллегам и соавторам научных работ, оказавшим содействие в получении представленных научных результатов.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ РАБОТ

Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК

- 1) Бабанов, Н.Ю. Нелинейные рассеиватели как средства маркировки / Д.Ш.Агрба, Н.Ю.Бабанов, О.Н.Бычков, Л.В.Васенкова, А.А.Горбачев, С.В.Ларцов, С.П.Тараканков, Е.П.Чигин // Радиотехника.- 1998.- №10.- С. 96-100.
- 2) Бабанов, Н.Ю. Об использовании эффекта нелинейного рассеяния радиоволн при поиске терпящих бедствие на воде / Д.Ш.Агрба, Н.Ю.Бабанов, О.Н.Бычков, Л.В.Васенкова, А.А.Горбачев, С.В.Ларцов, С.П.Тараканков, Е.П.Чигин // Радиотехника и электроника.- 2000.- Т. 45.-№6.- С. 676-680.
- 3) Бабанов, Н.Ю. Использование эффекта нелинейного рассеяния радиоволн при поиске терпящих бедствие на воде / Н.Ю.Бабанов, А.А.Горбачев, С.В.Ларцов, С.П.Тараканков, Е.П.Чигин // Нелинейный мир.- 2006.- т.4.- №7-9.- С. 501-505.
- 4) Бабанов, Н.Ю. Нелинейные рассеиватели как средства маркировки объектов / Д.Ш.Агрба, Н.Ю.Бабанов, О.Н.Бычков, Л.В.Васенкова, А.А.Горбачев, С.В.Ларцов, С.П.Тараканков, Е.П.Чигин // Нелинейный мир.- 2007.- т.5 .- №7-8.- С. 445-450.
- 5) Бабанов, Н.Ю. О возможности использования боковых волн при нелинейном зондировании / Н.Ю.Бабанов, С.В.Ларцов, С.П.Тараканков, Е.П.Чигин // Нелинейный мир.- 2008.- т.6.- №11-12.- С. 635-638.
- 6) Бабанов, Н.Ю. Экспериментальное исследование амплитудно-частотных свойств субгармонических рассеивателей / Н.Ю.Бабанов, А.С.Корсаков, С.В.Ларцов // Проектирование и технология электронных средств.- 2008.- №3.- С. 18-26.
- 7) Бабанов, Н.Ю. Необходимые характеристики для описания пространственных свойств простых нелинейных рассеивателей / Н.Ю.Бабанов, С.В.Ларцов // Радиотехника.- 2009.- №5.- С. 34-39.
- 8) Бабанов, Н.Ю. Использование решеток из параметрических нелинейных рассеивателей в качестве маркеров-ответчиков / Н.Ю.Бабанов, А.С.Корсаков, С.В.Ларцов // Проектирование и технология электронных средств.- 2009.- №2.- С. 18-26.
- 9) Бабанов Н.Ю. Возможные конструкции отражательных решеток из нелинейных и параметрических рассеивателей / Бабанов Н.Ю. // Вестник ННГУ им. Н.И.Лобачевского.- 2010.- №6.- С. 59-67.
- 10) Бабанов, Н.Ю. О когерентном накоплении при приеме сигналов от параметрических рассеивателей / Н.Ю.Бабанов / Вестник ННГУ им. Н.И.Лобачевского.- 2011.- №6.- ч.1.- С. 82-92.
- 11) Бабанов, Н.Ю. О возможности использования параметрических рассеивателей для разметки путей следования и фарватеров / Н.Ю.Бабанов,

А.С.Корсаков, С.В.Ларцов // Проектирование и технология электронных средств.- 2011.- №4.- С. 2-12.

- 12) Бабанов, Н.Ю. Использование параметрических рассеивателей для маркировки индивидуальных средств спасения, терпящих бедствие на воде / Н.Ю.Бабанов, А.В.Клюев, С.В.Ларцов, В.П.Самарин // Проектирование и технология электронных средств. – 2014.- №1.-С. 47-54.
- 13) Бабанов, Н.Ю. Об измерениях характеристик, необходимых при конструировании пассивных нелинейных радиоответчиков /Н.Ю.Бабанов, С.В.Ларцов // Датчики и системы.-2014.-№9.- С. 20-25.
- 14) Бабанов, Н.Ю. О механизмах синхронизации систем из параметрических рассеивателей / Н.Ю.Бабанов / Системы управления и информационные технологии.-2014.-№3.1(57).- С. 109-112.
- 15) Бабанов, Н.Ю. Моделирование процессов переизлучения на частоте половинной субгармоники сигнала накачки в одноконтурном параметрическом рассеивателе / Н.Ю.Бабанов, А.В.Клюев, С.В.Ларцов, В.П.Самарин // Известия высших учебных заведений. Радиофизика.- 2015.- №4.- С. 326-337.
- 16) Бабанов, Н.Ю. Экспериментальные исследования параметрических рассеивателей / Н.Ю.Бабанов, А.В.Клюев, С.В.Ларцов // Проектирование и технология электронных средств. – 2015.- №1.- С. 47-50.
- 17) Бабанов, Н.Ю. Моделирование мостового параметрического рассеивателя / Н.Ю.Бабанов, А.В.Клюев, С.В.Ларцов, В.П.Самарин // Проектирование и технология электронных средств.- 2015.- №2.- С. 15-20.

Патенты

- 18) Бабанов Н.Ю., Горбачев А.А., Ларцов С.В. Устройство для регистрации пространственного распределения электромагнитного поля / А. С. СССР.- №1392517.- 1986.- "Бюллетень изобретений".- 1988.- №6.
- 19) Бабанов Н.Ю., Горбачёв П.А., Ларцов С.В., Тараканков С.П. Бесфидерный способ измерения эффективной площади антенны, авторы // Решение ВНИИГПЭ о выдаче авторского свидетельства ф. № 1/9 от 28.06.1990 по заявке № 4600750/24-09 /122839.
- 20) Бабанов Н.Ю., Корсаков А.С., Ларцов С.В., Ларцов И.С. Групповой параметрический рассеиватель / Патент Российской Федерации на полезную модель №90222.- Бюллетень №36 от 27.12.2009.
- 21) Бабанов Н.Ю., Корсаков А.С., Ларцов С.В., Ларцов И.С. Способ обнаружения параметрических рассеивателей / Патент Российской Федерации на изобретение RU 2408033C1 по заявке №2009118069 от 12.03.2009.- Бюллетень №36 от 27.12.2010.
- 22) Бабанов Н.Ю., Корсаков А.С., Ларцов И.С., Ларцов С.В. Способ обнаружения одноконтурных параметрических рассеивателей / Патент

Российской Федерации на изобретение RU 2413242C2 по заявке 2009118092 от 12.05.2009.- Бюллетень №6 от 27.02.2011.

- 23) Бабанов Н.Ю., Ларцов С.В., Ларцов И.С. Способ и устройство маркировки объектов при помощи электронного номера – пломбы, осуществляющей информационный обмен со считывающим устройством с использованием секретного кодирования на основе асимметричных ключей / Патент Российской Федерации на изобретение RU 2408896 C1 по заявке 2009129170 от 28.07.2009.- Бюллетень №1 от 01.01.2011.
- 24) Бабанов Н.Ю., Ларцов И.С., Ларцов С.В. Нелинейный параметрический рассеиватель - пассивный датчик / Патент Российской Федерации на изобретение RU 2418304C1 по заявке 2009134375 от 14.09.2009.- Бюллетень №13 от 10.05.2011.
- 25) Бабанов Н.Ю., Колтин М.А., Ларцов С.В., Пужайло А.Ф., Спиридович Е.А., Червова А.А. Способ обнаружения маркеров - параметрических рассеивателей / Патент Российской Федерации на изобретение RU 2441253C1 по заявке 2010127129 от 01.07.2010.- Бюллетень №3 от 27.01.2012.
- 26) Бабанов Н.Ю., Корсаков А.С., Ларцов С.В., Ларцов И.С. Способ обнаружения двухконтурных параметрических рассеивателей / Патент Российской Федерации на изобретение RU 2455659C1 по заявке №2010136607 от 15.02.2011.- Бюллетень №19 от 10.07.12.
- 27) Бабанов Н.Ю., Ларцов С.В. Параметрический рассеиватель – маркер с нелинейным формированием синхросигналов / Патент Российской Федерации на изобретение RU 2507537 по заявке № 2011105670 от 13.06.2012.- Бюллетень №5 от 20.02.2014.
- 28) Бабанов Н.Ю. Двухконтурный параметрический рассеиватель / Патент Российской Федерации на изобретение №2491573 по заявке №2012111797 от 27.03.2012.- Бюллетень №24 от 27.08.13.
- 29) Бабанов Н.Ю., Ларцов С.В. Маркер-субгармонический параметрический рассеиватель / Патент Российской Федерации на изобретение №2496123 по заявке №2012111796 от 27.03.2012.- Бюллетень №29 от 20.10.13.
- 30) Бабанов Н.Ю., Ларцов С.В. Способ обнаружения объектов, содержащих нелинейные элементы / Патент Российской Федерации на изобретение №2498341 по заявке №2012121377 от 23.05.2012.- Бюллетень №31 от 10.11.13.
- 31) Бабанов Н.Ю. Способ обнаружения объектов, маркированных параметрическими рассеивателями / Патент Российской Федерации на изобретение RU 2487366 по заявке № 2011128511 от 03.07.2012.- Бюллетень №19 от 10.07.2013.
- 32) Бабанов Н.Ю. Способ обнаружения одноконтурных параметрических рассеивателей с нелинейным формированием синхронизирующего сигнала

/ Патент Российской Федерации на изобретение №2496122 по заявке №2011105671 от 15.02.2011.- Бюллетень №29 от 20.10.13.

- 33) Бабанов Н.Ю., Куликов А.А., Ларцов С.В. Субгармонический параметрический рассеиватель / Патент Российской Федерации на изобретение №2495450 по заявке №2012111791 от 27.03.2012.- Бюллетень №28 от 10.10.13.
- 34) Бабанов Н.Ю., Ларцов С.В. Обнаружитель объектов, содержащих нелинейные элементы / Патент Российской Федерации на изобретение №2513712 по заявке №2012121521 от 24.05.2012.- Бюллетень №11 от 20.04.2014.
- 35) Бабанов Н.Ю., Ключев А.В., Ларцов С.В., Самарин В.П. Способ обнаружения широкополосных параметрических рассеивателей/ Патент Российской Федерации на изобретение №2532258 по заявке 2013135592 от 29.07.2013.- опубликовано 10.11.2014.- Бюллетень № 31 от 10.11.14.

Монографии

- 36) Бабанов, Н.Ю. Повышение эффективности систем радиомаркировки, использующих пассивные субгармонические нелинейные рассеиватели / Н.Ю.Бабанов, А.С.Корсаков, С.В.Ларцов.- Н. Новгород: ВГИПУ. 2011.- 176с.
- 37) Бабанов, Н.Ю. Использование пассивных субгармонических нелинейных рассеивателей в целях радиомаркировки / Н.Ю.Бабанов, А.С.Корсаков, С.В.Ларцов.- Н.Новгород: Нижегородский государственный технический университет им.Р.Е.Алексеева.- 2013.- 146с.

Статьи в сборниках и региональных научных журналах

- 38) Бабанов, Н.Ю. Пути ослабления помех при исследовании пространственного распределения электромагнитных полей / Н.Ю.Бабанов, С.В.Ларцов // Радиоизмерительная аппаратура для решения задач ЭМС РЭС. Межвузовский тематический сборник научных трудов ГГУ.- Горький.- 1990.- С. 46-50.
- 39) Бабанов, Н.Ю. Использование эффекта нелинейного рассеяния радиоволн при поиске терпящих бедствие на воде / Н.Ю.Бабанов, А.А.Горбачев, С.В.Ларцов, С.П.Тараканов, Е.П.Чигин // Нелинейная радиолокация. Сборник статей.- 2006.- ч.2.- М.:Радиотехника.- С. 159-163.
- 40) Бабанов, Н.Ю. Нелинейные рассеиватели как средства маркировки объектов / Д.Ш.Агрба, Н.Ю.Бабанов, О.Н.Бычков, Л.В.Васенкова, А.А.Горбачев, С.В.Ларцов, С.П.Тараканов, Е.П.Чигин // Нелинейная радиолокация. Сборник статей.-2007.- ч.3.-С. 35-40.
- 41) Бабанов, Н.Ю. Об электронной идентификации подвижного состава и грузов на железной дороге / Н.Ю.Бабанов, И.С.Ларцов, С.В.Ларцов //

Вестник Нижегородского государственного инженерно-экономического института.- 2011.- т.2.- №2(3).- С. 5-26.

- 42) Бабанов, Н.Ю. О приеме полезного сигнала от динамического нелинейного рассеивателя на фоне помех от других нелинейных рассеивателей / Н.Ю.Бабанов // Научный поиск.- 2012.- №4.- С. 72-77.
- 43) Бабанов, Н.Ю.. О возможности идентификации цифровых устройств с проверкой подлинности / Н.Ю.Бабанов, А.О.Иванов, И.С.Ларцов, С.В.Ларцов // Вагоны и вагонное хозяйство.- 2013.- №4(36).- С. 42-45.
- 44) Бабанов, Н.Ю. Применение ЛЧМ радиоимпульсов для поиска параметрических рассеивателей / Н.Ю.Бабанов, В.П.Самарин, С.В.Ларцов // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.- 2014.- № 4(106).- С. 18-20.
- 45) Бабанов, Н.Ю. Моделирование двухконтурных параметрических рассеивателей / Н.Ю.Бабанов, А.А.Куликов, С.В.Ларцов, В.П.Самарин // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.- 2015.- № 1(108).- С. 61-70.
- 46) Бабанов, Н.Ю. Моделирование амплитудной характеристики дипольного нелинейного рассеивателя / Н.Ю.Бабанов, А.А.Куликов, С.В.Ларцов // Научный поиск.- 2015.- №2 (16).- С. 56-59.

Труды, материалы и тезисы на международных и всероссийских конференциях

- 47) Бабанов, Н.Ю. Приёмник для измерения пространственной структуры сигнала / Н.Ю.Бабанов, П.А.Горбачёв, С.В.Ларцов // Тезисы докладов всесоюзной научно-технической конференции "Развитие и внедрение новой техники радиоприёмных устройств и обработки сигналов".- М.- 1989.- С. 42.
- 48) Бабанов, Н.Ю. Автоматизированный стенд для бесфидерного измерения параметров антенн / Н.Ю.Бабанов, П.А.Горбачёв, С.В.Ларцов // Тезисы докладов научно-технической конференции "Молодые учёные - производству радиоэлектронной промышленности".- Горький.- 1989.- С. 15.
- 49) Бабанов, Н.Ю. Автоматизированный диалоговый комплекс для анализа рассеивающих свойств объектов / Д.Ш.Агрба, Н.Ю.Бабанов, С.В.Ларцов // Тезисы докладов научно-технической конференции "Молодые учёные - производству радиоэлектронной промышленности".- Горький.- 1989, С. 16-17.
- 50) Бабанов, Н.Ю. Автоматизированный диалоговый комплекс для приёма и обработки радиосигналов / Д.Ш.Агрба, Н.Ю.Бабанов, С.В.Ларцов // Тезисы докладов 6-й Всероссийской научно-технической конференции "Радиоприём и обработка сигналов" .-Н.Новгород.- 1993.- С. 55.

- 51) Babanov, N.Yu. Investigation of a system of nonlinear interference sources / N.Yu.Babanov, A.A.Gorbachev, T.M.Zaboronkova and S.V.Lartsov // Proceeding of the 12-th International Symposium on EMS Wroclaw.- 1994.- P. 214-219.
- 52) Бабанов, Н.Ю. Рассеяние электромагнитных волн на системе нелинейных вибраторов / Н.Ю.Бабанов, А.А.Горбачев, Т.М.Забронкова, Е.Ю.Кузнецова, С.В.Ларцов // Тезисы докладов международной конференции "100-летие начала использования электромагнитных волн для передачи сообщений и зарождения радиотехники".- М., 1995.- С. 68-69.
- 53) Бабанов, Н.Ю. Использование эффектов нелинейного рассеяния электромагнитных волн при проведении поисковых и спасательных работ / Н.Ю.Бабанов, А.А.Горбачев, С.В.Ларцов, С.П.Тараканков // Тезисы докладов международной конференции "Физпром-96" (Физика и промышленность).- Голицино, Московской обл.- 22-26 сентября 1996г.- С.37.
- 54) Бабанов, Н.Ю. The use of the nonlinear scattering for search of victims of calamities / Н.Ю.Бабанов, А.А.Горбачев, С.В.Ларцов, С.П.Тараканков // Тезисы докладов международной конференции "Marelec-97" (Marine Electromagnetics).- 23-26.06.1997.- Лондон.- С. 182.
- 55) Бабанов, Н.Ю. Nonlinear reflecting arrays / Н.Ю.Бабанов, С.В.Ларцов // Труды 28-й Московской международной конференции по теории и технике антенн.- Москва.- 22-24.09.1998.- С. 108-109.
- 56) Бабанов, Н.Ю. Применение когерентного накопления в нелинейной радиолокации / Н.Ю.Бабанов, С.В.Ларцов // Труды V Международной научно-методической конференции преподавателей вузов, ученых и специалистов «Высокие технологии в педагогическом процессе».- 25-26 марта 2004г.- Нижний Новгород.- ВГИПА.- С. 271.
- 57) Бабанов, Н.Ю. Когерентное накопление радиоимпульсов, рассеянных параметрическим рассеивателем / Н.Ю.Бабанов, А.С.Корсаков, С.В.Ларцов // Материалы восьмой международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ'2009».- Владимир-Суздаль.- 21-22 мая 2009 г.- том 1.- С. 147-149.
- 58) Бабанов, Н.Ю. Подтверждение достоверности при идентификации на основе асимметричного кодирования / Н.Ю.Бабанов, С.В.Ларцов // Материалы XVII Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии ИСТ–2011».- Н.Новгород.- Нижегородский государственный технический университет.- 22 апреля 2011 г.- С. 66-67.
- 59) Бабанов, Н.Ю. Об оптимальном приеме сигналов от параметрических рассеивателей / Н.Ю.Бабанов, А.С.Корсаков, С.В.Ларцов // Материалы XVII Международной научно-технической конференции

«Информационные системы и технологии ИСТ-2011».- Н.Новгород.- Нижегородский государственный технический университет.- 22 апреля 2011г.- С. 68-69.

- 60) Бабанов, Н.Ю. Оптимальный приемник сигналов от параметрических рассеивателей / Н.Ю.Бабанов, А.С.Корсаков, С.В.Ларцов // Материалы IX Международной научной конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ-2011».- 29 июня – 1 июля 2011г.- Владимир-Суздаль. т.2.-С. 91-92.
- 61) Бабанов, Н.Ю. О возможности применения ЛЧМ сигналов при поиске субгармонических нелинейных рассеивателей / Н.Ю.Бабанов, С.В.Ларцов // Материалы IX Международной научной конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ-2011».- 29 июня – 1 июля 2011г.- Владимир-Суздаль.- т.2.- С. 93-94.
- 62) Бабанов, Н.Ю. О нелинейном формировании синхронизирующих сигналов при поиске параметрических рассеивателей / Н.Ю.Бабанов, С.В.Ларцов // Материалы IX Международной научной конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ-2011».- 29 июня – 1 июля 2011г.- Владимир-Суздаль.- т.2.- С. 95.
- 63) Бабанов, Н.Ю. Формирование стабильной диаграммы рассеяния от решетки из параметрических нелинейных рассеивателей / Н.Ю.Бабанов, А.С.Корсаков, С.В.Ларцов // Материалы XIX Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии ИСТ-2013».- Н.Новгород.- Нижегородский государственный технический университет.- 19.04.2013.- С. 57.
- 64) Бабанов, Н.Ю. О возможности применения пассивных параметрических рассеивателей для дистанционной радиомаркировки объектов / Н.Ю.Бабанов, С.В.Ларцов // Сборник докладов XIX Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь (RLNC*2013)».- 16-18 апреля 2013г.- Воронеж.- т.3.- С. 1536-1545.
- 65) Бабанов, Н.Ю. О возможности обозначения плавающих объектов параметрическими рассеивателями / Н.Ю.Бабанов, А.С.Корсаков, С.В.Ларцов // Тезисы докладов Балтийского морского форума.- 28-31 мая 2013.- Светлогорск.- Т.2.- изд-во БГАРФ.- Калининград.- С. 50-53.
- 66) Бабанов, Н.Ю. Формирование суммарной диаграммы направленности, не содержащей «нулей» от нелинейной отражательной решетки из параметрических рассеивателей / Н.Ю.Бабанов, А.В.Клюев, А.С.Корсаков, С.В.Ларцов // Материалы X Международной научной конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ-2013».- 26-28 июня 2013г.- Владимир.- т.2.- С. 152-154.
- 67) Бабанов, Н.Ю. О возможности создания электронных идентификаторов с повышенным уровнем защищенности от клонирования / Н.Ю.Бабанов,

- А.Ю.Гузенко, С.В.Ларцов, И.С.Ларцов // Сборник научных трудов международной научно-практической конференции «Социально-экономические проблемы развития регионов: экономика, образование, управление и право».- Нижний Новгород.- НФ МЭСИ.- 2013.- ч.2.- С. 297-298.
- 68) Бабанов, Н.Ю. О возможности использования ЛЧМ радиоимпульсов при поиске параметрических рассеивателей / Н.Ю.Бабанов, С.В.Ларцов // Материалы XX Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии ИСТ-2014».- 18 апреля 2014г.- Нижний Новгород.- НГТУ.- С. 48.
- 69) Бабанов, Н.Ю. О возможности создания уникальных электронных устройств, защищенных от клонирования и обладающих возможностью открытой идентификации и аутентификации / Н.Ю.Бабанов, С.В.Ларцов // Тезисы докладов IV Всероссийской научно-технической конференции «Информационно-измерительные и управляющие системы военной техники».- 13 - 14 ноября 2014г.- Владимир.- С. 11.
- 70) Бабанов, Н.Ю. О поиске узкополосных нелинейных объектов средствами нелинейной радиолокации / Н.Ю.Бабанов, С.В.Ларцов // Тезисы докладов IV Всероссийской научно-технической конференции «Информационно-измерительные и управляющие системы военной техники».- 13 - 14 ноября 2014г.- Владимир.- С. 12.
- 71) Бабанов, Н.Ю. Формирование ответных сигналов в параметрическом рассеивателе в виде ЛЧМ радиоимпульсов / Н.Ю.Бабанов, А.В.Клюев // Материалы XXI Международной научно-технической конференции. «Информационные системы и технологии ИСТ-2015».- Нижний Новгород.- НГТУ.- С. 57.
- 72) Бабанов, Н.Ю. Экспериментальные исследования параметрических рассеивателей с несколькими параметрическими контурами в нагрузке / Н.Ю.Бабанов, А.В.Клюев, С.В.Ларцов // Труды XIX Научной конференции по радиофизике, посвященной 70-летию радиофизического факультета (Нижний Новгород 11-15 мая 2015г.).- Н.Новгород.- ННГУ.- 2015.- С. 131-75.
- 73) Бабанов, Н.Ю. Моделирование мостовой схемы параметрического рассеивателя / Н.Ю.Бабанов, А.В.Клюев, С.В.Ларцов, В.П.Самарин // Труды XIX Научной конференции по радиофизике.- Н.Новгород.- ННГУ.- 2015.- С. 76-77.

Подписано в печать 12.10.15. Формат $60 \times 84^1/16$. Бумага офсетная.
Печать трафаретная. Уч.-изд. л. 2,0. Тираж 100 экз. Заказ 692.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева.
Типография НГТУ. 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

