

На правах рукописи

Фам Дык Хи

**ОБРАБОТКА РАДИОСИГНАЛОВ ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ ОБЪЕКТОВ С
КВАДРАТИЧНОЙ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ ДЛЯ
ИНЖЕНЕРНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ**

Специальность 2.2.13 –

«Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ).

Научный руководитель: **Николаев Алексей Владимирович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническая электродинамика и антенны» МТУСИ.

Официальные оппоненты: **Кузьмин Лев Викторович** - доктор физ.-мат. наук, профессор РАН, ведущий научный сотрудник, Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН).

Шевгунов Тимофей Яковлевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая радиотехника» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Московский авиационный институт (национального исследовательского университета) (МАИ).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (ФГБОУ ВО СПбГУТ).

Защита диссертации состоится 25 июня 2026 г. в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций 55.2.002.01 при Ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ) по адресу: 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а, ауд. А-211.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МТУСИ: (<https://dis.mtuci.ru/upload/srd/Dis-FamDykKhi/dis-FamDykKhi..pdf>).

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 55.2.002.01, д.т.н., профессор

М.В. Терешонок

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Обеспечение устойчивого развития Социалистической Республики Вьетнам (СРВ) тесно связано с решением проблемы обнаружения предметов и веществ, представляющих угрозу для жизни и здоровья мирных жителей. После вооруженного конфликта 1960-1975 годов и других событий, связанных с широким внедрением электроники, на территории страны накапливается значительное количество объектов, которые с точки зрения технической электродинамики являются электрическими неоднородностями с квадратичной вольтамперной характеристикой (ВАХ). Их присутствие ограничивает экономическое развитие, препятствует эффективному использованию природных ресурсов, развитию международного туризма и инфраструктуры государства. Особую проблему создают предметы с наличием полупроводниковых компонентов, число которых возрастает вследствие интенсивного развития производства микроэлектроники.

Современные средства поиска электрических неоднородностей и веществ, применяемые окружными техническими службами мониторинга местности Вьетнама, включают радиоволновые, магнитометрические, индукционные и газоаналитические методы обнаружения объектов. Однако их эффективность ограничивается сложными условиями распространения радиоволн, наличием укрывающей среды (растительность, грунт), низкой испаряемостью веществ, а также присутствием малоразмерных полупроводниковых компонентов в корпусе предмета.

Наибольшей дальностью обнаружения электрической неоднородности с линейной и нелинейной ВАХ обладают радиотехнические системы (РТС) зондирования с использованием сверхширокополосных и узкополосных сигналов соответственно. Известно, что в вышеуказанных условиях распространения радиоволн с помощью нелинейных РТС можно эффективно обнаружить электрическую неоднородность с квадратичной ВАХ путем детектирования 2-й гармоники, рассеянной полупроводниковой компонентой.

Методы расчета нелинейных РТС, предложенные Щербиковым Г.Н. и Gallagher К.А., демонстрируют хорошее согласие с экспериментальными результатами, однако не учитывают в полной мере влияние геометрических размеров и условий экранирования на радиотехнические характеристики системы. Данное ограничение вызывает сомнения в достоверности оценок дальности обнаружения и выбора методов локализации электрических неоднородностей, таких как полупроводниковые компоненты, являющихся нелинейным объектом (НО) для РТС. Диссертационная работа нацелена на преодоление выявленных ограничений и включает следующие направления исследования:

- совершенствование методов расчета дальности и эффективности обнаружения НО на 2-й гармонике, переизлучаемой предметом с электронным изделием, оснащенным полупроводниковыми компонентами с квадратичной ВАХ;
- совершенствование метода угловой локализации обнаруживаемых НО с электронным изделием в зоне действия нелинейной РТС.

Представленные в данной работе исследования нацелены на повышение надежности и точности обнаружения 2-й гармоники, а также на эффективную угловую локализацию предметов с электронным изделием с помощью усовершенствованной модели нелинейной РТС. Аппаратная часть предлагаемой системы дополняется бортовой радиопередающей станцией с широкополосной цилиндрической или конической спиральной антенной (СА), выполняющей роль «широкоугольной радиофары», и функцией автоматической подстройки рабочей частоты под скорость перемещения мобильного робота. Дополнительно вводится бортовая радиоприемная станция с двумя рупорными или вибраторными антеннами с шириной главного лепестка амплитудной диаграммы направленности (АДН) антенны не более 15-20 градусов, коэффициентом усиления порядка 8-12 дБ и низким уровнем боковых лепестков. Расположение по бортам таких антенн обеспечивает высокую пространственную избирательность и чувствительность к углу прихода радиоволны, что является критически важным для точной угловой локализации предмета с электронным изделием. Оптические оси антенн располагаются с небольшим угловым отклонением относительно продольной оси широкополосной СА, что

позволяет реализовать принцип суммарно-разностной обработки сигналов и обеспечить надежное определение азимутального направления на источник излучения 2-й гармоники.

Реализация предложенных решений посредством специальной мобильной платформы на базе транспортного средства («безопасная машина») значительно расширит возможности по очистке территорий, выполняемой окружными техническими службами мониторинга местности Вьетнама, обеспечивая безопасную эксплуатацию машины и защиту оператора машины.

Актуальность исследования определяется как научно-технической значимостью задачи очистки местности от небезопасных предметов и веществ, так и высоким социальным и экономическим значением результатов диссертационной работы для устойчивого развития экономики и туризма в СРВ.

Степень разработанности темы исследования. Основоположниками создания теории построения нелинейных радиосистем для целей связи и обнаружения, учитывающих специфику преобразования наведенных токов и напряжений на р-п-переходах и оксидных пленках в контактах, расположенных на поверхности и внутри корпуса предмета, в зоне действия радиостанции являются: Штейншлейгер В.Б., Кузнецов А.С., Разиньков С.Н., Щербаков Г.Н., Горбачев А.А. и др.

Значительный вклад в формирование основ проектирования и разработку математических моделей, описывающих процессы распространения радиоволн и преобразование электрических сигналов в нелинейных РТС, а также учитывающих влияние свойств среды распространения и конструктивных особенностей НО на показатели дальности и точности обнаружения, внесли такие ученые, как Ларцов С.В., Бабанов Н.Ю., Семенихина Д.В., Николаев А.В., Паньчев А.И. и др. В качестве зарубежных исследований стоит отметить работы ученых, таких как R.O. Harger, G.J. Mazzaro, K.A. Gallagher, T.J. Pierson, Duong Duc Thien и др.

Однако вопросы, связанные с совершенствованием аналитических зависимостей и расчетных формул для оценки максимальной дальности обнаружения НО с учетом сложных электродинамических условий среды распространения и параметров антенных систем, до настоящего времени остаются недостаточно исследованными.

Исследования, проведенные лично соискателем и представленные в данной диссертационной работе, направлены на решение актуальной научно-технической задачи повышения эффективности функционирования нелинейной РТС при обнаружении и пространственной локализации НО на частоте 2-й гармоники.

В ходе лабораторных экспериментов было установлено, что применение спиральных антенн, обладающих линейными электрическими характеристиками в широком диапазоне частот, позволяет обеспечить эффективную работу нелинейной РТС на удвоенной частоте.

В диссертационной работе разработана имитационная модель радиолинии второго рода для имитации работы нелинейной радиотехнической системы. Данная имитационная модель позволяет исследовать различные зависимости, например, влияние толщины экранирующего слоя и его экранирующих свойств на амплитуду принятого сигнала на частотах первой и второй гармоник, влияние эффективной поверхности рассеяния нелинейного элемента и количества нелинейных элементов на амплитуду сигнала на частоте второй гармоники, влияние несовпадения по поляризации зондирующего сигнала с отраженным от нелинейного объекта сигналом. Кроме того, модель также позволила разработать алгоритм обработки принятого сигнала на частоте второй гармоники для оценки количественных показателей нелинейных элементов, содержащихся в зоне облучения.

Разработанная автором аналитическая модель включает уточненные коэффициенты K_1 и K_2 , позволяющие учитывать реальные условия распространения радиоволн. Коэффициент K_1 характеризует влияние экранирующих свойств корпуса электронного изделия и слоя укрывающей среды, а коэффициент K_2 учитывает несовпадение поляризаций зондирующего и отраженного сигналов, включая направление вращения вектора электрического поля. Введение данных коэффициентов позволило повысить точность прогнозирования дальности действия нелинейной РТС и адекватность описания процессов формирования сигнала второй гармоники.

Также диссертационная работа включает детальное сравнение амплитудных и фазовых методов определения угловых координат электрических неоднородностей на второй гармонике, в

том числе методов максимума, минимума и суммарно-разностного метода, что позволяет обоснованно выбирать технические решения для применения в мобильных нелинейных РТС инженерной робототехники.

Таким образом, предложенные подходы, имитационная модель и аналитические зависимости, учитывающие введенные коэффициенты K_1 и K_2 , обладают научной обоснованностью и практической значимостью, существенно дополняя и развивая существующие теоретические и экспериментальные основы нелинейных РТС и обеспечивая необходимую степень проработки проблемы для их эффективного практического применения.

Цель работы. Повышение эффективности функционирования нелинейной радиотехнической системы при обнаружении нелинейных объектов на частоте 2-й гармоники.

Научная задача заключается в разработке усовершенствованных методов обработки радиосигналов при обнаружении объектов с квадратичной вольтамперной характеристикой для инженерной робототехники.

Для достижения поставленной цели и решения научной задачи в работе требуется решить комплекс взаимосвязанных частных научных задач:

- разработать математическую модель нелинейной РТС, учитывающей процессы нелинейного рассеяния радиоволн объектами с электронными устройствами на 2-й гармонике, а также усовершенствовать методы расчета радиолиний 2-го рода с НО в свободном пространстве;

- разработать алгоритм обработки принимаемых сигналов при обнаружении нелинейных объектов для повышения эффективности функционирования нелинейной РТС;

- исследовать влияние мощности СВЧ-излучения, уровня шума приемного устройства, расстояния до нелинейного объекта, формы основания спиральной антенны и экранирующих эффектов на вероятность обнаружения 2-й гармоники, рассеянной НО;

- обосновать выбор методов угловой локализации нелинейных объектов для эффективного разделения близко расположенных электрических неоднородностей на основе анализа сигналов 2-й гармоники в двух разнесенных приемных радиоканалах, включая сравнительный анализ амплитудных и фазовых методов угловой локализации при выборе наилучшего алгоритма разделения сигналов 2-й гармоники;

- разработать технические решения и конструкцию мобильной нелинейной радиотехнической системы, обеспечивающей заданные параметры излучения, рабочий диапазон частот и алгоритмы обработки сигналов, на базе специального транспортного средства («безопасная машина»).

Объектом исследования является предмет в виде слабоконтрастной модели электрической неоднородности с квадратичной ВАХ его электронного изделия.

Предметом исследования является процесс обнаружения гармоник, рассеянных точечными элементами (полупроводниковыми компонентами электронного изделия), поля радиостанции, ограниченный положением и формой главного лепестка АДН передающей СА.

Методология и методы исследования. В работе применен метод математического моделирования с использованием вычислительной техники. Основные теоретические результаты были подтверждены компьютерным моделированием характеристик обнаружения гармоник, рассеянных точечным элементом с квадратичной ВАХ, а также экспериментальным подтверждением постоянства электрической длины СА при изменении длины радиоволны в полосе рабочих частот исследуемой модели нелинейной РТС и ее зоны обнаружения.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что в ней впервые:

1. Предложен усовершенствованный подход к построению и верификации модели нелинейной РТС в условиях свободного пространства. В модели учитываются физические и радиотехнические процессы нелинейного рассеяния радиоволн СВЧ-диапазона объектами с нелинейными электромагнитными свойствами. За счет анализа принятых сигналов на частотах 1-й и 2-й гармоник разработан алгоритм обработки сигналов при обнаружении нелинейных объектов, позволяющий с заданной точностью обнаруживать нелинейные объекты. Полученные теоретические соотношения обеспечивают необходимую точность расчетов характеристик дальности обнаружения НО даже при наличии экранирующих факторов и изменении поляризации сигналов. Предлагаемый подход отличается от известных моделей более высокой физической

корректностью и фундаментальной обоснованностью, что подтверждено достоверными результатами численных расчетов.

2. Установлена ранее неизвестная зависимость вероятности правильного обнаружения СВЧ-сигнала, рассеянного объектами с нелинейными электромагнитными свойствами на удвоенной частоте, от таких факторов, как угол наклона зондирования, несовпадение поляризации и наличие экранирующих препятствий. Новое соотношение позволяет правильно подобрать геометрические параметры СА с цилиндрической и конической формой и интенсивность радиоизлучения, обеспечивая однородную плотность потока мощности радиоизлучения в зоне поиска электрической неоднородности. Результаты подтверждаются численными расчетами.

3. Установлено, что для эффективного разделения СВЧ-сигналов, рассеянных объектами с нелинейными электромагнитными свойствами на удвоенной частоте и расположенных в пределах одного телесного угла АДН антенны, необходимо обеспечить небольшое угловое отклонение осей двух приемных антенн от продольной оси транспортного средства при применении суммарно-разностного метода локализации неоднородности. Соблюдение данного технического условия обеспечивает точность пространственной локализации НО, сопоставимую с фазовым методом.

4. Определены технические характеристики и конструктивно-компоновочные решения мобильной нелинейной РТС, установленной на специализированном транспортном средстве («безопасная машина»). Проведенные исследования, включавшие математическое моделирование, позволили научно обосновать ряд ключевых параметров системы, таких как импульсная мощность передатчика (100-200 Вт), рабочие частоты (2,4 / 4,8 ГГц) и схема размещения антенн на борту транспортного средства.

Достоверность результатов и выводов подтверждается совпадением, как на количественном, так и на качественном уровне, с результатами, опубликованными в научных публикациях и полученными другими авторами при изучении эффекта нелинейного рассеяния радиоволн и вопросов моделирования процесса обнаружения сигналов в традиционных РТС.

Теоретическая значимость работы заключается в дальнейшем развитии теории нелинейного рассеяния радиоволн и теории обработки сигналов, отраженных от нелинейных объектов, а также в разработке оригинальных подходов к моделированию электромагнитных сигналов в нелинейных РТС, а именно:

- разработка математических моделей, описывающих нелинейное рассеяние радиоволн объектами, в конструкциях электронной техники которых имеются полупроводниковые компоненты с квадратичной ВАХ;

- выявление и количественное описание ранее неизвестных зависимостей вероятности правильного обнаружения объектов от физических и геометрических параметров нелинейной РТС.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- разработаны общие подходы к проектированию мобильных платформ («безопасных машин»), оснащенных специальной РТС, предназначенной для дистанционного обнаружения и точной локализации объектов с нелинейными электромагнитными свойствами (например, предметов с электронными изделиями);

- получены новые инженерные формулы, позволяющие проводить оценку эффективности специальной РТС при обнаружении и локализации электрических неоднородностей с конкретным типом нелинейности (квадратичная ВАХ). Данные расчеты важны при подборе конфигурации основания СА, настройке режимов приема и передачи СВЧ-сигналов, а также объективной оценки эксплуатационных характеристик проектируемой нелинейной РТС;

- разработанные новые инженерные формулы внедрены в образовательный процесс и используются при чтении лекций и проведении практических занятий согласно рабочей программе дисциплины «Распространения радиоволн и антенно-фидерные устройства» для бакалавров направления подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Апробация результатов. Результаты, изложенные в диссертации, были представлены и обсуждены на следующих конференциях:

1. XVI Всероссийская научно-практическая конференция «ИНФОКОМ 2023», г. Ростов-на-Дону, Россия, 2023 г;

2. Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения (МИКМУС), г. Москва, Россия, в 2023, 2024 годах;

3. XV Всероссийская научно-техническая конференция «Радиолокационные системы малой и сверхмалой дальности» (РМД-2024), г. Москва, Россия, 2024 г;

4. Научно-техническая конференция «Радиолокация в геофизике и радиофизике» (РГР-2025), г. Москва, Россия, 2024 г.

Публикации. По теме диссертации было опубликовано 11 работ. Из них 5 опубликованы в журналах из списка ВАК, 1 работа проиндексирована в базах данных Web of Science и Scopus. Получены 2 патента на изобретение и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад. Все основные результаты, составляющие содержание диссертации, получены соискателем самостоятельно.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и четырех приложений. Основная часть изложена на 125 страницах машинописного текста, содержит 49 рисунков и 5 таблиц; список литературы состоит из 88 наименований.

Соответствие паспорту специальности. Проведенное автором исследование соответствует п. 1. «Исследование процессов и явлений в радиотехнике, позволяющих повысить эффективность радиотехнических устройств и систем», п. 2 «Исследование методов и алгоритмов обработки радиосигналов, учитывающих эффекты их рассеяния и отражения при прохождении через различные среды распространения», п. 3 «Разработка и исследование радиотехнических устройств и систем, обеспечивающих улучшение характеристик точности, быстродействия и помехоустойчивости» паспорта специальности 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Усовершенствованная модель слабоконтрастной электрической неоднородности с квадратичной ВАХ и методы расчета дальности ее обнаружения радиоприемным устройством на частоте 2-й гармоники СВЧ-сигнала в свободном пространстве позволили разработать алгоритм обработки принятых нелинейной РТС сигналов с целью обнаружения объектов с квадратичной ВАХ.

2. Установленные закономерности влияния основных технических параметров нелинейной РТС на процесс обнаружения слабоконтрастной электрической неоднородности с квадратичной ВАХ позволяют количественно определять зависимость вероятности правильного обнаружения 2-й гармоники и вероятности ложной тревоги от таких факторов, как несовпадение по поляризации зондирующего и отраженного сигналов и наличие экранирующих препятствий.

3. Обоснованы условия эффективного разделения близко расположенных электрических неоднородностей с квадратичной ВАХ, находящихся в пределах одного телесного угла главного лепестка АДН бортовой антенны радиопередающего устройства, путем анализа сигналов 2-й гармоники в двух приемных радиоканалах, образованных двумя разнесенными по бортам антеннами, оптические оси которых имеют небольшое угловое отклонение от продольной оси платформы мобильного робота с использованием суммарно-разностного метода угловой локализации НО.

4. Обоснован технический облик мобильной нелинейной РТС для эффективного обнаружения и локализации предметов с электронными изделиями в различных укрывающих средах, имеющей импульсную мощность передатчика (100–200 Вт), рабочие частоты (2,4/4,8 ГГц) и разнесенное размещение антенн. Данный технический облик обеспечивает высокую эффективность нелинейной РТС.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и основные направления исследований.

В первом разделе диссертации проведен анализ актуальности проблемы обнаружения предметов и веществ, накапливающихся в эпоху электронной и цифровой индустриализации СВР, а также очистки местности от них. Отмечено, что значительная часть предметов и веществ может представлять серьезную угрозу жизни и здоровья населения, ограничивает использование природных ресурсов, развитие международного туризма и инфраструктуры государства.

Проведен обзор современных методов и средств поиска предметов и веществ, применяемых окружными техническими службами мониторинга местности Вьетнама, таких как магнитометрические, индукционные, механические и газоаналитические.

Установлено, что существующие радиотехнологии ограничены по эффективности при обнаружении малоразмерных предметов с полупроводниковыми компонентами. На основе анализа современных технических средств мониторинга выявлено, что перспективным направлением для окружных технических служб мониторинга местности Вьетнама является применение нелинейных РТС, основанных на регистрации излучаемой НО 2-ой гармоники при воздействии электромагнитного поля (ЭМП) радиопередающей станции на полупроводниковые компоненты предметов поиска.

В разделе 1 обоснована актуальность и необходимость исследований по совершенствованию методов обнаружения и угловой локализации НО с помощью нелинейной РТС, способствующих повышению общественной безопасности в СВР и экономическому развитию.

Во втором разделе диссертационной работы усовершенствованы методы расчета нелинейных рассеивающих свойств объекта в свободном пространстве. В данном разделе представлен пошаговый вывод уравнений, описывающих нелинейную модель РТС, и рассмотрены уравнения радиолинии 2-го рода с НО в свободном пространстве, учитывающие физические особенности преобразования ЭМП электрической неоднородностью с квадратичной ВАХ при радиозондировании местности.

Для описания рассеивающих свойств полупроводникового компонента электронного изделия используется полиномиальная модель, имеющая вид:

$$y = \sum_{n=0}^{\infty} y_n = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n, \quad (1)$$

где a_n – коэффициент полиномиальной аппроксимации, используемые для описания линейных и нелинейных свойств рассеивателя зондирующего сигнала.

Модель нелинейного рассеивателя ЭМП радиопередающей станции представлена на основе степенных рядов Тейлора и показана на рисунке 1.

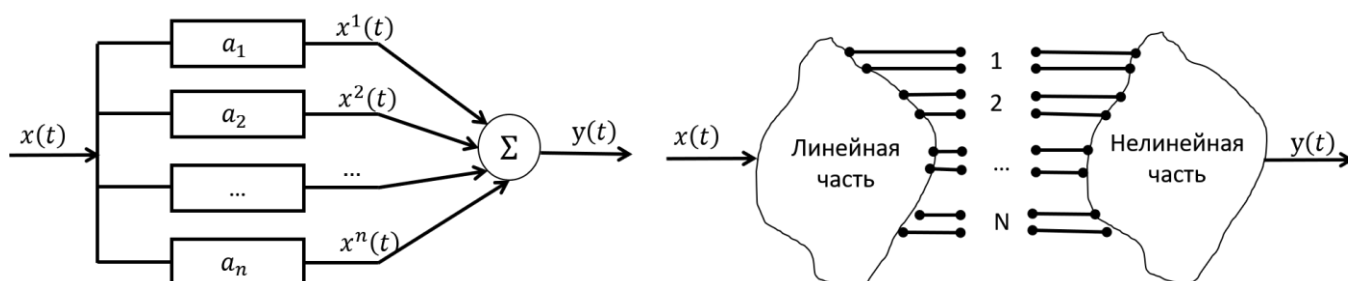


Рисунок 1 – Математическая и структурная модель точечного рассеивателя НО, описываемая с помощью рядов Тейлора

Данная модель показывает, что выходной сигнал системы $y(t)$ равен сумме элементов степенного ряда входного сигнала $x(t)$, каждый из которых возводится в n -ую степень и масштабируется с помощью постоянных масштабных коэффициентов a_n . Важно отметить, что данные коэффициенты определяют электромагнитную связь с нелинейностью n -го порядка.

Чтобы вывести математическую модель, рассмотрим основные физические процессы в радиолинии 2-го рода с НО. Что касается нелинейной РТС и детектора нелинейных переходов, то уравнения, определяющие ее дальность действия, хорошо известны и подробно представлены в научной литературе. Однако до сих пор нет описания порядка вывода этих уравнений для радиолинии 2-го рода и объяснения, учитывающего особенности протекания нелинейных процессов в НО для свободного пространства. Рассмотрим физические процессы передачи энергии, излучаемой объектом с нелинейными электромагнитными свойствами в результате его облучения зондирующим радиосигналом. На рисунке 2 показан путь, по которому проходит сигнал от пункта передачи для получения отклика от НО.

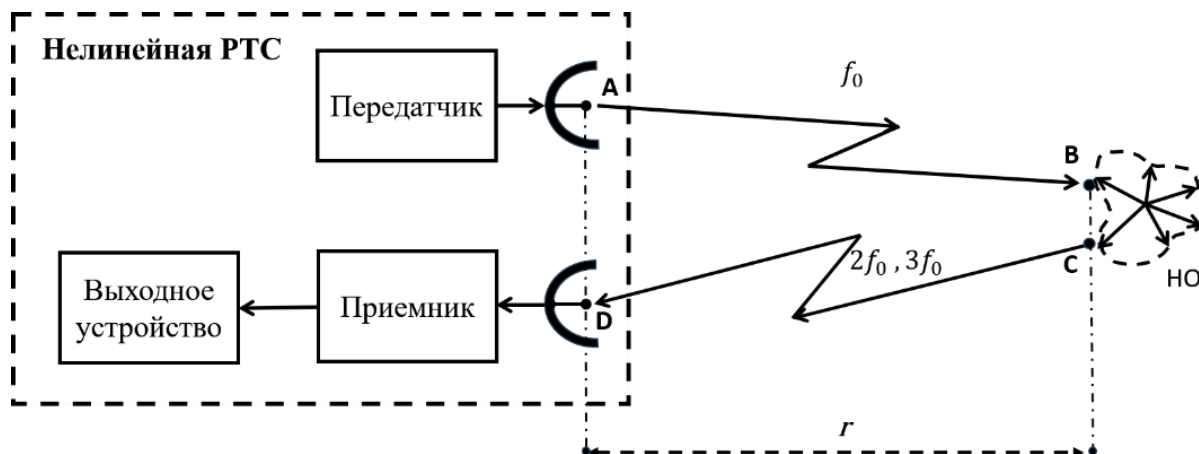


Рисунок 2 – Концептуальная схема действия нелинейной РТС

Поскольку НО, согласно предложенному подходу, облучается зондирующим сигналом, который преобразуется во 2-ую и 3-ью гармонику, и повторно излучает в окружающее пространство радиосигнал, отсутствующий в спектре падающей радиоволны, то этот радиотехнический процесс можно описать таким образом, что энергия радиоволны передается из точки А (пункт передачи) в точку В (пункт рассеяния сигнала), теряя часть энергии радиоволны на преобразования. НО улавливает часть зондирующего сигнала, после чего НО вторично излучает на другой частоте радиосигнал из точки С, который в итоге ослабленным приходит на пункт приема в точку D.

Под радиотехническим процессом мы будем понимать ряд преобразований, согласно концептуальной схеме и усовершенствованного метода обнаружения 2-й гармоники, которые являются теоретической основой научного исследования способа передачи энергии ЭМП радиопередающей станции от точки передачи (А) к точке приема радиосигнала (D). Такой подход позволит вывести новое уравнение, характеризующее нелинейную радиосистему.

Выражение для определения мощности сигнала, принимаемого НО (в точке В), примет вид:

$$P_{f_0}^{\text{НО}} = \frac{P_{f_0} G_1 n_1 \lambda_0^2 G_{\text{НО}}}{(4\pi)^2 r^2}, \quad (2)$$

где P_{f_0} – мощность излучения радиопередающей станции на частоте f_0 , Вт; G_1 – коэффициент усиления излучающей антенны; n_1 – коэффициент полезного действия антенно-фидерного устройства (АФУ) передающей станции; r – расстояние от излучающей антенны до НО, м; λ_0 – длина волны излучения средства радиозондирования, м; $G_{\text{НО}}$ – коэффициент усиления НО в направлении пункта приема падающей на него радиоволны от передатчика нелинейной РТС.

В отличие от линейного объекта, мощность сигнала на входе НО не равна отраженной мощности на его выходе. Это связано с тем, что под воздействием ЭМП падающей радиоволны в НО происходит нелинейное преобразование наведенных в нем токов смещения ($i_{\text{см}}$) и проводимости ($i_{\text{пров}}$). Принцип действия нелинейной РТС основан на свойстве нелинейных элементов в объекте поиска при облучении их зондирующим СВЧ-сигналом дополнительно переизлучать электромагнитную энергию на 2-й и 3-й гармонике. Максимальный отклик от

полупроводниковых элементов искусственного происхождения (транзисторы, диоды, микросхемы) наблюдается на 2-й гармонике зондирующего сигнала, а при облучении оксидных пленок, образовавшихся естественным образом, максимальный отклик наблюдается на 3-й гармонике зондирующего радиосигнала. В данном случае нет необходимости учитывать время нелинейного преобразования радиосигналов, поскольку в данном описании нелинейной радиосистемы не учитывается фазовая структура какого-либо радиосигнала. Таким образом, суть данной теории заключается в исследовании процессов нелинейного преобразования, как бы в «чистом виде», т.е. не учитываются другие состояния НО. Процесс нелинейного преобразования радиосигналов в НО представлен на рисунке 3.

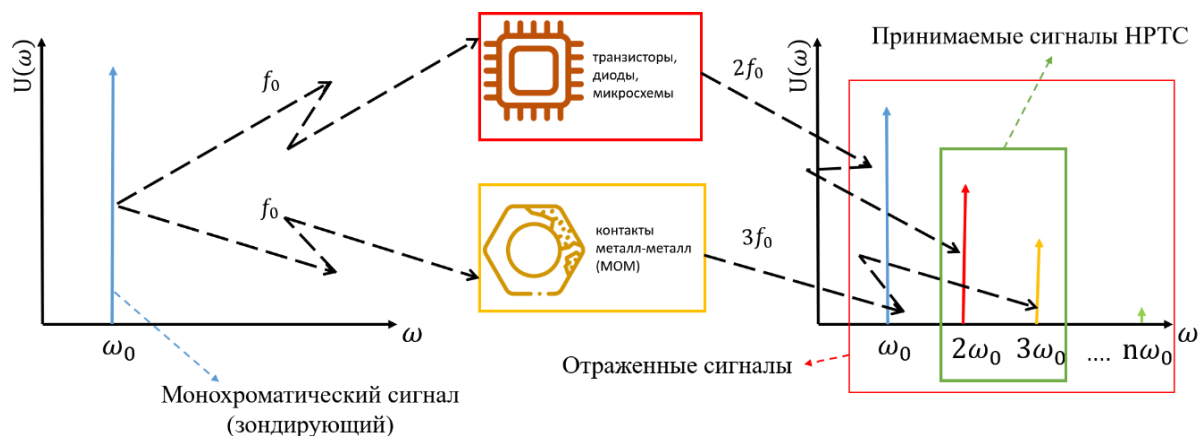


Рисунок 3 – Процесс нелинейного преобразования радиосигналов

Узел и корпус электронного изделия, а также соединительные контакты корпуса НО, обладающие эффектом нелинейного рассеяния радиоволн, являются локальными объектами, содержащими в своей конструкции р-п-переход или контакт металл-диэлектрик-металл, а также контакт металл-окисел-металл (МОМ). Падающая волна наводит токи на поверхности НО, которые протекая по нему через р-п переходы (или контакты) испытывают нелинейные преобразования. Такие переходы являются электрическими неоднородностями с соответствующим ВАХ, которые рассеивают энергию ЭМП. В результате рассеянный сигнал содержит информацию о электрических свойствах НО, а именно о его ВАХ.

Выходной ток при воздействии ЭМП радиопередающей станции на точечные элементы НО представим с помощью ряда Тейлора:

$$i_{\text{вых}}(t) = a_0 + a_1 U(t) + a_2 U^2(t) + a_3 U^3(t) + \dots + a_n U^n(t) + \dots, \quad (3)$$

где $U(t)$ – напряжение входного сигнала на полупроводниковой компоненте;
 a_0, a_1, \dots, a_n – коэффициенты аппроксимации полинома

$$a_1 = \frac{di}{dU(t)}, a_2 = \frac{1}{2!} \frac{d^2i}{d^2U(t)}, a_3 = \frac{1}{3!} \frac{d^3i}{d^3U(t)}, \dots, a_n = \frac{1}{n!} \frac{d^n i}{d^n U(t)}.$$

Рассеиваемую мощность сигнала на гармониках представим в виде:

$$P_{\text{вых}1} = I_1^2 Z = (a_1 U_0)^2 Z = (a_1 Z)^2 \frac{U_0^2}{Z} = (a_1 Z)^2 P_{\text{ex}} = \gamma_{\text{HO1}} P_{\text{ex}};$$

$$P_{\text{вых}2} = I_2^2 Z = \left(\frac{1}{2} a_2 U_0^2\right)^2 Z = \left(\frac{1}{2} a_2\right)^2 Z^3 \left(\frac{U_0^2}{Z}\right)^2 = \left(\frac{1}{2} a_2\right)^2 Z^3 P_{\text{ex}}^2 = \gamma_{\text{HO2}} P_{\text{ex}}^2;$$

...

$$P_{\text{вых}n} = I_n^2 Z = \left(\frac{1}{2^{n-1}} a_n U_0^n\right)^2 Z = \left(\frac{1}{2^{n-1}} a_n\right)^2 Z^{n+1} \left(\frac{U_0^2}{Z}\right)^n = \left(\frac{1}{2^{n-1}} a_n\right)^2 Z^{n+1} P_{\text{ex}}^n = \gamma_{\text{HO}n} P_{\text{ex}}^n;$$

где $\gamma_{\text{HO1}}, \gamma_{\text{HO2}}, \gamma_{\text{HO3}}, \dots, \gamma_{\text{HO}n}$ – коэффициент нелинейного преобразования для n-й гармоники.

С учетом этого соотношение между падающей и рассеяной частями мощности зондирующего сигнала представим в виде:

$$P_{\text{вых}_n} = \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n P_{\text{вх}}^n. \quad (4)$$

Используя эту связь, получим выражение для оценки мощности сигнала на выходе приемной антенны НРЛС (в точке D):

$$P_{\text{прм}} = \frac{\gamma_n (P_{f_0}^{\text{HO}})^n G_{\text{HO}} n_2 \lambda_n^{2n+2} G_{A_n}}{(4\pi)^2 r^2}. \quad (5)$$

где $\lambda_n = \lambda_0/n$ – длина волны n -й гармоники, м; G_{A_n} – коэффициент усиления приемной антенны для n -й гармоники; r – расстояние от НО до приемной антенны, м; n_2 – коэффициент полезного действия АФУ приемной станции нелинейной РТС.

Подставляя выражение (2) в (5), получим:

$$P_{\text{прм}} = \frac{\gamma_n (P_{f_0} G_1 n_1 G_{\text{HO}})^n G_{\text{HO}} \lambda_0^{2n+2} G_{A_n} n_2}{n^2 (4\pi)^{2n+2} r^{2n+2}}. \quad (6)$$

Выражение (6) является основным уравнением нелинейной РТС для n -й гармоники. При $n = 1$ получим основное уравнение традиционной РТС с линейным объектом отражения радиоволн. При этом выражение (6) справедливо только для идеальных условий, в которых не учитываются экранирование нелинейного объекта корпусом изделия, слоем укрывающей среды (почва, снег, растительность) и наличие у электромагнитной волны зондирующего сигнала поляризационных свойств.

Для повышения точности описания энергетического баланса в радиолинии 2-го рода нелинейной РТС в выражение (4) вводятся два корректирующих коэффициента:

$K_1 = [0...1]$ – коэффициент экранирования корпусом электронного изделия и слоем укрывающей среды;

$K_2 = [-1...1]$ – коэффициент, учитывающий несовпадение поляризаций зондирующего и отраженного сигналов, знак определяет направление вращения вектора E .

С учетом этих факторов, выражение (6) принимает вид:

$$P_{\text{прм}} = K_1^2 K_2^2 \frac{\gamma_n (P_{f_0} G_1 n_1 G_{\text{HO}})^n G_{\text{HO}} \lambda_0^{2n+2} G_{A_n} n_2}{n^2 (4\pi)^{2n+2} r^{2n+2}}. \quad (7)$$

Полученное выражение (7) является новым научным результатом, ранее не представленным в научной литературе. В отличие от известных уравнений радиолинии 2-го рода для нелинейной модели РТС, данное выражение учитывает потери передачи, обусловленные конструктивными особенностями НО (коэффициент K_1) и параметрами антенной системы (коэффициент K_2).

Соответственно максимальная дальность действия модели нелинейной РТС для радиолинии 2-го рода на 2-й и 3-й гармониках ($n = 2, 3$), будет определяться следующими выражениями:

$$r_{2.\text{max}} = \sqrt[6]{K_1^2 K_2^2 \frac{\gamma_2 (P_{f_0} G_1 n_1)^2 G_{\text{HO}}^3 \lambda_0^6 G_{A_2} n_2}{4(4\pi)^6 P_{\text{прм.min}}}}, \quad r_{3.\text{max}} = \sqrt[8]{K_1^2 K_2^2 \frac{\gamma_3 (P_{f_0} G_1 n_1)^3 G_{\text{HO}}^4 \lambda_0^8 G_{A_3} n_2}{9(4\pi)^8 P_{\text{прм.min}}}}. \quad (8)$$

Уравнения (8) показывают, что дальность действия радиолинии 2-го рода для 2-й и 3-й гармоники будет обратно пропорциональна мощности сигнала у приемной антенны в 6-й и 8-й степени соответственно. Это значит, что при увеличении дальности до НО мощность принимаемых сигналов на 2-й и 3-й гармониках будет уменьшаться существенно быстрее, чем для сигналов на несущей частоте f_0 . Для удобства сравнения на рисунке 4 представлены зависимости мощности сигнала на входе приемного устройства для 1-й, 2-й и 3-й гармоник ($n = 1, 2, 3$) от дальности до НО с учетом коэффициентов K_1, K_2 .

Проанализировав зависимость, можно сделать вывод, что при мощности СВЧ-излучения 100 Вт НО, расположенный на расстоянии 30 м от нелинейной РТС (при фиксированных значениях параметров модели (см. формулу (7))), формирует на выходе приемной антенны сигнал мощностью порядка примерно минус 133 дБм и минус 179 дБм для 2-й и 3-й гармоник соответственно. Для работы с таким малыми сигналами требуется высокочувствительный приемник. В то же время передающая антенна должна обладать высокой линейностью в широком диапазоне частот радиозондирования, а приемная антенна – без искажений принимать и передавать в приемник слабые радиосигналы, несущие информацию о нелинейных свойствах узла, корпуса электронного изделия и соединительных контактов корпуса изделия.

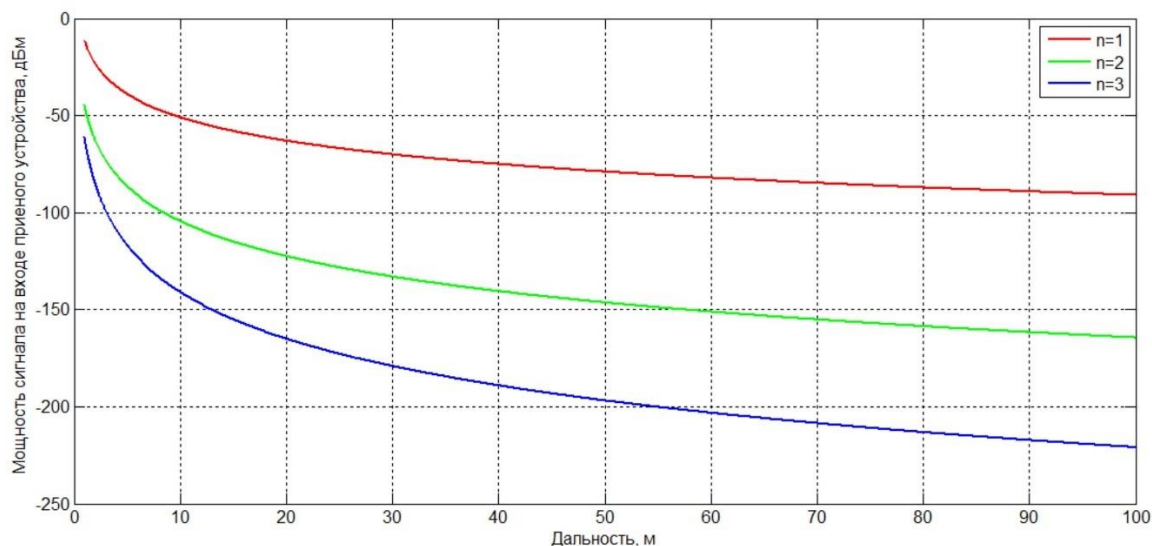


Рисунок 4 – Зависимость мощности сигнала в приемной антенне от дальности для 1-й, 2-й и 3-й гармоник в свободном пространстве

К передающей и приемной станциям нелинейной РТС также предъявляются строгие технические требования по отсутствию вторичных гармоник. Данная техническая задача усложняется тем, что необходимо генерировать и излучать передающей антенной сигналы с уровнем мощности более 50 дБм, в то время как принимать отраженные сигналы приходится на уровнях мощности ниже минус 130 дБм. Для решения данной проблемы предлагается использовать одну антенну на передачу, и две в радиоприемной станции для разделения сигналов от НО по углу.

В реальных условиях рассеянный радиосигнал, улавливаемый одним из приемных каналов нелинейной РТС, подвергается искажению из-за аддитивного шума (естественного или искусственного происхождения). Уравнения дальности действия в нелинейной модели РТС для радиоприемной станции 2-го рода на 2-й гармонике ($n = 2$) с учетом белого Гауссова шума будет иметь вид:

$$r_{2.max} = \sqrt[6]{K_1^2 K_2^2 \frac{\gamma_2 (P_{f_0} G_1 n_1)^2 G_{НО}^3 \lambda_0^6 G_{A_2} n_2}{4(4\pi)^6 k T B F_{ш} q_{min}}}. \quad (9)$$

где $k = 1,3806 \cdot 10^{-23}$ – постоянная Больцмана; T – шумовая температура приемника, К; B – ширина полосы пропускания приемника, Гц; $F_{ш}$ – коэффициент шума; q_{min} – минимальное отношение «сигнал/шум» на выходе приемника.

На рисунке 5 представлена зависимость отношения «сигнал/шум» от мощности шума на входе приемника и от мощности излучения нелинейной РТС. Из графика видно, что отношение «сигнал/шум» обратно пропорционально мощности шума по отношению 1:1 и прямо пропорционально мощности излучения по отношению 2:1. Чем выше это отношение, тем выше вероятность обнаружения НО и точность измерения параметров отраженного сигнала на фоне шумов естественного и искусственного происхождения. Однако, чтобы полностью оценить эффективность обнаружения НО в реальных условиях эксплуатации, целесообразно перейти к

статистическому анализу и рассмотреть кривые обнаружения, которые отображают взаимосвязь между вероятностью правильного обнаружения D , вероятностью ложной тревоги F и отношением сигнал/шум q .

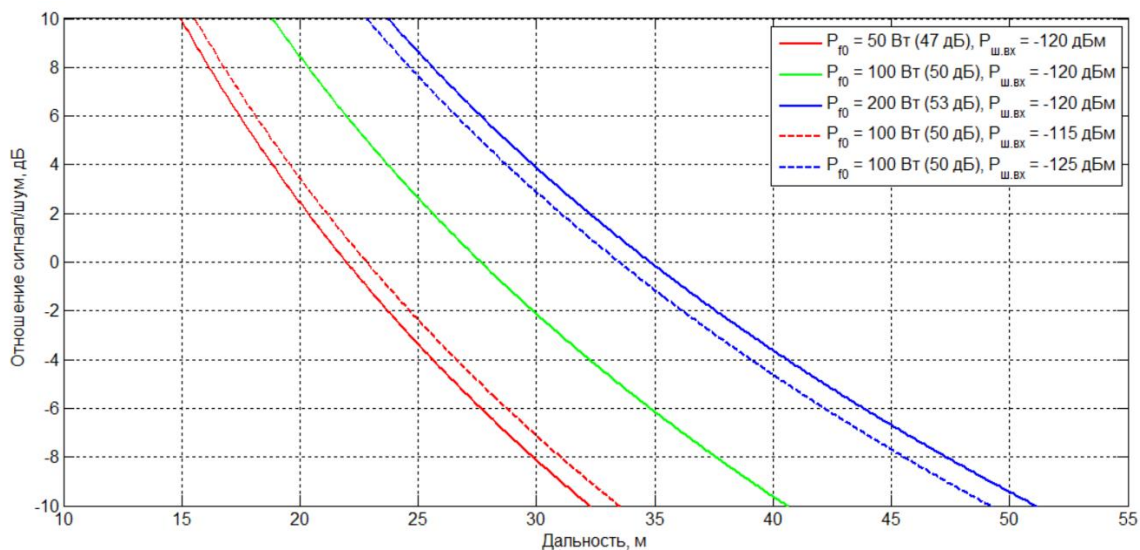


Рисунок 5 – Зависимость отношения «сигнал/шум» при $n = 2$ в свободном пространстве от мощности шума на входе приемника и мощности излучения нелинейной РТС

В условиях белого Гауссова шума и неопределенности относительно потерь передачи из-за конструктивных особенностей НО и формы освещаемой антенной поверхности земли наилучшим методом обнаружения полезного сигнала с точки зрения минимизации вероятности ошибочного решения является корреляционная обработка с двумя квадратурными каналами. Для данного случая схема автокорреляционного обнаружителя с квадратурными каналами представлена на рисунке 6.

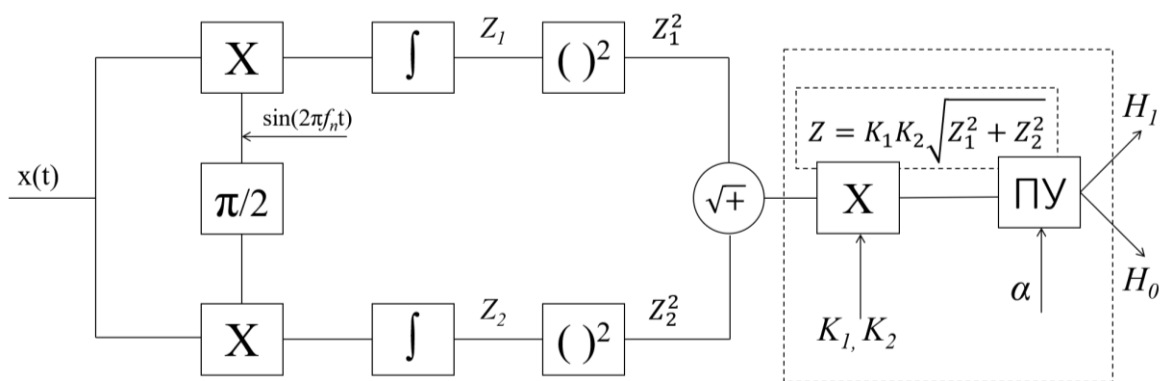


Рисунок 6 – Схема автокорреляционного обнаружителя с квадратурными каналами

Автокорреляционный обнаружитель реализуется путем параллельной обработки входного сигнала двумя согласованными фильтрами, настраиваемыми на одну и ту же удвоенную частоту, но сдвинутыми на 90° по фазе (косинус и синус). Наличие двух каналов исключает потерю полезного сигнала за счет незнания его начальной фазы. Интегрируя проекции входного процесса на эти две ортогональные опорные функции, схема обнаружения максимизирует отношение «сигнал/шум» на выходе. После интегрирования результирующие квадратурные компоненты Z_1 и Z_2 объединяют в детекторе огибающей, учитывающим коэффициенты K_1 и K_2 соответственно. Полученное значение Z поступает на пороговое устройство, где сравнивается с порогом α , установленным в соответствии с требуемой вероятностью ложной тревоги. При превышении данного порога принимается решение о наличии сигнала, а при неперевышении – об ее отсутствии. Благодаря такому подходу, критерий Неймана-Пирсона, задающий компромисс между вероятностями обнаружения и ложной тревоги, реализуется наиболее эффективно.

Вероятность ложной тревоги F определяется как вероятность того, что значение Z превышает порог α , хотя сигнала нет (ложная тревога):

$$F = P(H_1 / H_0) = P\{Z > \alpha / H_0\} = P\left\{\frac{Z^2}{K_1^2 K_2^2 \sigma^2} > \frac{\alpha^2}{K_1^2 K_2^2 \sigma^2} / H_0\right\}. \quad (10)$$

Используя вероятность правого хвоста выражение (10) можно записать в виде:

$$F = Q_{\chi^2_2}\left(\frac{\alpha^2}{2K_1^2 K_2^2 \sigma^2}\right) = e^{\frac{-\alpha^2}{2K_1^2 K_2^2 \sigma^2}}. \quad (11)$$

Из формулы (11) можно выразить порог α :

$$\alpha = K_1 |K_2| \sigma \sqrt{2 \ln\left(\frac{1}{F}\right)}. \quad (12)$$

Вероятность правильного обнаружения D рассчитывается аналогично, но уже в предположении наличия сигнала (гипотеза H_1):

$$D = P(H_1 / H_1) = P\{Z > \gamma / H_1\} = P\left\{\frac{Z}{\sigma^2 / 2} > \frac{\alpha}{\sigma^2 / 2} / H_1\right\} = Q_{\chi^2_2(\lambda)}(\alpha^2). \quad (13)$$

При наличии сигнала (гипотеза H_1) выход фильтра распределен согласно нецентральному χ^2 -распределению с двумя степенями свободы и нецентральным параметром β :

$$\beta = \frac{(K_1 |K_2| U_m)^2 N}{\sigma^2}, \quad (14)$$

где N – количество наблюдений.

Подстав выражение (12), (14) в (13) получим:

$$D = Q\left(\sqrt{2 \ln\left(\frac{1}{F}\right)} - \sqrt{\beta}\right). \quad (15)$$

На рисунке 7 изображены зависимости вероятности правильного обнаружения НО D от дальности r для двух случаев: идеализированной модели без учета коэффициентов K_1, K_2 (группа кривых синего цвета), и более реалистичной модели, учитывающей физические потери передачи и форму освещаемой антенной поверхности (группа кривых красного цвета). Видно, что на расстояниях, превышающих 25-35 м, в нелинейной РТС существенное влияние оказывают потери передачи и форма освещаемая антенной поверхности.

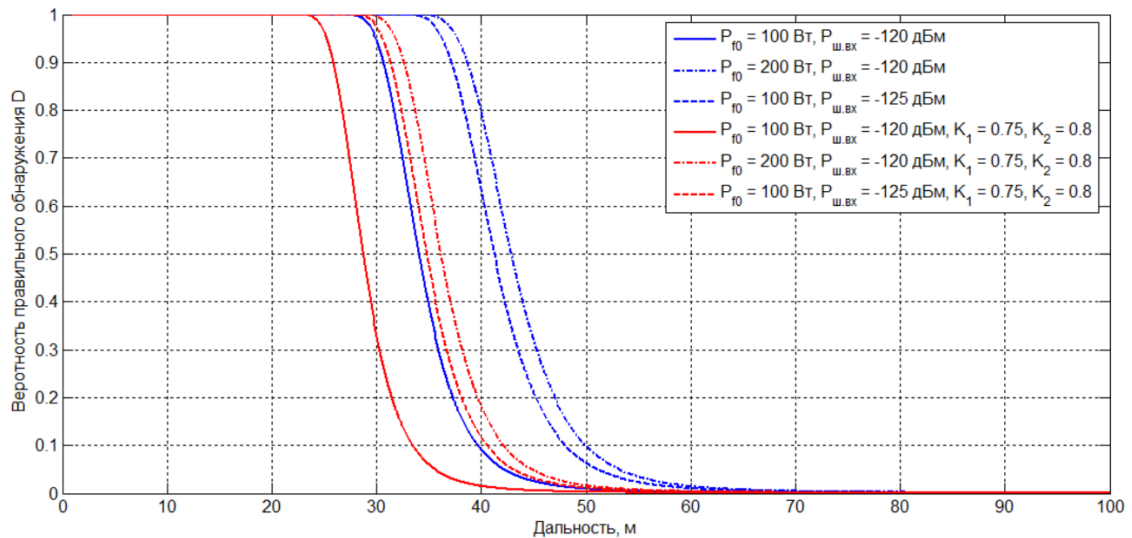


Рисунок 7 – Зависимость вероятности правильного обнаружения D от дальности до НО на 2-й гармонике при различных параметрах и заданном уровне ложной тревоги

Данный научный результат подчеркивает критическую чувствительность нелинейной РТС к изменению расстояния до НО, что объясняется 6-ой степенной зависимостью принимаемой мощности от расстояния r^6 , а также геометрической формы антенны передающей станции и экранирующего свойства корпуса НО. Такая зависимость указывает на то, что даже незначительное увеличение расстояния приводит к значительному уменьшению рассеиваемой НО мощности сигнала, а, следовательно, и q , что напрямую влияет на характеристики обнаружения.

Сравнивая результаты моделирования на рисунке 7 видно, что повышение мощности первичного излучения эффективнее увеличивает вероятность обнаружения НО, чем снижение уровня входного шума приемника, хотя оба фактора увеличивают дальнюю границу обнаружения.

Таким образом, для повышения вероятности обнаружения НО РТС необходимо учитывать множество физических и радиотехнических параметров радиолинии 2-го рода, влияющих на чувствительность нелинейной РТС, таких как выбор радиооборудования и конструкции антенн.

В третьем разделе диссертации исследован выбор эффективного способа угловой локализации НО с применением фазовой и амплитудной радиопеленгации в одно- и двухканальной схеме приема рассеянного сигнала, что особенно важно при построении мобильных нелинейных РТС для поиска неоднородностей в материальной среде. Проведены натурные эксперименты по пространственному разделению СВЧ-сигналов, отраженных от НО, с использованием методик векторного анализа цепей и построением диаграмм излучения. Изучены нормированные АДН передающих антенн и диаграммы вторичного излучения НО на основной частоте $f_0 = 900$ МГц и на 2-й гармонике $2f_0 = 1,8$ ГГц (Рис. 8).

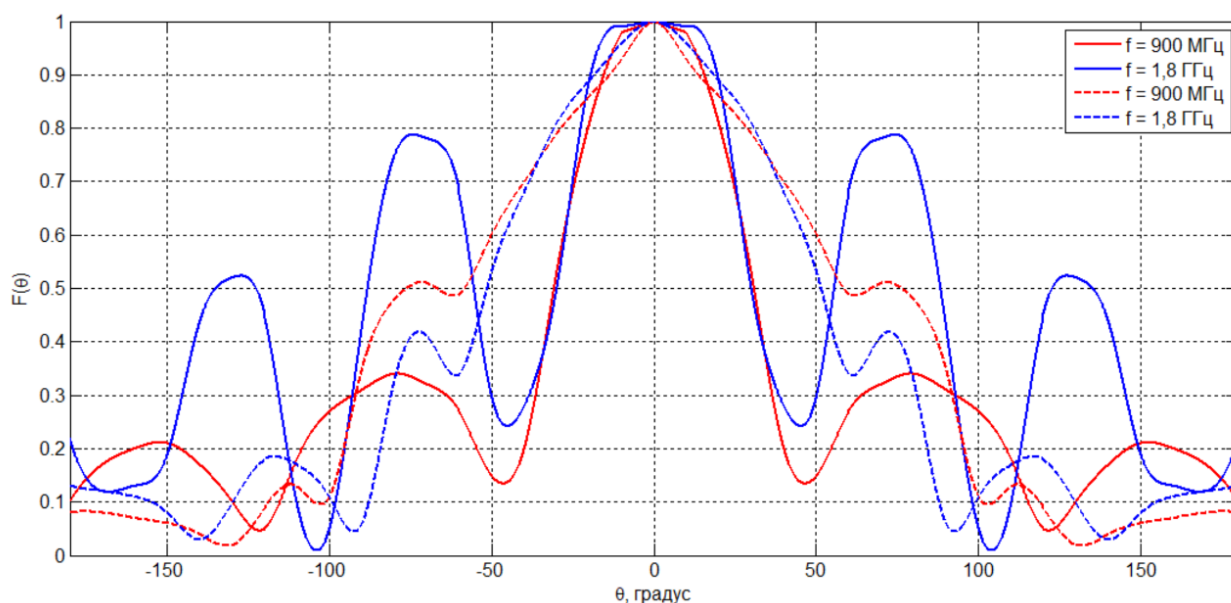


Рисунок 8 – Нормированные диаграммы направленности исследуемых антенн и модели НО на 2-й гармонике (сплошная линия – цилиндрическая СА, пунктирная – коническая СА)

В ходе проведенного эксперимента было установлено, что на 2-й гармонике наблюдается сужение лепестков в диаграмме обратного вторичного излучения и изменение структуры боковых лепестков, что свидетельствует о наличии выраженного нелинейного отклика со стороны исследуемых объектов. Экспериментальные результаты подтверждают высокую эффективность СА для возбуждения и регистрации гармонических сигналов, что обосновывает их применение в передающей станции нелинейной РТС.

На основе полученных во втором разделе математических выражений разработана имитационная модель радиолинии второго рода для имитации работы нелинейной РТС. На рисунке 9 представлена схема экспериментальной установки, на которой: РПДУ – радиопередающее устройство; РПРУ – радиоприемное устройство; f_0 – частота 1-й гармоники.

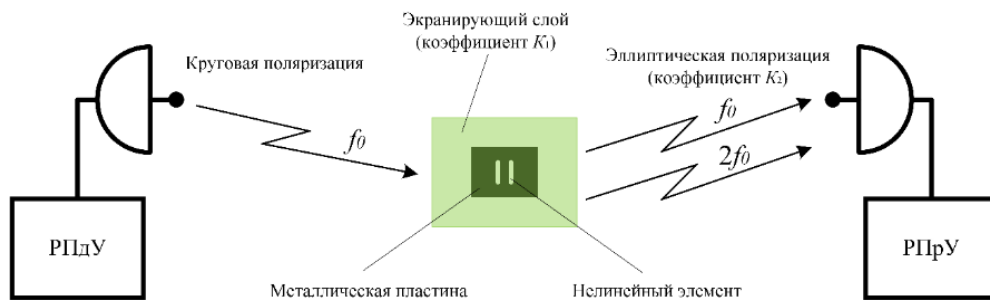


Рисунок 9 – Схема экспериментальной установки

Модель имитирует работу передающей антенной системы с круговой поляризацией, основной лепесток диаграммы направленности которой направлен на облучаемый элемент. В качестве облучаемого элемента используется объект, имеющий определенную эффективную площадь рассеяния. При этом моделируются три ситуации:

- 1) объектом является металлическая пластина, не обладающая нелинейными свойствами;
- 2) объектом является та же металлическая пластина, на которой размещен нелинейный элемент со своей эффективной площадью рассеяния на частоте второй гармоники;
- 3) объектом является та же металлическая пластина, на которой размещены два одинаковых нелинейных элемента с такими же, как и во второй ситуации эффективными площадями рассеяния.

Данная имитационная модель позволяет исследовать различные зависимости, например, влияние толщины экранящего слоя и его экранящих свойств на амплитуду принятого сигнала на частотах первой и второй гармоник, влияние эффективной поверхности рассеяния нелинейного элемента и количества нелинейных элементов на амплитуду сигнала на частоте второй гармоники, влияние несовпадения по поляризации зондирующего сигнала с отраженным от нелинейного объекта сигналом. Кроме того, модель также позволяет разработать алгоритм обработки принятого сигнала на частоте второй гармоники для оценки количественных показателей нелинейных элементов, содержащихся в зоне облучения.

Вид зондирующего сигнала и его спектр показаны на рисунках 10 и 11.

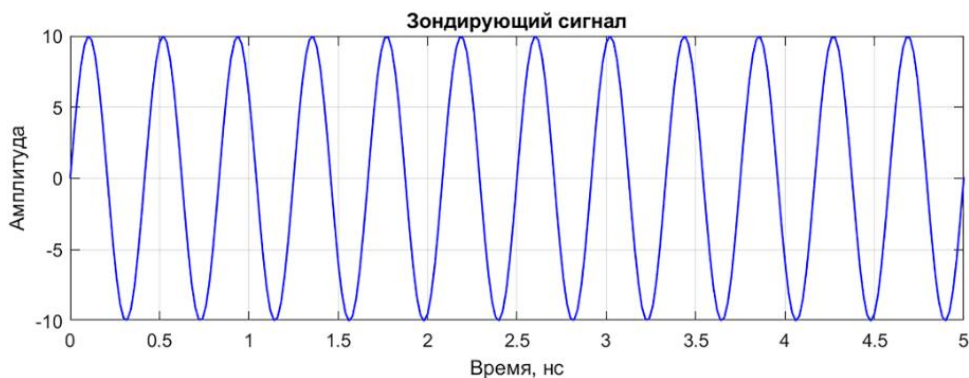


Рисунок 10 – Синусоидальный зондирующий сигнал

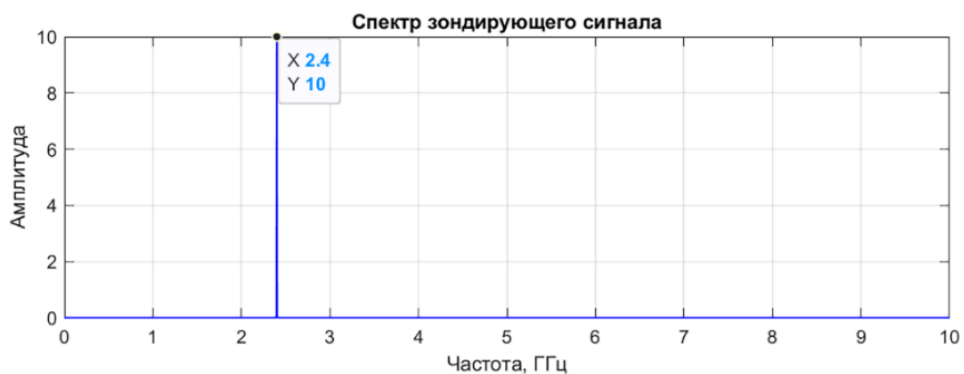


Рисунок 11 – Спектр зондирующего сигнала на частоте 2,4 ГГц

В первой ситуации нелинейная РТС облучает металлическую пластину при естественных шумах и наличии на объекте экранирующего слоя. После отражения от металлической пластины сигнал поступает на антенну радиоприемного устройств. Вид принятого сигнала и его спектр на частоте первой гармоники представлен на рисунках 12 и 13.



Рисунок 12 – Принятый сигнал на частоте первой гармоники

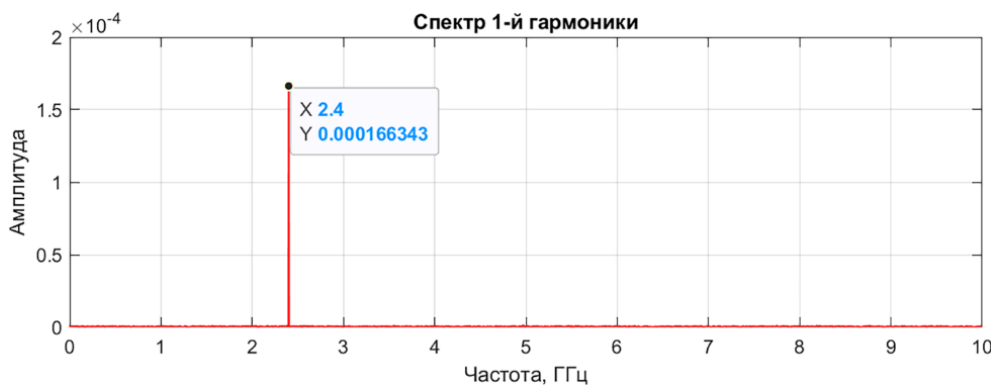


Рисунок 13 – Спектр принятого сигнала

Как видно из рисунков 12 и 13, сигнал претерпевает затухание и искажается внешним шумом, однако принимается на частоте 2,4 ГГц, которая соответствует основному излучению на первой гармонике. При этом, исходя из теории нелинейной радиолокации, сигнал на частоте второй гармоники должен отсутствовать. Графики принятого сигнала на частоте второй гармоники и его спектр представлены на рисунках 14 и 15.

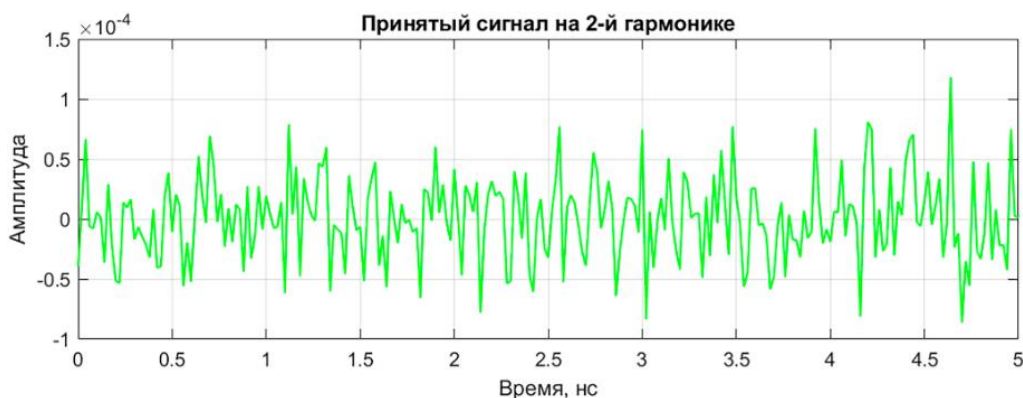


Рисунок 14 – Принятый сигнал на частоте второй гармоники

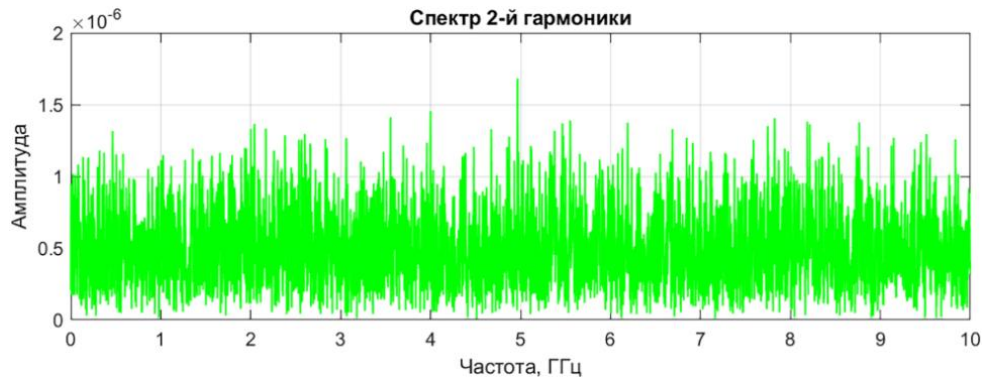


Рисунок 15 – Спектр принятого сигнала

Как видно из графиков на рисунках 14 и 15, на частоте второй гармоники 4,8 ГГц в случае облучения линейного объекта сигнал отсутствует, а присутствует только шумовая составляющая, что позволяет заключить, что результаты моделирования совпадают с теоретическими положениями, что подтверждает адекватность разработанной модели.

Во второй ситуации нелинейная РТС облучает металлическую пластину с расположенным на ней нелинейным элементом при естественных шумах и наличии на объекте экранирующего слоя. На рисунках 16 и 17 представлены графики принятого сигнала и его спектра.



Рисунок 16 – Принятый сигнал на частоте второй гармоники

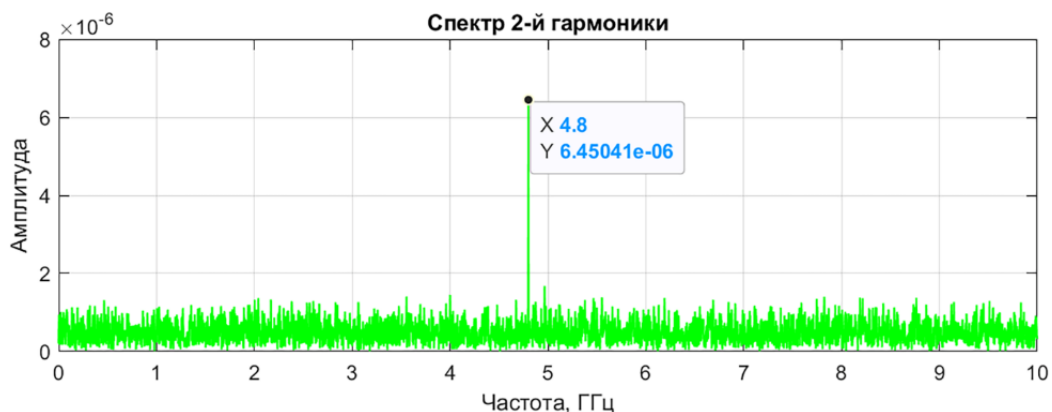


Рисунок 17 – Спектр принятого сигнала

Анализ графиков, представленных на рисунках 16 и 17, показывает, что при наличии в облучаемом объекте нелинейного элемента на частоте второй гармоники 4,8 ГГц возникают нелинейные колебания, уровень которых значительно выше уровня шумов, что позволяет его однозначно идентифицировать. Данные вычислительного эксперимента также подтверждаются теоретическими положениями нелинейной радиолокации.

В третьей ситуации нелинейная РТС облучает металлическую пластину с расположенными на ней двумя одинаковыми нелинейными элементами при естественных шумах и наличии на

объекте экранирующего слоя. При этом рассмотрение принятого сигнала на частоте первой гармоники не имеет смысла, так как количество нелинейных элементов не влияет на отраженный сигнал, как и во второй ситуации. Но при этом особое внимание в данной ситуации следует обратить на принятый сигнал на частоте второй гармоники, представленный на рисунках 18 и 19.



Рисунок 18 – Принятый сигнал на частоте второй гармоники



Рисунок 19 – Спектр принятого сигнала

Анализ графиков, представленных на рисунках 18 и 19, показывает, что при увеличении в облучаемом объекте количества нелинейных элементов на частоте второй гармоники 4,8 ГГц уровень нелинейных колебаний увеличивается, что повышает вероятность идентификации нелинейного объекта.

На основе полученных экспериментальных данных разработан алгоритм обработки принятых сигналов на частотах первой и второй гармоник с целью идентификации нелинейных объектов.

На первом этапе необходимо выбрать параметры зондирующего сигнала, а также пороговый уровень идентификации нелинейных объектов. Пороговый уровень идентификации выбирается исходя из следующих соображений. За основу необходимо взять амплитуду (интенсивность) или мощность принятого отраженного сигнала на частоте первой гармоники, затем измерить уровень шума в месте локации. Далее на основе условия

$$K_{\text{пор}} = \frac{P_{\text{ш}}}{P_{c1}} = \frac{A_{\text{ш}}^2}{A_{c1}^2} \rightarrow 0,$$

где $P_{\text{ш}}$ и $A_{\text{ш}}$ – соответственно спектральная плотность мощности и средняя спектральная плотность шума на частоте первой гармоники, P_{c1} и A_{c1} – мощность и амплитуда отраженного сигнала на частоте первой гармоники соответственно, определить уровень порогового значения $K_{\text{пор}}$, превышение которого будет считаться наличием нелинейного объекта в подсвечиваемой зоне. Для оценки P_{c1} и A_{c1} целесообразно применить фильтрацию сигнала полосовым фильтром с центральной частотой, равной частоте первой гармоники излучаемого сигнала, и шириной полосы пропускания, равной величине, обратной длительности зондирующего импульса. Оценка $P_{\text{ш}}$ и $A_{\text{ш}}$

может быть получена после аналогичного фильтра, но с центральной частотой, отличающейся от частот первой и второй гармоник излучаемого сигнала.

На втором этапе производится прием отраженных сигналов на частотах первой и второй гармоник. Далее в условие для $K_{пор}$ вместо $P_{ш}$ или $A_{ш}$ необходимо подставить значение мощности или амплитуды принятого отраженного сигнала на частоте второй гармоники, получаемое применением фильтрации сигнала полосовым фильтром с центральной частотой, равной частоте второй гармоники излучаемого сигнала, и шириной полосы пропускания, равной величине, обратной длительности зондирующего импульса для расчета коэффициента отношения $K_{отн}$ мощности сигнала принятого на частоте 2-й гармоники к мощности сигнала на частоте 1-й гармоники.

На третьем этапе необходимо сравнить полученное значение коэффициента отношения $K_{отн}$ с уровнем порогового значения $K_{пор}$ и сделать вывод о наличии или отсутствии нелинейного элемента в освещаемой зоне.

Блок-схема предложенного алгоритма представлена на рисунке 20.

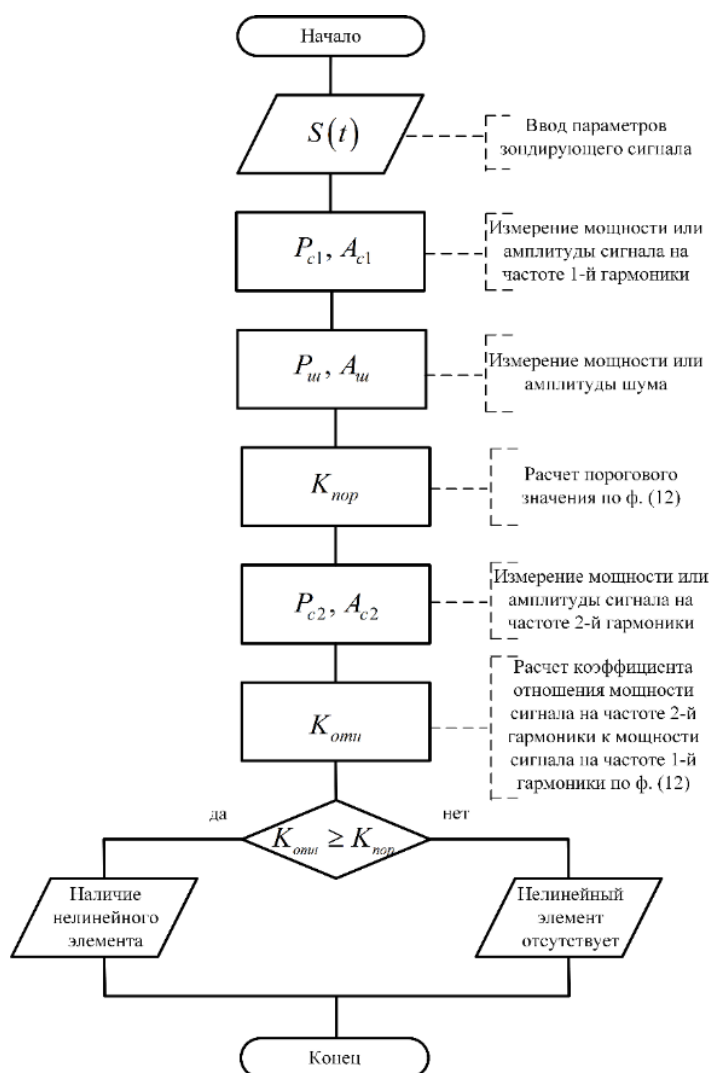


Рисунок 20 – Алгоритм обработки принимаемых сигналов при обнаружении нелинейных объектов

С целью выбора эффективного метода определения угловых координат НО исследованы амплитудные способы угловой локализации, такие как метод максимума, минимума и сравнения, а также фазовый метод, реализуемый с помощью схем двухканального фазового пеленгатора.

Установлено, что амплитудный метод сравнения (суммарно-разностный метод) обладает наилучшей точностью при малых углах смещения источника излучения благодаря высокой крутизне угловой локализации. Фазовый метод обеспечивает более точное позиционирование угла

прихода радиоволны за счет использования разности фаз, однако требует более сложной аппаратной реализации, включая многоканальные конфигурации и более узкий главный лепесток ДНА приемной антенны.

Суммарно-разностный метод угловой локализации использует две разнесенные антенны, так, что электрическая ось одной антенны отклонена на угол плюс вправо, а второй – на минус θ_0 влево от срединного направления. Сигналы двух приемных каналов складываются и вычитаются с помощью гибридного суммарно-разностного моста. В результате получаем суммарный канал $U_{\Sigma}(t)$ и разностный канал $U_{\Delta}(t)$.

Для описания угломерной функции в условиях присутствия двух направленных источников, использовалась упрощенная модель, учитывающая только амплитудные характеристики сигналов. В этом случае угломерная характеристика в присутствии двух НО в зоне действия нелинейной РТС описывается примерно так:

$$g(\theta) \approx \frac{E_1^2 F^2(\theta - \theta_1) - E_2^2 F^2(\theta - \theta_2)}{E_1^2 F^2(\theta - \theta_1) + E_2^2 F^2(\theta - \theta_2)}. \quad (16)$$

На основе полученного выражения для $g(\theta)$ можно перейти к оценке угловой погрешности пеленгации $\delta\theta$, возникающей в присутствии мешающего источника на угловом расстоянии $\Delta\theta$. В случае симметричной антенны и малых углов отклонения, при условии $\theta_1 = \delta\theta$, $\theta_2 = \Delta\theta$, и $\theta_0 = 0$, угловая погрешность определяется выражением:

$$\delta\theta = \frac{F(\theta_0 + \Delta\theta) - F(\theta_0 - \Delta\theta)}{4F'(\theta_0)}, \quad (17)$$

где θ_0 – равносигнальный угол (в данном случае $\theta_0 = 0$, то есть электрические оси антенн коллинеарны); $F'(\theta_0)$ – производная диаграммы направленности по углу при θ_0 .

Данная формула отражает влияние асимметрии антенной характеристики, вызванной присутствием второго источника, на результат оценки углового положения НО. На рисунке 10 представлена зависимость угловой погрешности $\delta\theta$ от углового расстояния между двумя НО $\Delta\theta$.

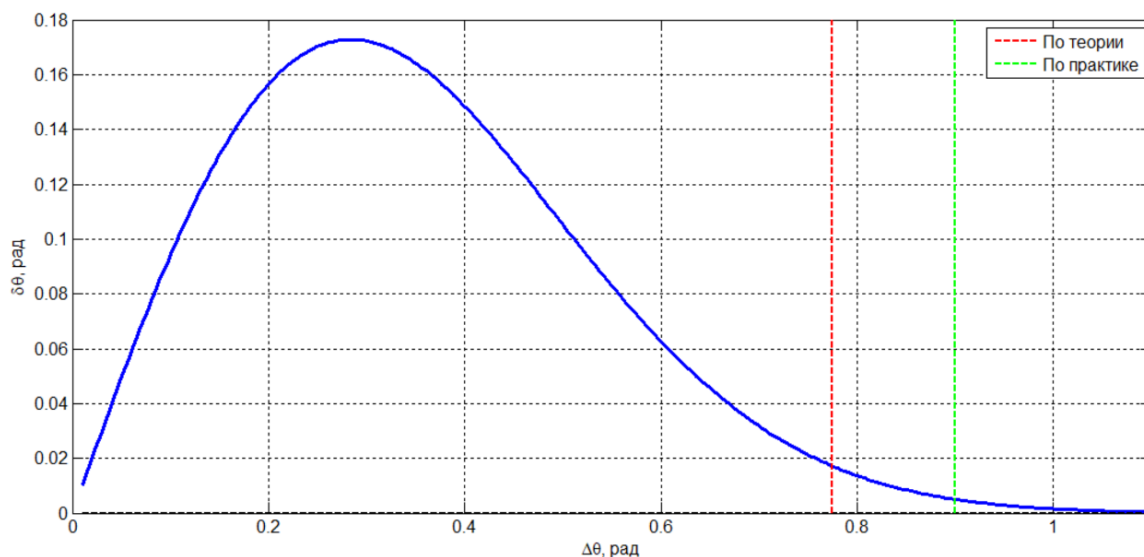


Рисунок 21 – Зависимость угловой погрешности от углового расстояния между двумя НО

Из анализа полученных результатов следует, что при малых значениях $\Delta\theta$ ($\Delta\theta < \theta_{0,5} = 0,6$ рад.) наблюдается существенное возрастание погрешности, что обусловлено взаимным перекрытием сигнальных откликов от двух пространственно разнесенных НО. При достижении соотношения $\Delta\theta \geq 1,5\theta_{0,5}$ величина погрешности асимптотически приближается к нулевому значению, что свидетельствует о достижении надежного углового разрешения НО. Исходя из полученных данных, величина $\Delta\theta \approx 1,5\theta_{0,5}$ может быть установлена в качестве практического критерия углового разрешения для нелинейной РТС.

Величина $\Delta\theta \approx 1,5\theta_{0,5}$, определенная по результатам графического анализа, демонстрирует полное соответствие теоретическому критерию углового разрешения, которому соответствует расчетная величина $\Delta\theta_{\text{теор.}} = \sqrt{2}\theta_{0,5}$. Полученные результаты исследования подтверждают корреляцию между аналитическими и экспериментальными оценками критической угловой разности, обеспечивающей достоверное разрешение сигналов от двух пространственно сближенных НО.

На основе суммарно-разностного метода угловой локализации была разработана структурная схема мобильной нелинейной РТС «безопасной машины».

В состав предложенной мобильной нелинейной РТС входят следующие основные функциональные элементы:

- бортовая радиопередающая станция (генератор сигнала, усилитель мощности, передающая СА);
- бортовая радиоприемная станция (левая и правая приемные антенны, гибридный суммарно-разностный мост, анализатор амплитуды сигнала и спектра рассеянных гармоник);
- информационно-визуальная система сопровождения мониторинга местности (интерфейс, дисплей и т.п.);
- дополнительные модули обеспечения движения, сопрягаемые с системой.

Технические характеристики предложенной системы представляю ниже:

Мощность передатчика (регулируемая)	– 5-10 Вт
Импульсная мощность	– 100-200 Вт
Длительность импульса	– 5 нс
Рабочая частота передатчика в режиме поиска	– 2,4 ГГц \pm 88 Гц
Рабочая частота в режиме поиска 2-й гармоники	– 4,8 ГГц \pm 176 Гц
Рабочая частота в режиме локализации НО	– излучение – 2,4 ГГц; прием – 4,8 ГГц
Коэффициент усиления передающей антенны	– 10-12 дБи
Коэффициент усиления приемной антенны	– 8-12 дБи
Ширина главного лепестка АДН передающей антенны	– 50-60 град.
Ширина главного лепестка АДН приемной антенны	– 30-40 град.
Гарантируемая дальность обнаружения	– \leq 30 м

Разработана структурная схема мобильной нелинейной РТС «безопасной машины», обеспечивающей надежное обнаружение и точное определение местоположения неоднородности. Импульсная мощность и рабочая частота излучателя, а также специальная конструкция антенн позволяют гарантированно выявлять НО на дистанции порядка 30 м с точностью угловой локализации на уровне долей град. Использование передающей СА с эллиптическим основанием и двухканального приема с суммарно-разностным методом локализации обеспечивает надежное обнаружение и селекцию предметов с полупроводниковыми компонентами в сложных городских условиях и сельской местности, повышая уровень безопасности при очистке территорий с помощью инженерной робототехники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе проведенных исследований получены следующие основные результаты:

1. Предложена усовершенствованная математическая модель нелинейной РТС, учитывающая особенности нелинейных преобразований при воздействии СВЧ-излучения на НО. Новая модель позволяет детально описать процесс преобразования гармонического сигнала и точно прогнозировать дальность обнаружения слабоконтрастных электрических неоднородностей с квадратичной ВАХ в свободном пространстве. В модели точечного элемента рассеяния с полупроводниковыми компонентами квадратичная ВАХ представлена в виде ряда Тейлора, первые три члена которого определяют электрические свойства неоднородности, влияющие на величину эхосигнала. На основе полученных зависимостей была выведена инженерная формула,

обеспечивающая расчет ключевых параметров обнаружения нелинейными РТС при радиозондировании местности с сохранением правильной физической размерности всех переменных. На основании проведенного имитационного моделирования процесса функционирования нелинейной РТС разработан алгоритм обработки принятых нелинейной РТС сигналов, позволяющий с заданной точностью производить обнаружение НО.

2. Усовершенствован метод расчета радиолинии 2-го рода с НО, отражающим радиоволны СВЧ-диапазона, в котором, в отличие от известных методов учтены: обобщенная математическая модель нелинейной РТС, основанная на степенном ряде Тейлора для квадратичной ВАХ точечного рассеивателя СВЧ-сигнала, которая позволила описать НО с помощью метода полиномиальной аппроксимации; общие потери СВЧ-энергии в свободном пространстве. Выведенные аналитические выражения показывают, что мощность принимаемого СВЧ-сигнала на 2-й и 3-й гармониках обратно пропорциональна расстоянию до объекта в 6-й и 8-й степени соответственно.

3. Усовершенствован метод оценки вероятности правильного обнаружения D и вероятности ложной тревоги F в условиях воздействия шума применительно к радиообнаружению 2-й гармоники СВЧ-сигнала. Анализ кривых обнаружения подтвердил критическую зависимость вероятности обнаружения от таких параметров, как мощность излучения, уровень шума приемного устройства, расстояние до НО, формы освещаемой передающей антенной поверхности и угла наклона зондирующего луча. Полученные результаты демонстрируют, что повышение мощности излучения оказывает более значительное влияние на увеличение дальности действия и вероятности обнаружения по сравнению со снижением уровня шума приемника.

4. В результате экспериментальных исследований характеристик нелинейного рассеяния радиоволн СВЧ-диапазона подтверждена целесообразность применения СА в нелинейных РТС. Сравнительный анализ амплитудных методов локализации (метод максимума, минимума и сравнения) показал, что наибольшей точностью угловой локализации НО обладает метод сравнения (суммарно-разностный). Данный метод обеспечивает высокую крутизну угловой характеристики и минимизацию погрешностей даже при малых углах смещения источника сигнала. В условиях реальной эксплуатации нелинейной РТС наиболее предпочтительным является именно метод сравнения благодаря его способности обеспечивать высокую надежность и точность при низких уровнях отраженного от НО СВЧ-сигнала и значительных помехах окружающего фона. Фазовый метод, несмотря на перспективность и точность измерений, требует сложной многоканальной схемы и более узких главных лепестков АДН антенны, что ограничивает его внедрение.

5. Анализ разрешающей способности суммарно-разностного метода локализации НО подтвердил, что минимальное угловое расстояние для уверенного разделения двух близко расположенных источников электромагнитного излучения должно превышать ширину главного лепестка АДН, что соответствует уровню $1,5\theta_{0,5}$. Данный метод демонстрирует существенные преимущества за счет одновременной обработки сигналов, большей устойчивости к нестабильности фазовой длины каналов в нелинейной РТС и возможности точного измерения углового положения НО даже в условиях сложных помеховых и эксплуатационных факторов.

6. На основании исследований, выполненных в разделах 2 и 3, предложено использование детектирования 2-й гармоники СВЧ-сигнала в мобильной роботизированной системе мониторинга. Определены оптимальные параметры импульсного передатчика мощностью 100-200 Вт и рабочая частота 2,4 / 4,8 ГГц, обеспечивающие дальность обнаружения НО на 2-й гармонике СВЧ-сигнала не менее 30 м и соблюдение предельно допустимых уровней электромагнитного излучения в зоне нахождения операторов мобильной системы. Применение широкополосной СА и двухканальной приемной системы с суммарно-разностным методом позволяет эффективно разделять сигналы от близко расположенных источников излучения 2-й гармоники СВЧ-сигнала, рассеянного электрической неоднородностью с квадратичной ВАХ.

Кроме того, в ходе исследования были устранены основные недостатки известных методов расчета нелинейных РТС, предложенных Щербаковым Г.Н. и Gallagher К.А., благодаря учету размерности радиотехнических параметров и радиофизических величин. Это повысило точность моделирования физических процессов в радиолиниях 2-го рода с электрическими

неоднородностями, имеющими квадратичные ВАХ. Усовершенствованные подходы позволили увеличить достоверность расчетов дальности действия системы и эффективности обнаружения источников вторичного излучения 2-й гармоники, а также обеспечить точную угловую локализацию НО в зоне действия мобильной нелинейной РТС. Полученные результаты демонстрируют высокую перспективность предложенных методов и их важное значение для дальнейших научных исследований и практических приложений.

Таким образом, цель диссертационной работы достигнута, научная задача решена в полном объеме. Предложенные решения обладают значительным потенциалом для дальнейшего практического применения, способствуя повышению уровня безопасности поиска электрических неоднородностей окружными техническими службами мониторинга местности Вьетнама.

В качестве перспектив дальнейшей разработки темы можно отметить пути разработки и исследования методов обнаружения НО на основе применения сложных сигналов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Статьи в научных изданиях, входящих в перечень ВАК

1. Фам, Д.Х. Имитационная модель нелинейной радиотехнической системы и алгоритм обработки принимаемых сигналов при обнаружении нелинейных объектов / **Д.Х. Фам** // Электросвязь. – 2026. – № 3. – С. 20-30.
2. Фам Дык Хи. Модель нелинейной радиотехнической системы в свободном пространстве / **Фам Дык Хи**, Нгуен Ван Кыонг, А. В. Николаев [и др.] – DOI 10.34832/NIPR.2024.16.3.007. // Труды Научно-исследовательского института радио. – 2024. – № 3-4. – С. 72-80.
3. Фам, Д.Х. Сравнение методов определения угловых координат объектов в грунте с помощью нелинейной радиолокационной станции / **Д. Х. Фам**, В. К. Нгуен, А. В. Николаев, А. Ю. Волошин – DOI 10.18127/j5604128-202405-07. // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2024. – Т. 29, № 5. – С. 47-54.
4. Нгуен, В. К. Оценка характеристик обнаружения нелинейной радиолокационной станции безопасной машины / В. К. Нгуен, **Д. Х. Фам**, А. В. Николаев, А. Ю. Волошин. – DOI 10.18127/j5604128-20240. // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2024. – Т. 29, № 5. – С. 39-46.
5. Али Ахмад. Нейросетевая обработка изображений диаграмм направленности антенна в многонаправленных радиотехнических объектах / Али Ахмад, Николаев А.В., Прохоркин А.Г., Диаа Хасанн, **Фам Д.Хи.**, Нгуен В.К. – DOI 10.34832/NIPR.2024.16.3.006. // Труды Научно-исследовательского института радио. – 2024. – № 3-4. – С. 64-71.

Публикации в изданиях, индексируемых в РИНЦ

6. Фам, Д. Х. Радиоэлектронные средства военно-инженерной службы вьетнамской народной армии и перспектива их развития / **Д. Х. Фам**, Н. В. Кыонг, А. В. Николаев. // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – 2023. – № 1. – С. 74-79.
7. Нгуен, В. К. Радиодетектирование сигнала, рассеянного нелинейным объектом, для безопасных машин / В. К. Нгуен, **Д. Х. Фам**, А. В. Николаев. // XXXV Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС – 2023): Сб. трудов конф., Москва, 13-14 ноября 2023 г. – Москва: Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, 2023. – С. 363-370.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus

8. Nguyen, V. C. Detection of a radio signal scattered by a nonlinear object for vehicle safety / V. C. Nguyen, **D. H. Pham**, A. V. Nikolaev. – DOI 10.1063/5.0251915. // AIP Conference Proceedings. – 2025. – Vol. 3205. – Article 080003.

Патенты на изобретение

9. Старовойтов, Е. И. Способ и система определения антенных характеристик на измерительной площадке / Е. И. Старовойтов, А. В. Николаев, В. И. Руссанов, Д. М. Бодунов, М. А. Филин, М. В. Крюков, Н. С. Гончаров, А. В. Колесников, Н. Б. Федосова, А. Али, В. К. Нгуен, **Д. Х. Фам**. // Патент на изобретение №2804836 С1. Заявка № 2023112094 от 11.05.2023.
10. Николаев, А.В. Способ и система антенных измерений с использованием беспилотного привязного аэростата / А. В. Николаев, Е. И. Старовойтов, В. И. Руссанов, Д. М. Бодунов, М. А. Филин, М. В. Крюков, Н. С. Гончаров, А. В. Колесников, Н. Б. Федосова, А. Али, В. К. Нгуен, **Д. Х. Фам**, Д. Хасанн, А. Ю. Волошин. // Патент на изобретение № 2818996 С1. Заявка № 2023125399 от 08.05.2024.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025694845 Российская Федерация. Программа для исследования радиолиний с нелинейным объектом вторичного излучения / В. К. Нгуен, А. В. Николаев, **Д. Х. Фам**; заявитель и правообладатель МТУСИ. – № 2025694845; заявл. 24.11.2025; опубл. 08.12.2025. – 1 с.