

На правах рукописи

Нгуен Ван Кыонг

**ОБНАРУЖЕНИЕ СВЧ–СИГНАЛОВ, РАССЕЯННЫХ
КОРРОЗИОННО-РАЗРУШЕННЫМИ ОБЪЕКТАМИ, В УСЛОВИЯХ
ЛАНДШАФТНО–ПОЧВЕННЫХ ЗОН ВЬЕТНАМА**

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: **Ларцов Сергей Викторович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедр «Электроника и сети ЭВМ» и «Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов и газонефтехранилищ», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород
Матвеев Алексей Игоревич - кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории 111 НИО-1 Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений».

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Пульсар» (АО «НПП «Пульсар»)

Защита диссертации состоится 25 июня 2026 года в 13 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-NguenVanKyong/dis-NguenVanKyong.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. В последние годы многие страны активно занимаются разработкой и внедрением аппаратуры нелинейных радиотехнических систем (РТС) для мониторинга местности, дорожных покрытий, мостов, строений и инженерных сооружений. Эти системы предназначены для обнаружения и анализа сигналов, отраженных объектами с нелинейными электромагнитными свойствами, такими как коррозионно-разрушенные объекты (КРО). Для повышения безопасности мониторинга местности аппаратура встраивается в мобильные робототехнические комплексы (РТК).

В течение XX века Вьетнам пережил серию широкомасштабных военных конфликтов: колониальную войну против Франции (1946–1954 гг.), борьбу с японской оккупацией (1940–1945 гг.), длительную войну против США и их союзников (1955–1975 гг.), краткосрочную приграничную войну с Китайской Народной Республикой (1979 г.), а также продолжительное военное противостояние с режимом Красных кхмеров в Камбодже (1978–1989 гг.). Эти события привели к накоплению значительного количества небезопасных объектов, основную массу которых составляют КРО сферической, цилиндрической и прямоугольной формы. Наличие таких объектов значительно осложняет деятельность технических служб, осуществляющих мониторинг ландшафтно-почвенных зон Вьетнама, поскольку традиционно применяемые методы локализации КРО с использованием электромагнитной аппаратуры для обнаружения металлических объектов становятся недостаточно эффективными. Изменение размеров и формы конструкций КРО вызывает деформацию, что усложняет процесс обработки электрических сигналов, регистрируемых приемником в процессе взаимодействия электромагнитных колебаний (ЭМК) с деформированной поверхностью.

По данным технических служб мониторинга (Источник: VNMAC, 2024), большинство КРО имеют металлические оболочки, покрытые оксидными слоями, и характеризуются наличием множества мелких контактов вида «металл–оксид–металл» (МОМ). Технически, такие объекты являются слабо контрастными электрическими неоднородностями с кубической вольтамперной характеристикой (ВАХ), часто проявляющими ярко выраженные нелинейные свойства при взаимодействии с СВЧ-полем в ближней зоне антенн нелинейной РТС.

Существующие подходы к описанию принципа работы нелинейных РТС преимущественно основываются на применении моделей обнаружения слабоконтрастных электрических неоднородностей с квадратичной ВАХ в радиолиниях второго рода путем решения уравнений классической электросвязи. Между тем, модели обнаружения аналогичных неоднородностей с кубической ВАХ в тех же условиях остаются недостаточно исследованными и детально не изложены в современной научной литературе, основанной на традиционных методах описания процессов передачи СВЧ-сигналов. Кроме того, существующие модели требуют учета дополнительных потерь при передаче СВЧ-сигнала через различные среды распространения, поскольку в них зачастую недооцениваются влияние интерференционных явлений, поверхностных и поляризационных эффектов, негативно сказывающихся на качестве обработки второй и третьей гармоник сигнала.

В связи с этим актуальной является разработка усовершенствованной модели слабоконтрастной электрической неоднородности с кубической ВАХ, методов расчета дальности ее обнаружения на третьей гармонике с учетом основных и дополнительных потерь передачи СВЧ-сигнала вдоль поверхности земли в типичных ландшафтно-почвенных зонах Вьетнама, а также установление закономерностей, определяющих устойчивую локализацию КРО в грунтах. Не менее важной задачей является обоснование импульсного зондирования в нелинейной РТС

мониторинга местности, разработка схем управления облучением и экспериментальная верификация моделей на основе сопоставления численных и измеренных характеристик эффективной площади рассеяния (ЭПР) КРО различной формы. Решение указанных практических задач создаст научную основу проектирования нелинейных РТС мониторинга местности для мобильных РТК и обладает высокой научно-технической и социально-экономической значимостью для Вьетнама.

Степень разработанности темы исследования. Исследованию процессов нелинейного рассеяния радиоволн и созданию нелинейных РТС посвящен значительный круг работ российских и зарубежных авторов. Сформированы базовые представления о механизмах возникновения гармоник в объектах с нелинейной ВАХ, предложены модели нелинейных рассеивателей и методы расчета энергетических параметров радиолиний, преимущественно для систем, работающих по второй гармонике. Основы теории нелинейных РТС для связи и обнаружения были заложены в трудах российских ученых В.Б. Штейншлейгера, А.С. Кузнецова, С.Н. Разинькова, Г.Н. Щербакова, А.А. Горбачёва и др. Важный вклад в развитие математических моделей и методов учета свойств среды распространения радиосигналов и конструктивных особенностей НО внесли работы С.В. Ларцова, Н.Ю. Бабанова, Д.В. Семенихиной, А.В. Николаева, А.И. Панычева и др. Среди зарубежных исследований следует отметить труды R.O. Harger, G.J. Mazzaro, K.A. Gallagher, T.J. Pierson, Duong Duc Thien и их соавторов.

Вместе с тем ряд ключевых вопросов остается недостаточно изученным. В существующих работах отсутствует уравнения электросвязи, описывающие радиолинии второго рода на частоте третьей гармоники, для обнаружения слабоконтрастных электрических неоднородностей с кубической ВАХ в укрывающих средах (грунт, растительность). Практически не проработаны технические решения, ориентированные на интеграцию нелинейных РТС, работающих по третьей гармонике, в мобильные РТК, а также переход на импульсный режим зондирования местности.

Таким образом, теория нелинейного рассеяния радиоволн и методики проектирования аппаратуры нелинейных РТС, основанных на обработке сигналов второй гармонике, уже получили широкое распространение и детализированное изучение. Вместе с тем, разработка подходов к описанию радиолинии второго рода на частоте третьей гармоники применительно к обнаружению слабоконтрастных электрических неоднородностей с кубической ВАХ не получила достаточного освещения в научной литературе.

Цель работы. Разработать усовершенствованный метод расчета дальности обнаружения слабоконтрастных электрических неоднородностей радиоприемным устройством на частоте третьей гармоники, учитывающий коэффициент заполнения импульсов и угол наклона ЭМК в нелинейной РТС для повышения отношения сигнал-шум и уменьшения потерь передачи СВЧ-сигнала вдоль поверхности Земли в типичных ландшафтно-почвенных зонах Вьетнама.

Для достижения цели работы поставлены **научные задачи**:

- усовершенствовать математическую модель слабоконтрастной электрической неоднородности с кубической ВАХ и разработать метод расчета дальности радиообнаружения на частоте третьей гармоники, учитывающий потери СВЧ-сигнала при его распространении через растительность и отражении от грунта с различной степенью влажности;

- исследовать влияние коэффициента заполнения импульсного радиосигнала на распределение плотности потока мощности СВЧ-излучения при различных углах визирования КРО с кубической ВАХ и разработать практические рекомендации по повышению однородности СВЧ-поля излучения нелинейной РТС;

- исследовать влияние эффективного возбуждения поверхностной радиоволны на интегральный коэффициент передачи СВЧ-сигнала в нелинейной РТС мониторинга местности при

обнаружении слабоконтрастных электрических неоднородностей, укрытых растительным слоем и грунтом, и выявить зависимость этого коэффициента от угла поляризации ЭМК и насыщенности водой грунта на дистанциях, характерных для нелинейной РТС;

- выполнить экспериментальные исследования, направленные на изучение закономерностей рассеяния СВЧ-сигнала КРО с сферической, цилиндрической и прямоугольной формами металлических оболочек, а также выявление количественных зависимостей интенсивности рассеянного сигнала на третьей гармонике от угла падения радиоволны и формы поверхности исследуемого КРО.

Решение поставленных научных задач позволит установить фундаментальную связь между основными техническими характеристиками нелинейной РТС, условиями распространения радиоволн и электрическими характеристиками грунтов Вьетнама. Полученные результаты позволят усовершенствовать методы радиообнаружения слабоконтрастных электрических неоднородностей с кубической ВАХ, провести инженерные расчеты технических параметров нелинейных РТС применительно к мобильным РТК, а также обеспечить повышение уровня безопасности выявления потенциально опасных КРО техническими службами мониторинга ландшафтно-почвенных зон Вьетнама.

Объектом исследования выступает слабоконтрастная электрическая неоднородность с кубической ВАХ, представленная в виде множества мелких контактов вида МОМ, создающих эффект вторичного радиоизлучения.

Предметом исследования является процесс обнаружения третьей гармоники, возникающей при рассеянии радиоволн на поверхности из множества мелких контактов вида МОМ, а также анализ энергетических и пространственных характеристик создаваемого такой поверхностью радиоизлучения.

Методология и методы исследования. В работе использованы методы математического и компьютерного моделирования, а также сравнительный анализ результатов моделирования с экспериментальными данными. Теоретические зависимости для радиолинии второго рода и нелинейного рассеяния на третьей гармонике выводились аналитически и проверялись с помощью компьютерного моделирования и измерений амплитуды гармонических откликов, соотнесенных с ЭПР КРО различной формы.

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

1. Разработана и обоснована усовершенствованная модель слабоконтрастной электрической неоднородности с кубической ВАХ и предложены методы расчета дальности ее радиообнаружения на третьей гармонике монохроматического СВЧ-сигнала, учитывающие как основные, так и дополнительные потери передачи радиосигнала при прохождении сквозь растительность и вдоль поверхности грунта.

2. Теоретически установлена ранее не описанная зависимость интегрального коэффициента передачи СВЧ-сигнала в нелинейной РТС обнаружения слабоконтрастных электрических неоднородностей, укрытых поверхностным слоем растительности и обладающих кубической ВАХ, от эффективности возбуждения поверхностной радиоволны; показано, что оптимальный диапазон углов поляризации радиоволн $\theta_p = 15-20^\circ$ обеспечивает надежное выявление неоднородностей на дистанциях 5–20 м вне зависимости от степени насыщенности грунта влагой.

3. Теоретически доказано энергетическое преимущество импульсного режима работы нелинейной РТС с переменным коэффициентом заполнения $D(i) \in [0,001; 0,1]$: показано, что такой режим позволяет увеличить отношение «сигнал–шум» на входе радиоприемного устройства примерно на 10 дБ, а регулирование длительности радиоимпульсов обеспечивает формирование практически равномерной плотности потока мощности СВЧ-сигнала на поверхности грунта при

различных углах падения радиоволны, что существенно повышает эффективность дистанционного мониторинга типичных ландшафтно-почвенных зон Вьетнама.

4. Экспериментально получена количественная зависимость интенсивности рассеяния третьей гармоники монохроматического СВЧ-сигнала от угла падения радиоволны и геометрии КРО, металлическая оболочка которого равномерно покрыта локальными электрическими неоднородностями с кубической ВАХ; показано, что значения коэффициента нелинейного рассеяния КРО лежат в диапазоне 10^{-10} – 10^{-12} м⁶/Вт², что обеспечивает надежное обнаружение таких неоднородностей на расстояниях от 5 до 20 м.

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 нелинейных РТС.

Теоретическая значимость работы диссертационной работы определяется рядом оригинальных результатов в области теории нелинейного рассеяния радиоволн на объектах с кубической ВАХ и подходов к моделированию электромагнитных полей и волн (ЭМПив) в нелинейных РТС, а именно:

- разработка и обоснование математических моделей, описывающих нелинейное рассеяние радиоволн КРО различной формы, металлическая оболочка которого равномерно покрыта локальными электрическими неоднородностями с кубической ВАХ;

- выявление и количественное описание закономерностей влияния параметров поляризации и импульсного режима зондирования на энергетические характеристики нелинейной РТС и отношение «сигнал–шум», в том числе обоснованием энергетического преимущества импульсного режима для работы бортовой нелинейной РТС мобильного РТК на третьей гармонике.

Практическая значимость. работы заключается в следующем:

- разработаны рекомендации по созданию нелинейных РТС мониторинга местности для мобильных РТК, позволяющих осуществлять дистанционное обнаружение и угловую локализацию слабоконтрастных электрических неоднородностей с кубической ВАХ по СВЧ-сигналу на третьей гармонике;

- получены инженерные расчетные формулы для радиолинии второго рода на частоте третьей гармоники, необходимые для оценки дальности обнаружения, энергетического потенциала системы и оптимизации параметров импульсного режима и поляризации СВЧ-сигнала, излучаемого нелинейной РТС с борта мобильного РТК;

- создана математическая модель радиолинии второго рода на частоте третьей гармоники, реализованная в компьютерной программе «Программа для исследования радиолиний с нелинейным объектом вторичного излучения»;

- научные разработки внедрены в учебный процесс кафедры «Техническая электродинамика и антенны» для изучения механизмов распространения радиоволн вдоль земной поверхности в рамках учебной дисциплины «Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства» студентами бакалавриата по направлению 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, 2025 г.

5. Научно-технической конференции «Радиозондирование на Земле и в космосе» (РЗК-2025), г. Москва, Россия, 2025 г.

Публикации. По теме диссертации было опубликовано 12 работ. Из них 6 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 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 131 странице машинописного текста, содержит 39 рисунков и 2 таблицы; список литературы состоит из 71 наименования.

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 кубической ВАХ и методы расчета дальности ее радиобнаружения на третьей гармонике излучаемого монохроматического СВЧ сигнала учитывают основные и дополнительные потери передачи при прохождении сигнала сквозь растительность, вдоль влажной и сухой поверхности грунта.
2. Установленная зависимость интегрального коэффициента передачи СВЧ сигнала в нелинейной РТС обнаружения КРО, укрытого растительностью и находящегося на поверхности грунта, от эффективности возбуждения поверхностной радиоволны показывает, что при углах эллиптической поляризации радиоволн $\theta_p = 15-20^\circ$ обеспечивается надежное выявление КРО на дистанциях до 20 м вне зависимости от того, влажная или сухая почва.
3. Обоснован импульсный режим работы в нелинейной РТС с переменным коэффициентом заполнения $D(i) \in [0,001; 0,1]$ при котором отношение «сигнал–шум» на входе радиоприемного устройства увеличивается примерно на 10 дБ. Регулируя длительность радиоимпульсов, удастся добиться равномерной плотности потока мощности СВЧ-сигнала на поверхности грунта при различных углах наклона антенны.
4. Экспериментально установлена количественная зависимость интенсивности рассеяния третьей гармоники монохроматического СВЧ-сигнала от угла падения радиоволны и геометрических характеристик исследуемых КРО сферической, цилиндрической и прямоугольной формы, поверхность которого состоит из множества мелких контактов вида МОМ. Установленные значения коэффициента нелинейного рассеяния находятся в

диапазоне 10^{-10} – 10^{-12} м⁶/Вт², что обеспечивает надежное обнаружение рукотворных объектов на расстояниях до 20 м.

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 небезопасных объектов, накопившихся в течение десятилетий военных конфликтов XX века на территории Вьетнама, а также задач комплексной очистки ландшафтно-почвенных зон от них. Отмечено, что значительная часть таких объектов представлена КРО сферической, цилиндрической и прямоугольной формы. Они сохраняют поражающие свойства и представляют серьезную угрозу жизни и здоровью населения Вьетнама, ограничивая использование земельных и природных ресурсов, замедляя развитие инфраструктуры и негативно влияя на международный туризм. Согласно данным Национальной программы по ликвидации последствий войны свм минами и боеприпасами (VNMAC), по состоянию на 2024 г. около 5,6 миллиона гектаров территории Вьетнама остаются загрязненными небезопасными объектами, пространственное распределение которых по ключевым провинциям республики приведено на рис. 1.

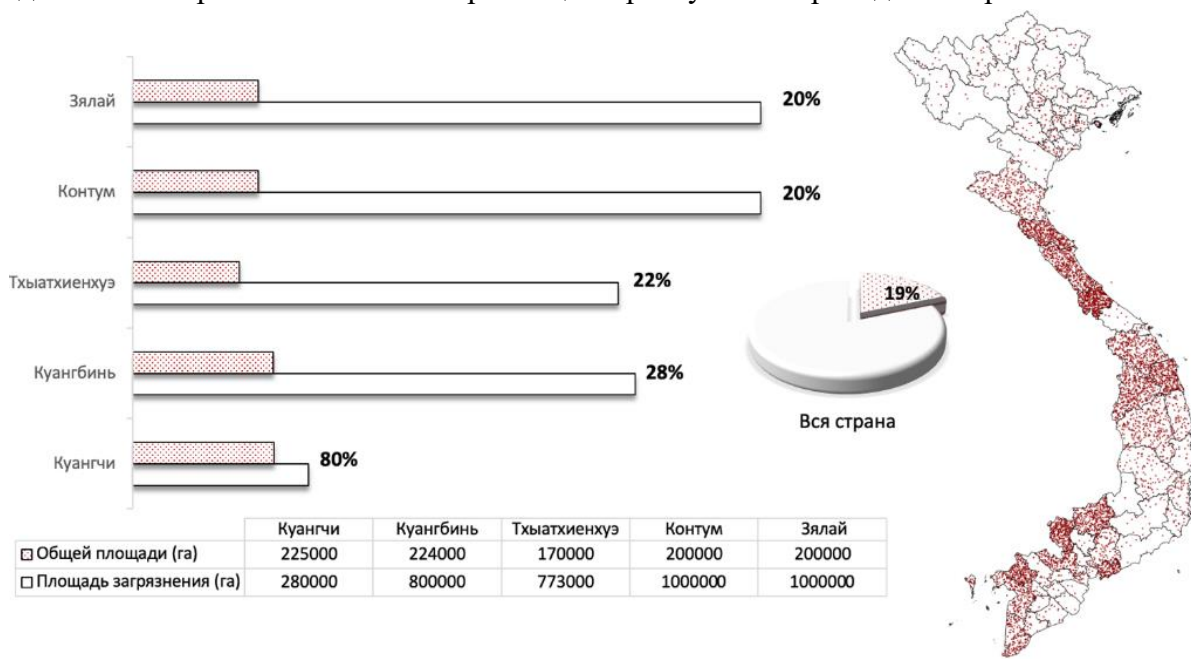


Рисунок 1 – Общая доля и соотношения неочищенной площади республики и ключевых провинций Вьетнама (источник: VNMAC, 2024)

Показано, что для большинства КРО характерно равномерное покрытие поверхности мелкими электрическими неоднородностями с кубической ВАХ, представленными многочисленными контактами типа МОМ. Такая конфигурация формирует массив нелинейных элементов с кубической ВАХ, которые при облучении СВЧ-полем радиопередающего оборудования обеспечивают заметный гармонический отклик, главным образом на третьей гармонике. Образованные таким образом контактные элементы формируют массив нелинейных компонентов с кубической ВАХ, которые при облучении СВЧ-полем вызывают выраженный гармонический отклик, преимущественно на третьей гармонике.

Для детального исследования влияния геометрической формы КРО на интенсивность рассеяния третьей гармонике были выделены три эталонные группы объектов: сферической

(ИО-С), цилиндрической (ИО-Ц) и прямоугольной (ИО-П) формы, соответствующие наиболее распространенным конфигурациям небезопасных объектов во Вьетнаме. Эти группы служат основой для дальнейшего анализа качества обработки третьей гармоники СВЧ-сигнала при обнаружении электрических неоднородностей с кубической ВАХ.

Во втором разделе диссертации предложена математическая модель радиолинии второго рода на частоте третьей гармоники. Модель детально описывает процесс нелинейного рассеяния радиоволн при взаимодействии СВЧ-поля радиопередающего оборудования с предметом, поверхность которого имеет многочисленные контакты типа МОМ, в ближней зоне. Исследуется постепенный переход от анализа локальных нелинейных эффектов в структурах типа МОМ к формированию радиолинии второго рода, раскрывающей принцип работы нелинейной РТС на частоте третьей гармоники. Итогом научного исследования стали инженерные формулы, позволяющие оценить дальность действия и технические характеристики нелинейной РТС при распространении радиоволн СВЧ-диапазона над влажным грунтом.

В первой части раздела рассматриваются физические основы использования эффекта нелинейного рассеяния радиоволн объектами, содержащими полупроводниковые структуры с р-п-переходами и металлические соединения типа МОМ. Путем полиномиальной аппроксимации ВАХ данных переходов и контактов с использованием ряда Тейлора строится модель локального нелинейного рассеивателя СВЧ-сигнала. В данной модели выходной электрический ток выражается в виде суммы монохроматических радиосигналов, пропорциональных частотам $2f_0$, $3f_0$, ..., nf_0 , при гармоническом возбуждении нелинейного рассеивателя на частоте f_0 (см. рис. 2).

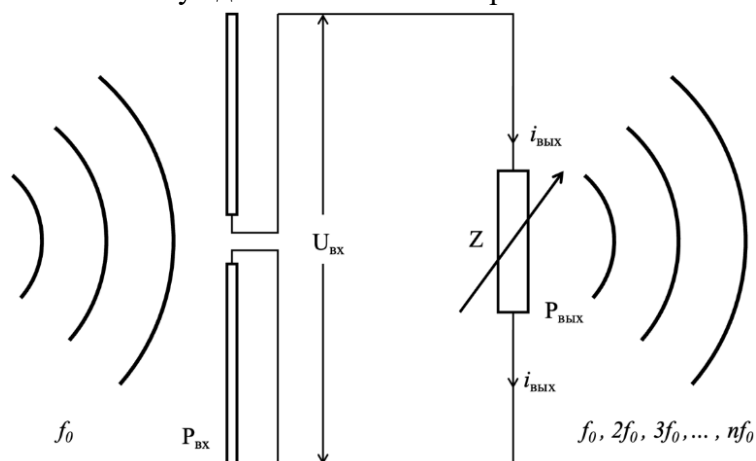


Рисунок 2 – Эквивалентная схема нелинейного рассеивателя

Для описания данного явления в диссертации применяется базовая математическая модель, в которой выходной ток локального нелинейного элемента при действии приложенного напряжения $U_{\text{вх}}(t)$ представляется в виде:

$$i_{\text{вых}} = a_0 + a_1 U_0 \cos(2\pi f_0 t) + \frac{1}{2} a_2 U_0^2 \cos(4\pi f_0 t) + \frac{1}{4} a_3 U_0^3 \cos(6\pi f_0 t) + \dots + \frac{1}{2^{n-1}} a_n U_0^n \cos(2n\pi f_0 t), \quad (1)$$

где a_0, a_1, \dots, a_n – коэффициенты аппроксимации полинома

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

Формула (1) позволяет перейти от величин напряжения и силы тока к расчету мощности отдельных составляющих сигнала в ближней зоне антенны радиопередающего оборудования. Средняя мощность синусоидального сигнала на активной нагрузке Z определена выражением $P_{\text{вх}} = U_0^2 / Z$. Учитывая, что каждая гармоническая составляющая связана с соответствующей мощностью, вводится коэффициент нелинейного преобразования

$$\gamma_n = \left(\frac{1}{2^{n-1}} a_n \right)^2 Z^{n+1}.$$

Этот коэффициент характеризует отношение мощности переизлученного радиосигнала на n -й гармонике к мощности падающего на нелинейный элемент СВЧ-сигнала

$$P_{\text{вых}_n} = \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n P_{\text{вх}}^n, \quad (2)$$

где $P_{\text{вх}}$ – мощность СВЧ-сигнала, падающего на локальный нелинейный элемент, Вт; $P_{\text{вых}_n}$ – мощность излучения на частоте $n f_0$, Вт.

Выражение (2) играет ключевую роль в модели нелинейного рассеивателя для радиолинии второго рода, где вводится понятие ЭПР σ_n на n -й гармонике. Параметр устанавливает взаимосвязь между плотностью потока мощности падающей радиоволны в месте нахождения КРО и мощностью, переизлученной в сторону приемной антенны на частоте $n f_0$. Учет этого параметра совместно с коэффициентами усиления передающей и приемной антенн позволил вывести выражение для плотности потока мощности на входе приемной антенны нелинейной РТС:

$$P_{\text{прм}}(\lambda_n) = \frac{P_{\text{пер}}(\lambda_0)}{4\pi R^2} \sigma_n, \quad (3)$$

где $P_{\text{пер}}(\lambda_0)$ – плотность потока мощности СВЧ-сигнала, излучаемого нелинейной РТС, Вт/м²; λ_0 – длина волны излучаемого СВЧ-сигнала, м; λ_n – длина волны СВЧ-сигнала, переизлучаемого на частоте гармоники n -порядка, м.

Предположим, что входная мощность $P_{\text{вх}}$, попадающая на локальный нелинейный элемент, преобразуется им и излучается обратно в пространство в виде выходной мощности $P_{\text{вых}}$ на частоте гармоники n -порядка. Тогда мощность на входе нелинейного элемента (рассеивателя) можно выразить следующим образом:

$$P_{\text{вх}} = \frac{G_{\text{НО}} \lambda_0^2 P_{\text{пер}}(\lambda_0)}{4\pi}, \quad (4)$$

где $G_{\text{НО}}$ – коэффициент усиления СВЧ-сигнала на основной частоте гармоники.

После преобразования радиосигнала локальными нелинейными элементами, плотность потока мощности радиосигнала в пункте приема на частоте гармоники n -порядка определяется выражением:

$$P_{\text{прм}}(\lambda_n) = \frac{P_{\text{вых}_n} G_{\text{НО}}^{(n)}}{4\pi R^2}, \quad (5)$$

где $G_{\text{НО}}^{(n)}$ – коэффициент усиления СВЧ-сигнала на частоте гармоники n -порядка.

Допустим, что форма металлической оболочки КРО не сильно повлияет на коэффициенты усиления, то $G_{\text{НО}}^{(n)} \approx G_{\text{НО}}$, а из выражения (2), (3), (4) и (5) получим:

$$\frac{P_{\text{прм}}(\lambda_n)}{P_{\text{пер}}(\lambda_0)} 4\pi R^2 = \gamma_n G_{\text{НО}}^{n+1} \left(\frac{\lambda_0^2}{4\pi} \right)^n P_{\text{пер}}^{n-1}(\lambda_0). \quad (6)$$

С учетом уравнений (3) и (6), выражение для определения ЭПР на частоте гармоники n -го порядка, примет вид:

$$\sigma_n = \sigma_{k,n} P_{\text{пер}}^{n-1}(\lambda_0), \quad (7)$$

где $\sigma_{k,n} = \left\{ n = 2 \text{ или } 3 : \sigma_k \left[\text{м}^{2n} \text{Вт}^{1-n} \right] \right\} = \gamma_n G_{\text{НО}}^{n+1} \left(\lambda_0^2 / 4\pi \right)^n$.

В первой части формулы (7) присутствует коэффициент нелинейного рассеяния объекта (КНРО). Этот коэффициент играет первую важную роль, поскольку он количественно описывает рассеивающие свойства КРО в радиолинии второго рода на частоте n -й гармоники. Коэффициент отражает влияние КРО на вторичное СВЧ-поле в области раскрыва приемной антенны нелинейной РТС. Параллельно учитывается ЭПР n -го порядка, которая определяет интенсивность отклика КРО на излучаемый нелинейной РТС СВЧ-сигнал с частотой f_0 . Следует отметить, что при таком подходе размерность ЭПР на n -ой гармонике, как и у площади м^2 , а у КНРО $\text{м}^{2n}\text{Вт}^{1-n}$. Далее в радиолинии второго рода вместо классической ЭПР используется КНРО, что упрощает алгоритмизацию процессов вторичной обработки радиосигналов, порождаемых нелинейными явлениями.

Полученные уравнения имеют ясный физический смысл и удобны при инженерных расчетах запаса радиолинии в нелинейной РТС для свободного пространства. Однако они не учитывают особенности распространения радиоволн через различные среды, включая почву и растительность. Для задач мониторинга ландшафтно-почвенных зон Вьетнама, где важны поверхностные волны, многократные отражения и поглощение радиоволн средой, такая степень идеализации недостаточна. Учет только основных факторов упускает важные интерференционные, поверхностные и поляризационные эффекты, влияющие на качество обработки второй и третьей гармоник сигнала. Поэтому во второй части раздела вводится обобщенное уравнение, учитывающее основные факторы передачи и приема нелинейного сигнала в радиолинии 2-ого рода:

$$R = \left[\frac{1}{(4\pi)^{2n+2} n^2} \frac{P_{\text{пер}}^n(\lambda_0)}{P_{\text{прм}}(\lambda_n)} G_{\text{прм}} G_{\text{пер}}^n \sigma_{k,n} \lambda_0^2 |F_{\text{пер}}(\lambda_0)|^{2n} |F_{\text{прм}}(\lambda_n)|^2 \right]^{\frac{1}{2n+2}}, \quad (8)$$

где $P_{\text{пер}}(\lambda_0)$ и $P_{\text{прм}}(\lambda_n)$ – соответственно входная и выходная мощности сигнала нелинейной РТС, Вт; $F_{\text{пер}}(\lambda_0)$ и $F_{\text{прм}}(\lambda_n)$ – амплитудные диаграммы направленности передающей и приемной антенн нелинейной РТС объединяются в интегральный коэффициент передачи сигнала $F = |F_{\text{пер}}(\lambda_0)|^{2n} |F_{\text{прм}}(\lambda_n)|^2$.

Для удобства анализа влияния данных эффектов на эффективность работы нелинейной РТС установлены исходные данные для численного моделирования канала радиобнаружения (см. рис. 3, 4, 5). Основные исходные данные: $P_{\text{пер}}=30\div 500$ Вт, $\lambda_0=0,03\div 0,06$ м, $G_{\text{пер}} = 20$ дБ, $G_{\text{прм}} = 15$ дБ, $P_{\text{прм}}=10^{-15}$ Вт, КНРО на третьей гармонике ($n=3$) – $\sigma_k=10^{-12}\div 10^{-10}$ $\text{м}^6/\text{Вт}^2$; КНРО на 2-й гармонике ($n=2$) – $\sigma_k=10^{-9}\div 10^{-7}$ $\text{м}^4/\text{Вт}$. Влияние условий распространения сигнала моделировалось с помощью коэффициента F , учитывающий интерференционные, поверхностные и поляризационные эффекты.

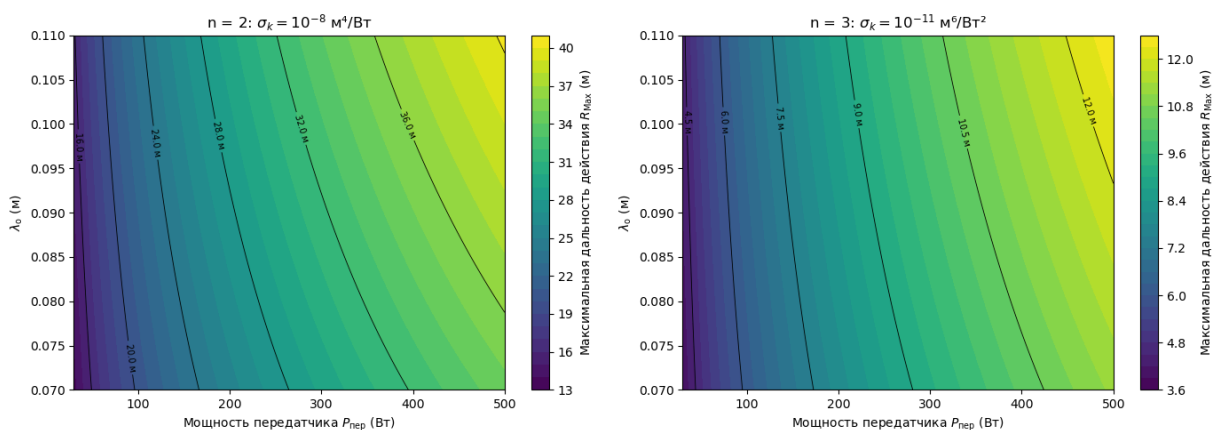


Рисунок 3 – Влияние мощности передатчика и длины волны на максимальную дальность действия РТС при различных порядках нелинейности

Анализируя результаты, можно констатировать, что вторая гармоника ($n = 2$) в нелинейной РТС отличается высоким энергетическим потенциалом: при увеличении мощности передатчика, длины волны, КНРО и интегрального коэффициента передачи СВЧ-сигнала дальность обнаружения достигает порядка 40 м, что полностью соответствует как теоретическим оценкам, так и реальным характеристикам нелинейной РТС, работающей на второй гармонике.

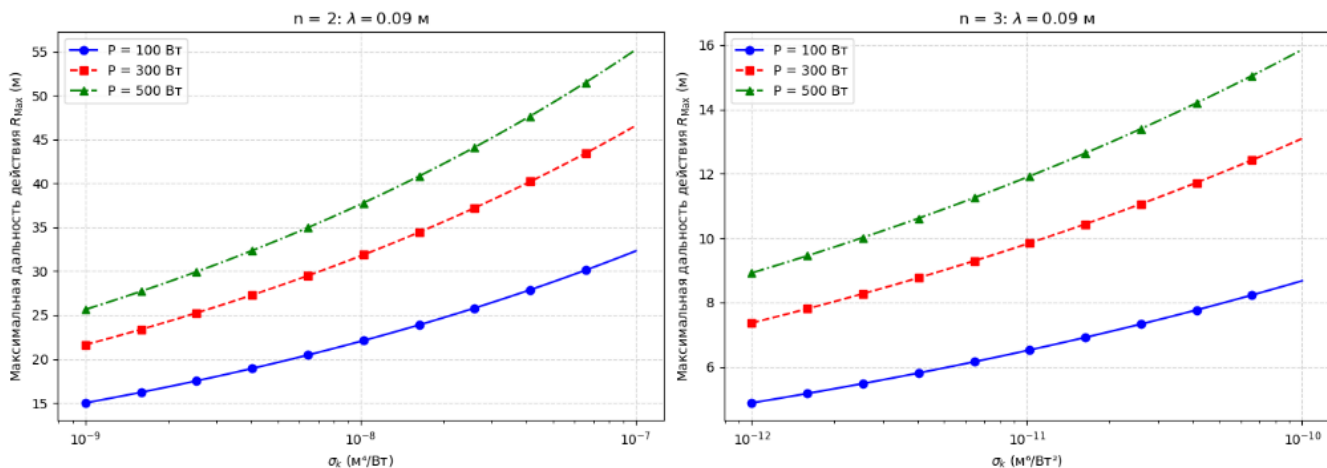


Рисунок 4 – Влияние КНРО на максимальную дальность действия РТС при различных порядках нелинейности ($\lambda_0 = 0,09$ м, $F = 7$)

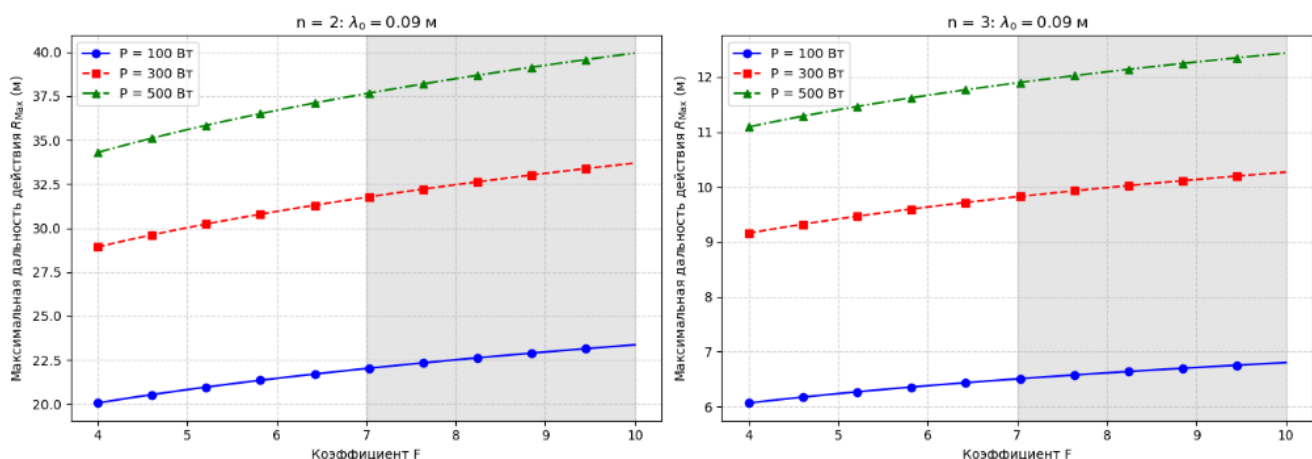


Рисунок 5 – Влияние интегрального коэффициента передачи СВЧ-сигнала на максимальную дальность действия РТС при различных порядках нелинейности

Третий порядок нелинейности (при $n=3$) имеет особое значение для достижения поставленных целей исследования, несмотря на ограниченную дальность обнаружения (3–15 м). Применение нелинейной РТС именно на третьей гармонике заметно увеличивает избирательность при мониторинге местности на наличие КРО, одновременно снижая вероятность ложных тревог, обусловленных отражениями СВЧ-сигнала от местных предметов. Качество радиообнаружения зависит от совокупности факторов: геометрия облучения и взаимное расположение приемных и передающих антенн; угол наклона и положение антенн РТС относительно земной поверхности; особенности взаимодействия радиоволн с поверхностью почвы и растительным покровом; ориентация КРО относительно направления прихода радиоизлучения. Максимальное расстояние обнаружения может находиться вблизи нижнего предела диапазона (3–7 м) либо достигать верхнего порога (10–15 м и выше), в зависимости от параметра $F=7\div 10$ (см. рис. 5).

В условиях работы бортовой нелинейной РТС на специальном транспортном средстве, где антенны располагаются на высотах порядка 0,5–2 м, а КРО находятся в приповерхностном слое земли, вклад поверхностной радиоволны становится принципиальным. В этих условиях параметр F является ключевым так как определяет условия передачи СВЧ-сигнала в радиолинии второго рода.

С целью описания механизма распространения СВЧ-сигнала вблизи земной поверхности в третьей части второго раздела применяется модель Зоммерфельда–Нортон, согласно которой суммарное поле представлено суммой пространственной и поверхностной радиоволн. При условии $h_2 \ll h_1 \ll R$, (где h_2 высота объекта над землей, h_1 – высота антенны, R – горизонтальное расстояние до ИО) можно вывести приближенное выражение для коэффициента $F_{\text{пер}}$ в виде:

$$F_{\text{пер}} \approx \frac{4\pi h_{1e} h_{2e}}{\lambda R} 10^{-0.05 \alpha_f \frac{h_f + h_2}{h_1 + h_2} \sqrt{R^2 + (h_1 + h_2)^2}}, \quad (9)$$

где коэффициент ослабления падающей радиоволны α_f зависит от угла эллиптической поляризации θ_p и частоты: $\alpha_f = \left(\sin^2 \theta_p + 2 \cos^2 \theta_p \right) \left(0,1 + 0,2 \log_{10} \frac{3 \cdot 10^{12}}{\lambda} \right)$. В нелинейной РТС, отраженная радиоволна имеет частоту, кратную падающей, т.е. nf . В нашем случае вводятся коэффициент ослабления нелинейной гармоники $\alpha_{nf} = \left(\sin^2 \theta_p + 2 \cos^2 \theta_p \right) \left(0,1 + 0,2 \log_{10} \frac{3n \cdot 10^{12}}{\lambda} \right)$ и эффективные высоты h_{1e} и h_{2e} , учитывающие электрические свойства земной поверхности. С учетом этого интегральный коэффициент передачи СВЧ-сигнала принимает вид:

$$F \approx \left(\frac{4\pi h_{1e/\text{пер}} h_{2e/\text{пер}}}{\lambda R} \right)^{2n} \left(\frac{4n\pi h_{1e/\text{прм}} h_{2e/\text{прм}}}{\lambda R} \right)^2 10^{\frac{-\sqrt{R^2 + (h_1 + h_2)^2}}{10(h_1 + h_2)} (n(h_f + h_2)\alpha_f + (h_f + h_2)\alpha_{fn})}, \quad (10)$$

где $h_{1e/\text{пер}}$, $h_{2e/\text{пер}}$ – эффективные высоты для излучаемого СВЧ-сигнала нелинейной РТС, м; $h_{1e/\text{прм}}$, $h_{2e/\text{прм}}$ – эффективные высоты для принимаемого СВЧ-сигнала на частоте n -ой гармоники, м.

Для численного моделирования приняты следующие исходные данные: $\lambda_0 = 0,09$ м; $h_1 = 1,5$ м; $h_2 = 0 - 0,3$ м; $h_f = 0,2 - 0,5$ м. Рассматриваемые тип почвы: влажный грунт ($\epsilon=30$; $\sigma=0,2$), сухой грунт ($\epsilon=4$; $\sigma=0,001$). Результаты численных расчетов представлены на рис. 6.

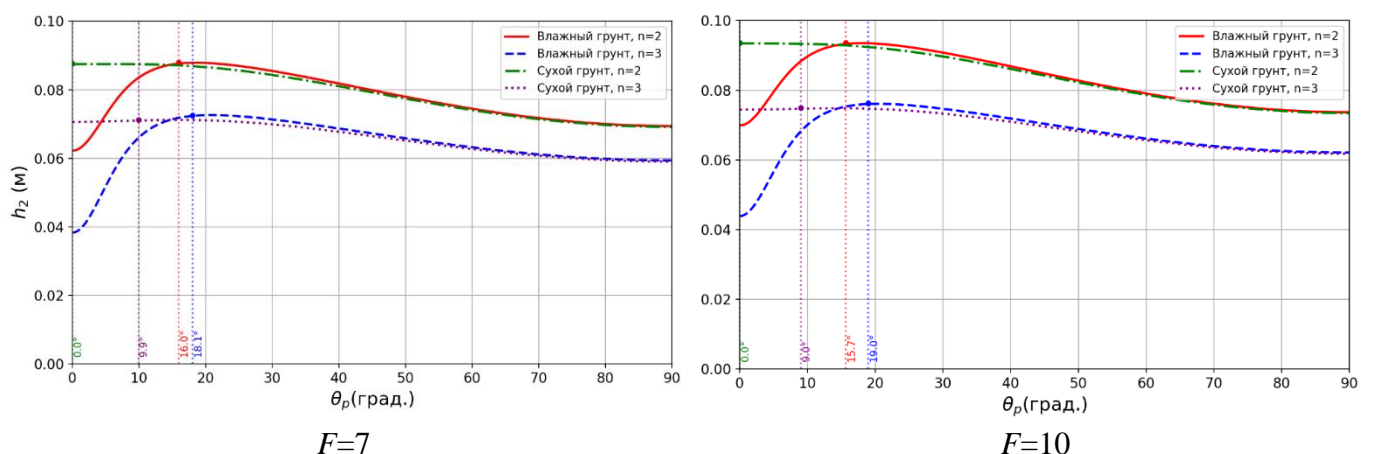


Рисунок 6 – Зависимость угла эллиптической поляризации θ_p от высоты ИО h_2 , типа почвы и коэффициента F

Проведенный анализ выявил закономерность: при уменьшении высоты расположения ИО, особенно в непосредственной близости от границы разных сред распространения, резко возрастает чувствительность интегрального коэффициента передачи СВЧ-сигнала F к двум факторам: углам

эллиптической поляризации и уровню влажности почвы. Стоит отметить стабильность изменений параметра F в диапазоне малых углов поляризации от 0 до 20 град., при которых основную роль играет вертикальная составляющая поля падающей радиоволны.

Кроме того, проведен анализ положения линии уровня $F=7$ в плоскости (h_2 , h_f) при различных дальностях до ИО $R=5, 10, 15$ м и углах поляризации $\theta_p=0, 10, 15, 20$ град, который представлен на рис. 7.

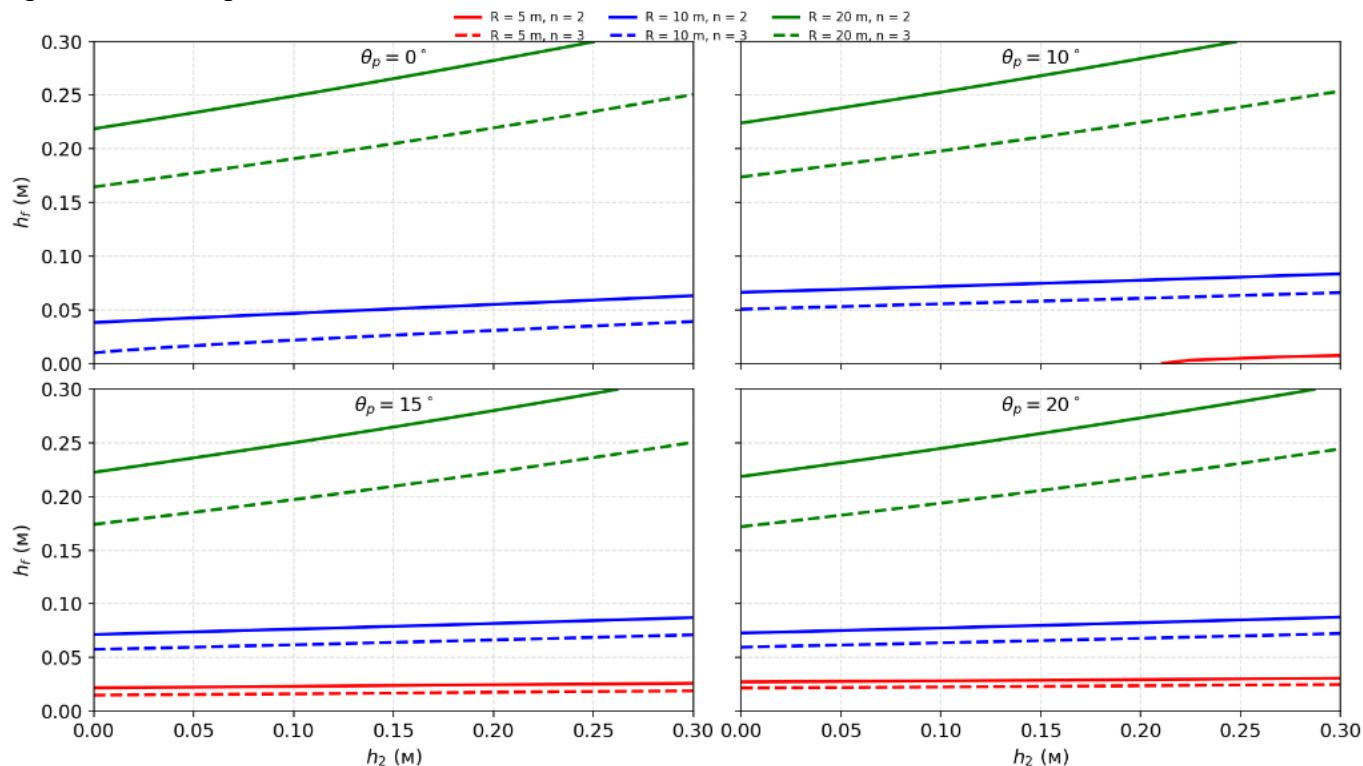


Рисунок 7 – Зависимость положения линии уровня $F=7$ от угла поляризации θ_p , расстояния до ИО R , толщины растительного покрова h_f и высоты объекта h_2

Анализ показывает, что при малых углах поляризации до 10 град. наблюдается ухудшение качества приема сигнала на расстояниях до 5 м, особенно заметное для третьей гармоники. Причина этого эффекта кроется в усиленном ослаблении сигнала растениями, характерном для вертикальной поляризации. Заметно иное поведение при увеличении угла поляризации до 15 град. На дистанции от 5 до 20 м. формируются устойчивые зоны, где показатель F достигает стабильного значения 7 для двух гармоник. Это свидетельствует о формировании эффективных поверхностных радиоволн и установлении оптимального компромисса между влиянием вертикальной составляющей поля падающей радиоволны и чувствительностью нелинейной РТС к произвольному положению ИО. Вместе с тем, при дальнейшем удалении ИО нелинейная РТС проявляет умеренное снижение своей эффективности, причем эта тенденция наиболее ярко выражена для второй гармоники.

Таким образом, интегральный коэффициент передачи СВЧ-сигнала F , определяющий дальность действия и надежность работы нелинейной РТС мониторинга местности при приеме третьей гармоники, играет *вторую важную роль*. Оптимальный диапазон углов эллиптической поляризации для мобильного варианта лежит в пределах $\theta_p \approx 15-20$ град. При таких углах и высотах установки антенн ($h_1=1,5-2$ м) обеспечивается сочетание эффективного возбуждения поверхностных волн и устойчивости к произвольной ориентации ИО, а отклик на третьей гармонике демонстрирует минимальную чувствительность к вариациям состояния грунта. Эти

выводы далее используются при выборе параметров излучаемого сигнала на частоте f_0 и конфигурации антенной системы нелинейной РТС мониторинга местности для мобильных РТК.

В четвертой части второго раздела, обоснована целесообразность использования импульсного режима работы нелинейной РТС при некогерентном приеме второй или третьей гармоники СВЧ-сигнала. Дело в том, что обнаружение сигнала на третьей гармонике эффективно лишь при максимальном уровне отношения «сигнал-шум» и высоком значении энергетической эффективности радиолинии второго рода. Эти условия наилучшим образом обеспечиваются именно выбором импульсного режима излучения.

Для обоснования этого воспользуемся уравнениями дальности действия нелинейной РТС для третьей гармоники ($n = 3$) в режиме непрерывного и импульсного излучения, которые имеют вид:

$$R_{\text{непр, max}} = \left[\frac{1}{(4\pi)^{2n+2} n^2} \frac{P_{\text{непр}}(\lambda_0) t_H G_{\text{прм}} G_{\text{пер}}^n \sigma_{k,n} \lambda_0^2 F}{q N_0} \right]^{\frac{1}{2n+2}}, \quad (11)$$

$$R_{\text{имп, max}} = \left[\frac{1}{(4\pi)^{2n+2} n^2} \frac{P_{\text{имп}}^n(\lambda_0) \tau N G_{\text{прм}} G_{\text{пер}}^n \sigma_{k,n} \lambda_0^2 F}{q^2 N_0} \right]^{\frac{1}{2n+2}}, \quad (12)$$

где $P_{\text{непр}}(\lambda_0)$ и $P_{\text{имп}}(\lambda_0)$ – мощность передатчика в режиме непрерывного и импульсного излучения на длине волны λ_0 ; N_0 – эквивалентная спектральная плотность мощности шума, приведенная к полосе приемника; t_H – время накопления сигнала; N – количество импульсов за время накопления сигнала; τ – длительность импульса; T – период повторения импульсов.

Воспользуемся элементарным преобразованием и установим связь между двумя режимами работы нелинейной РТС:

$$P_{\text{непр}}(\lambda_0) = P_{\text{ср}} = P_{\text{имп}}(\lambda_0) \frac{\tau}{T}, \quad (13)$$

где $P_{\text{ср}}$ – средняя мощность излучения за период T .

Если принять, что оба режима работы РТС обеспечивают одинаковый минимальный уровень СВЧ-сигнала на входе приемника, то отношение дальностей можно записать в виде:

$$\frac{R_{\text{имп, max}}}{R_{\text{непр, max}}} = 5 \frac{1-n}{n+1} \log_{10} D, \quad (14)$$

где $D = \tau/T$ – коэффициент заполнения импульсного радиосигнала, т.е. отношение длительности импульсов к их периоду повторения.

Из выражений (12)–(14) следует, что при одинаковых энергетических затратах импульсный режим всегда обеспечивает больший энергетический потенциал радиолинии, чем непрерывный. В практическом диапазоне $D = 0,001 - 0,1$ выигрыш по дальности и по отношению «сигнал-шум» для импульсного режима оказывается наиболее заметен именно для нелинейной РТС на третьей гармонике. Так, при заполненности $D = 0,01$ выигрыш по дальности составляет около 3 раз, тогда как при $D = 0,0005$ – около 7 раз. Для повышения эффективности импульсного режима возможно регулирование параметров радиосигнала – в первую очередь пиковой мощности излучения $P_{\text{имп}}$ и коэффициент заполнения D . На рисунке 8 представлена зависимость отношения «сигнал-шум» от мощности излучения нелинейной радиосистемы в импульсном режиме при $n=3$.

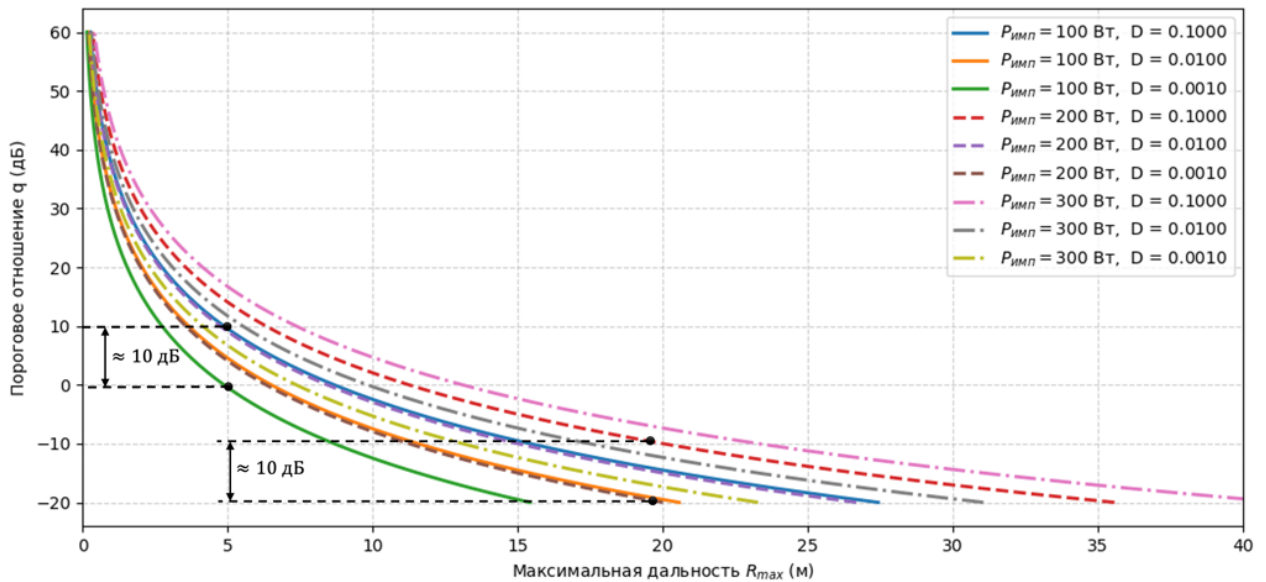


Рисунок 8 – Зависимость отношения «сигнал-шум» от мощности излучения расстояния до нелинейной радиосистемы в импульсном режиме при $n=3$

Из рисунка 8 видно, что увеличение коэффициента заполнения импульса D в 100 раз приводит к росту отношения «сигнал-шум» примерно на 10 дБ. Аналогичный выигрыш по отношению «сигнал-шум» может быть получен и за счет увеличения импульсной мощности излучения приблизительно в 200 Вт. Это подтверждает энергетическое преимущество импульсного режима работы нелинейной РТС, в которой уменьшение коэффициента заполнения D приводит к тому же эффекту увеличения отношения «сигнал-шум», как и при увеличении импульсной мощности передатчика.

В заключительной части второго раздела предложен метод управления облучением нелинейной РТС на частоте третьей гармоники. Метод основан на учете изменения угла наклона луча относительно Земли (см. рис. 9). Это изменение вызывает значительное увеличение площади освещаемого участка местности. Формула расчета площади освещенной области, соответствующей углу падения луча i , представлена ниже

$$A(i) \approx \frac{\pi}{4} d_e(i) d_a(i) = \frac{\pi h_1 \theta_e \theta_a}{4 \cos^3 i}. \quad (15)$$

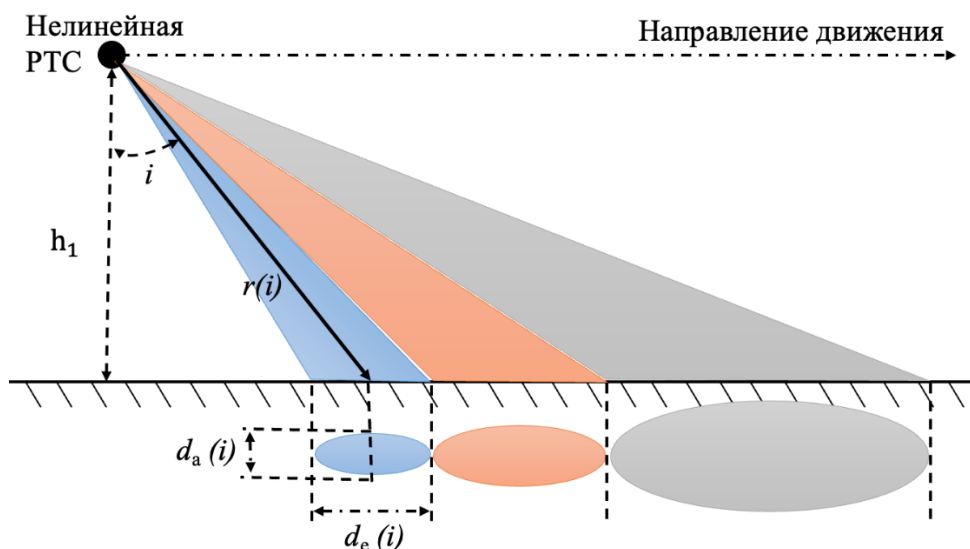


Рисунок 9 – Геометрические области зоны облучения нелинейной РТС при наклонном зондировании

Анализируя формулу (15) и рисунок 9, можно заключить, что при фиксированной мощности передатчика плотность потока мощности на земной поверхности уменьшается. Это снижение приводит к ухудшению соотношения сигнал-шум на входе приемника, что особо важно при обнаружении слабоконтрастных электрических неоднородностей с кубической ВАХ. Чтобы компенсировать падение плотности потока мощности на поверхности земли в нелинейных РТС с непрерывным режимом излучения необходимо повышать мощность передатчика согласно закону $\cos^{-3}(i)$. При работе в импульсном режиме важно учитывать не только пиковые значения мощности, но и продолжительность импульсов, так как обе величины совместно определяют общие энергетические показатели нелинейной РТС.

В данной части исследования рассматривается два пути увеличения передаваемой энергии: увеличение времени радиооблучения (длительности импульса или числа импульсов) и изменение структуры излучающего сигнала – то есть регулирование коэффициента заполнения импульса D . Первый путь напрямую повышает энергию за счет большего суммарного времени излучения, а второй – за счет увеличения средней мощности при фиксированной пиковой мощности. Уменьшение D приводит к росту средней мощности при прочих равных условиях. Хотя влияние изменения D на максимальную дальность обнаружения носит степенной характер и невелико при $n=3$, регулирование D остается эффективным средством тонкой настройки энергетики сигнала. В импульсном режиме это условие достигается либо увеличением пиковой мощности, либо изменением длительности импульса и коэффициента заполнения. Подставляя выражение для средней мощности импульсного сигнала:

$$D(i) \propto P_{cp}(i) \propto \cos^{-3}(i). \quad (16)$$

На практике целесообразно регулировать коэффициент заполнения $D(i)$, так как его изменение технически проще осуществить и не вызывает риска перегрузки передатчика. Исходя из этого, предлагается метод управления уровнем облучения, основанный на поддержании постоянного уровня плотности потока мощности СВЧ-сигнала в освещаемой зоне и одновременном динамическом управлении характеристиками импульса для стабилизации соотношения сигнал/шум во всем диапазоне углов наклона луча относительно Земли.

Например, при малых углах наклона $i < 30$ град. спад плотности потока мощности СВЧ-сигнала незначителен, и доступного количества энергии хватает для надежного обнаружения КРО. Следовательно, дополнительного управления параметрами системы не требуется.

Напротив, при больших углах наклона $i > 30$ град. простой геометрической коррекции уже недостаточно. Чтобы поддержать соотношение «сигнал-шум», требуется увеличить длительность импульсов, поднять частоту их следования и настроить коэффициент заполнения $D(i)$ пропорционально углу наклона. Принцип и эффективность реализации данного подхода и блок-схемы управления представлены в диссертационной работе.

Таким образом, использование комплексного подхода к управлению мощностью излучения и коэффициенту заполнения радиоимпульсов компенсирует снижение чувствительности, вызванное изменениями угла наклона луча, обеспечивая стабильную работу нелинейной РТС на третьей гармонике. В результате повышается общая энергетическая эффективность системы и расширяется диапазон эффективного сканирования местности по углу места.

В первой части третьего раздела описаны эксперименты по изучению ЭПР на третьей гармонике, которая имеет стандартную размерность площади (m^2). Измерения проводились для трех типовых форм моделей КРО: цилиндрической (ИО-Ц), сферической (ИО-С) и плоской (ИО-П). Эксперимент включал изучение особенностей углового распределения ЭПР в двух плоскостях

сканирования. Аналогичные зависимости, сопоставленные с экспериментом, были также рассчитаны с помощью метода компьютерного в программе FEKO (рисунки 10, 11 и 12).

Затем подробно рассмотрены методы численного расчета КНРО в свободном пространстве. Этот коэффициент играет ключевую роль, так как позволяет объективно оценить рассеивающие свойства КРО с различной формой металлической оболочки в радиолинии второго рода на частоте n -й гармоники. КНРО отражает влияние КРО на формирование вторичных полей СВЧ-излучения в зоне раскрыва антенны нелинейной РТС.

Далее рассматривается методика численного расчета КНРО для условий свободного пространства. Этот коэффициент чрезвычайно важен, так как позволяет объективно оценивать рассеивающие свойства КРО в радиолинии второго рода на частоте n -й гармоники. По сути, КНРО характеризует вклад КРО в формирование вторичных полей СВЧ-излучения в зоне действия приемной антенны нелинейной РТС.

Для унификации и правильного сравнения экспериментальных данных с теоретическими расчетами была выбрана фиксированная частота возбуждения $f_0 = 3,33$ ГГц. Регистрация осуществлялась на третьей гармонике $3f_0 = 10$ ГГц при известной плотности потока мощности $P_{пер} = 1$ Вт/м². В рамках принятой нормировки КНРО ($\sigma_{k,3}$) численно равен величине ЭПР на третьей гармонике ($\sigma_{k,3}$), согласно формуле

$$\sigma_{k,3} = \frac{\sigma_3}{P_{пер}^2}. \quad (17)$$

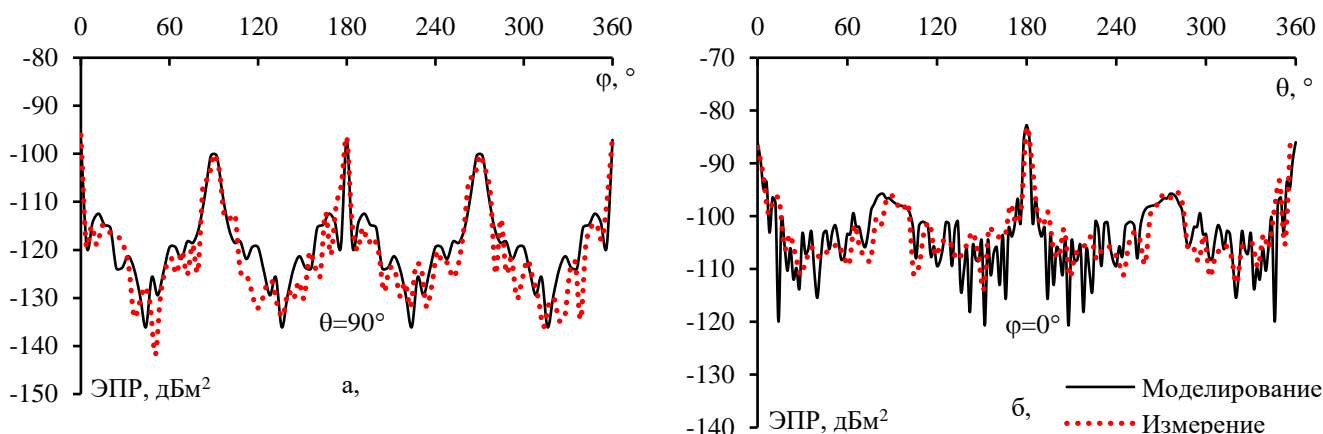


Рисунок 10 – Сравнение результатов моделирования и эксперимента ЭПР на третьей гармонике для ИО-Ц: а) плоскость сканирования $\theta=90^\circ$; б) плоскость сканирования $\phi=0^\circ$

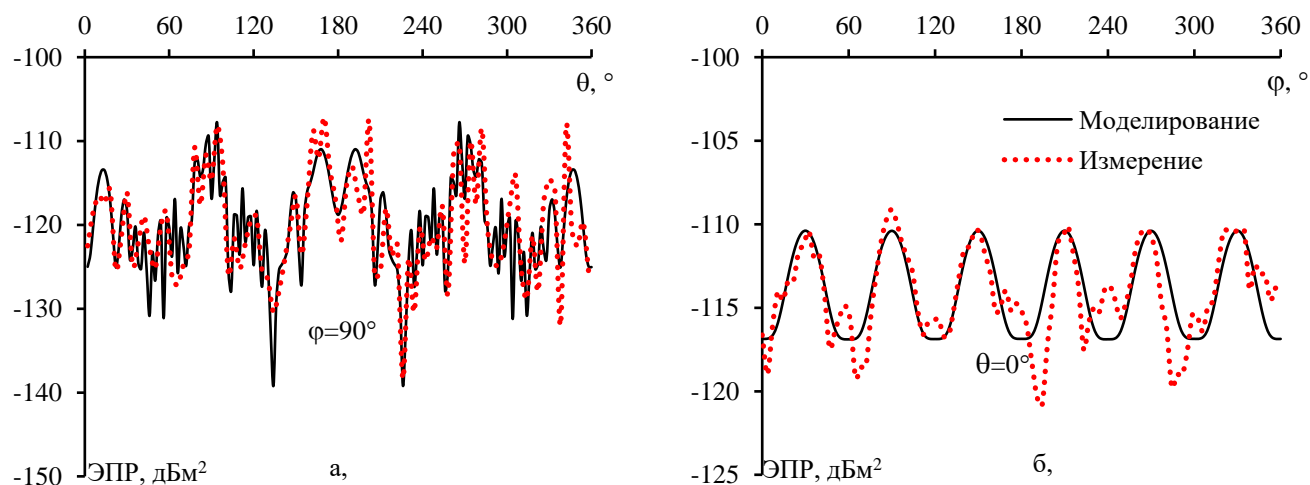


Рисунок 11 – Сравнение результатов моделирования и эксперимента ЭПР на третьей гармонике для ИО-П: а) плоскость сканирования $\theta=90^\circ$; б) плоскость сканирования $\phi=0^\circ$

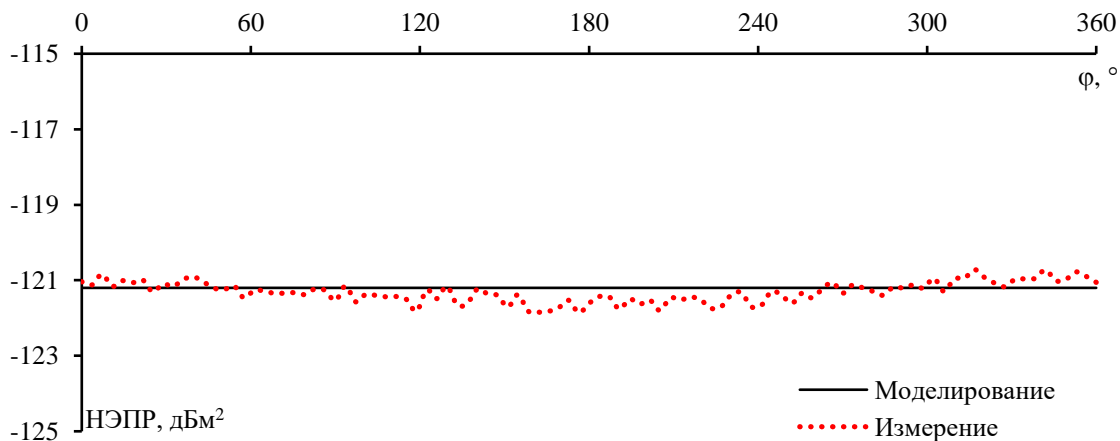


Рисунок 12 – Сравнение результатов моделирования и эксперимента ЭПР на третьей гармонике для ИО-С в двух плоскостях сканирования

Сравнение данных моделирования и эксперимента (рис. 10–12) показало высокую степень совпадения результатов (до 3 дБ) и подтвердило наличие ярко выраженных угловых максимумов отражения. Для ИО-С характерно почти изотропное рассеяние. Исходя из полученных значений ЭПР на третьей гармонике определено, что КНРО для рассматриваемых КРО лежит в диапазоне от 10^{-10} до 10^{-12} м⁶/Вт², что достаточно для надежного их обнаружения на дистанции от 5 до 20 м. Кроме того, угловые диаграммы рассеяния позволяют не только фиксировать факт присутствия КРО, но и выполнять его предварительную классификацию по форме диаграммы, что открывает перспективы для разработки нелинейных РТС с системой распознавания геометрии КРО.

Вторая часть третьего раздела посвящена обоснованию выбора конструкции и параметров спиральной антенны с эллиптической поляризацией, функционирующей на частоте 3,33 ГГц и 10 ГГц. Приводятся расчетные данные, демонстрирующие высокий коэффициент усиления (21,5–25 дБ) и узкую диаграмму направленности (ширина главного лепестка 5–7°), что делает такую антенну оптимальной для работы в составе нелинейной РТС на третьей гармонике. Подчеркивается преимущество узкого луча и эллиптической поляризации, позволяющих минимизировать влияние случайной ориентации КРО и снизить фоны окружающего пространства.

Описана архитектура мобильной нелинейной РТС, включающая модули формирования и усиления сигналов, систему управления облучением и блоки цифровой обработки сигналов. Отдельно рассмотрены принципы разработки двухканального обнаружителя, работающего на второй и третьей гармониках, что существенно повышает чувствительность и избирательность РТС. Особое внимание уделено созданию безопасной машины для обнаружения электрических неоднородностей с различными видами ВАХ на дистанциях от 5 до 20 м. Подчеркивается важность использования методов машинного обучения и искусственного интеллекта для управления процессом облучения земной поверхности с учетом ландшафтно-почвенных зон Вьетнама.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе проведенных исследований получены следующие основные результаты:

1. Разработана математическая модель формирования гармонических откликов, соотнесенных с ЭПР КРО различной формы, на основе разложения в ряд Тейлора, в которой кубическая ВАХ описывается полиномиальной аппроксимацией. Введены два важных параметра: НЭПР (σ_n) и КНРО ($\sigma_{k,n}$) КРО, позволяющие корректно описывать генерацию высших гармоник (прежде всего третьей) и заменив классическую ЭПР в задачах проектирования РТС. На базе этих радиотехнических параметров разработана методика инженерного расчета дальности

обнаружения электрических неоднородностей на третьей гармонике монохроматического СВЧ-сигнала с учетом потерь при распространении сквозь растительность и вдоль поверхности земли.

2. Теоретически показано, что интегральный коэффициент передачи СВЧ-сигнала в нелинейной РТС обнаружения электрических неоднородностей определяется, в первую очередь, эффективностью возбуждения поверхностной радиоволны на границе «воздух–грунт». Установлено, что при углах эллиптической поляризации $\theta_p = 15\text{--}20^\circ$ обеспечивается доминирующий вклад вертикальной составляющей поля и максимально эффективное возбуждение поверхностной волны, что ведет к устойчивым значениям $F \approx 7\text{--}10$ и надежному выявлению неоднородностей на дистанциях 5–20 м практически независимо от степени увлажнения грунта. Показано, что третья гармоника демонстрирует устойчивость к вариациям параметров грунта и растительности, что обосновывает ее выбор как основного селективного признака КРО различной формы.

3. Разработан и исследован обобщенный подход к оценке дальности действия нелинейной РТС на третьей гармонике в непрерывном и импульсном режимах. Показано, что при одинаковых энергетических затратах импульсный режим обеспечивает существенно большее отношение «сигнал–шум» на больших дальностях за счет накопления радиоимпульсов. Установлено, что при переходе к импульсному режиму с переменным коэффициентом заполнения $D(i) \in [0,001; 0,1]$ возможно увеличение отношения «сигнал–шум» на входе радиоприемного устройства примерно на 10 дБ. Расчеты показали, что увеличение коэффициента заполнения импульса D на два порядка приводит к росту отношения «сигнал–шум» примерно на 10 дБ; такой же выигрыш достигается и за счет увеличения пиковой мощности излучения на ~ 200 Вт. Таким образом, доказано, что оптимальное улучшение энергетических характеристик нелинейной РТС можно достигнуть путем регулировки коэффициента заполнения импульса D и времени накопления сигнала.

4. На основе анализа распределения плотности мощности в пятне облучения установлено, что при увеличении угла зондирования i площадь пятна возрастает, а плотность потока мощности в среднем убывает по закону $\cos^{-3}(i)$. Предложена схема управления облучением, реализующая принцип: геометрические потери компенсируются за счет регулирования длительности импульса и коэффициента заполнения $D(i)$ так, чтобы средняя плотность потока мощности СВЧ-сигнал на поверхности оставалась практически постоянной при изменении угла наклона антенн нелинейной РТС. Численное моделирование показало, что такая регулировка $D(i)$ позволяет перераспределять энергию передатчика в рабочем диапазоне углов сканирования, стабилизировать интенсивность сигнала и отношение «сигнал–шум», выровнять чувствительность нелинейной РТС при сканировании местности по углу места. Показано, что данный подход существенно повышает эффективность дистанционного мониторинга типичных ландшафтно-почвенных зон Вьетнама с борта мобильного РТК.

5. На основе численного моделирования и измерений в безэховой камере экспериментально установлена количественная зависимость интенсивности рассеяния третьей гармоники монохроматического СВЧ-сигнала от угла падения радиоволны и геометрических характеристик исследуемых КРО сферической, цилиндрической и прямоугольной формы, поверхность которых равномерно покрыта локальными электрическими неоднородностями с кубической ВАХ (модели ИО-П, ИО-С, ИО-Ц). Показано, что значения КНРО лежат в диапазоне 10^{-10} до 10^{-12} м⁶/Вт², что обеспечивает обнаружение неоднородностей на расстояниях 5–20 м. Обоснован выбор спиральных антенн с эллиптической поляризацией, работающих на частотах 3,33 и 10 ГГц и обеспечивающих коэффициент усиления порядка 21,5–25 дБ при ширине главного лепестка 5–7°.

Показано, что такая антенно-фидерная система формирует высокую напряженность поля в зоне расположения КРО, а узкий луч обеспечивает устойчивый прием сигнала третьей гармоники при произвольной ориентации КРО, снижая влияние неровностей поверхности и фоновых отражений от местности.

б. В исследовании предложена схема бортовой нелинейной РТС мониторинга местности, предназначенной для интеграции на мобильные роботы. Предложена схема бортовой нелинейной РТС мониторинга местности для установки на РТК, включающая импульсный передатчик, формирователь зондирующего сигнала, спиральные антенны с эллиптической поляризацией, два канала обнаружения второй и третьей гармоники, систему управления облучением и модуль цифровой обработки сигналов. Показано, что выбранные диапазоны мощности и частот ($P_{\text{имп}} \approx 100\text{--}300$ Вт, $f_0 \approx 3,33$ ГГц, $3f_0 \approx 10$ ГГц), а также параметры импульсного режима ($\tau \approx 1$ мкс, $D \approx 0,01\text{--}0,1$) обеспечивают надежное обнаружение слабоконтрастных электрических неоднородностей с кубической ВАХ на дистанциях от 5 до 20 м.

Приведенный цикл теоретических и экспериментальных исследований позволил разработать основу для проектирования мобильных нелинейных РТС мониторинга, устанавливаемых на РТК. Учитывая масштабы загрязнений ландшафтно-почвенных зон Вьетнама КРО, широкое внедрение мобильных РТК мониторинга местности существенно уменьшит риски для местного населения и ускорит процесс очистки сельскохозяйственных земель Социалистической Республики Вьетнам.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Статьи в научных изданиях, входящих в перечень ВАК

1. Нгуен Ван Кыонг. Выбор угла поляризации радиоволны в нелинейной радиолокации для обнаружения скрытых объектов / **Нгуен Ван Кыонг**, А. В. Николаев – DOI 10.34832/NIPR.2025.18.3.004. // Труды Научно-исследовательского института радио. – 2025. – № 3-4. – С. 87-95.
2. Нгуен, В. К. Сравнение методик расчета максимальной дальности обнаружения нелинейных радиолокационных станций / **В. К. Нгуен**, А. В. Николаев, Прошин А.Б. – DOI 10.18127/j5604128-202503-10 // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2025. – Т. 30, № 3. – С. 85-93.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Али Ахмад. Нейросетевая обработка изображений диаграмм направленности антенн 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

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.

8. 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.

Публикации в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus

9. 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.

Патент на изобретение

10. 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.
11. 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.

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ

12. Свидетельства о 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. - № 2025693815; заявл. 24.11.2025; опубл.08.12.2025. – 1 с.