

На правах рукописи



Корсаков Сергей Сергеевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОМЕХОВЫХ
НЕЛИНЕЙНЫХ РАССЕЙВАТЕЛЕЙ**

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Нижний Новгород – 2019

Работа выполнена на кафедре «Математики, физики и методики обучения Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Ивановский государственный университет», Шуйский филиал.

Научный руководитель: **Бабанов Николай Юрьевич**, доктор технических наук, доцент, проректор по научной работе Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (НГТУ)

Официальные оппоненты: **Щитов Аркадий Максимович**, доктор технических наук, главный научный сотрудник Нижегородского филиала АО «Научно-производственная фирма «Техноякс», г. Нижний Новгород.

Клюев Виктор Федорович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиотехники ФБГОУ ВПО «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского - национальный исследовательский университет», г. Нижний Новгород.

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

Защита диссертации состоится « 25 » декабря 2019 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д212.025.04, при «Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» по адресу: 600000, г. Владимир, пр. Строителей, 3/7, ауд.301.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ВлГУ университета и на сайте ВлГУ <http://dis.vlsu.ru>

Автореферат разослан « 22 » октября 2019 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, РТ и РС, Самойлову А.Г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



А.Г. Самойлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Актуальность темы диссертации определяется современными тенденциями развития радиоэлектронных средств: ростом плотности размещения радиоэлектронных средств, увеличением их мощности и чувствительности, увеличением частотного и динамического диапазонов применения. В то же время, рост промышленного производства электронных приборов, содержащих в своём составе полупроводниковые компоненты, приводит к постоянному увеличению числа объектов, способных нелинейно рассеивать облучающее электромагнитное поле - нелинейных рассеивателей. Нелинейные рассеиватели способны оказывать существенное влияние на близлежащее радиоэлектронное оборудование.

Работы в области исследования эффекта нелинейного рассеяния радиоволн, выполненные под руководством В.Б. Штейншлейгера, А.А. Горбачева, Н.С. Вернигорова, Г.Н. Парватова, Е.П. Чигина, Г.Д. Михайлова, Б.М. Петрова, Т.М. Заборонковой, Г.Н. Щербакова, Д.В. Семинихиной, С.В. Ларцова, С.Н. Разинькова, С.Н. Панычева, А.В. Николаева показали, что в настоящее время могут решаться многие актуальные практические и исследовательские задачи: описание механизмов возникновения нелинейных помех и оценка их распространения в окружающем пространстве, создание и применение специально изготовленных пассивных нелинейных радиоответчиков, измерение параметров вторичного поля, рассеиваемого нелинейными рассеивателями.

Ввиду конструктивной сложности и разнообразия источников нелинейных помех задачу оценки их помехового влияния целесообразно решать при помощи использования моделей таких объектов. При этом важно, чтобы практические модели, удобные для использования в натурных экспериментах, могли количественно описываться в теоретических исследованиях.

В настоящее время к этому требованию наиболее близки модели дипольных и рамочных нелинейных рассеивателей, состоящих из проволочного диполя или рамки, нагруженных на полупроводниковый элемент или систему из нескольких элементов. Существующие модели описывают нелинейный рассеиватель с точки зрения его способности обогащать спектр рассеянного колебания, при этом не

рассматриваются в комплексе процессы возбуждения токов наводки, при облучении нелинейного рассеивателя электромагнитной волной, распространения токов в схеме нелинейного рассеивателя, искажения токов на сосредоточенных нелинейностях и формирования рассеянного поля искажёнными токами. Это привело к тому, что даже для указанных моделей результаты моделирования согласуются с экспериментальными данными только на качественном уровне, причём эксперименты проводятся в условиях близких к «идеальным». При этом за границами рассмотрения остаются такие вопросы как согласование рассеивающей части и нагрузки нелинейного рассеивателя, работа на частотах, близких к значениям границ рабочей полосы, работа в условиях наличия помех.

Объект исследования - нелинейные рассеиватели электромагнитных волн.

Предмет исследования - моделирование свойств нелинейных рассеивателей.

Цель исследования: Моделирование амплитудных, частотных и пространственных свойств источников нелинейных помех – пассивных полупроводниковых нелинейных рассеивателей.

Цель исследования достигается решением следующих задач:

1. Расчет поля нелинейной помехи в произвольном направлении от вторичного нелинейного рассеяния помехового нелинейного рассеивателя.
2. Учесть процессы согласования импедансов антенной части и нелинейной нагрузки.
3. Разработать модель биконического излучателя, нагруженного на туннельный или обращенный полупроводниковый диод (диод с произвольными вольт-амперной и вольт-фарадной характеристиками).
4. Разработать модель помехового нелинейного рассеивателя с произвольной антенной частью и произвольной нелинейной нагрузкой.

Научная новизна

1. Разработана методика расчёта уровня переизлучаемого поля нелинейной помехи в произвольной точке пространства. В качестве исходных данных методикой используются:

- данные об источнике первичного (облучающего) поля, его удалении от нелинейного рассеивателя, их взаимной ориентации и условиях распространения поля;
- сведения о расположении точки пространства, в которой определяется уровень переизлучаемого поля нелинейной помехи, относительно источника нелинейной помехи и условия распространения помехового поля;
- зависимости, характеризующие свойства направленности источника нелинейной помехи на частотах облучаемого и рассеиваемого полей, и его амплитудная характеристика.

2. Решена задача вычисления амплитудной характеристики произвольного источника нелинейных помех в том случае, если известны вольт-амперная и вольт-фарадная характеристики источника нелинейных помех, и значения коэффициента усиления его рассеивающей части на частотах облучающего колебания и помехового сигнала, при этом учитывается согласование его рассеивающей и нелинейной частей, а также наличие частотнозависимых активной и реактивной составляющих импеданса излучения.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Для решения задач калибровки широкополосных нелинейных измерительных стендов разработана конструкция эталона – биконического излучателя, нагруженного на туннельный диод. Определены оптимальные габаритные характеристики излучателя, построены амплитудно-частотные и калибровочные характеристики эталона, а также описана процедура выполнения калибровки.

2. Решена задача исследования пространственных свойств источников нелинейных помех по известным амплитудной характеристике и пространственным характеристикам рассеивающей части. Полученное решение позволяет вычислять пространственно-частотные характеристики нелинейных рассеивателей дипольного типа в широкой полосе частот.

Методы исследования. При выполнении работы применялись теоретические и экспериментальные методы исследования. Теоретическая часть опирается на математическое описание принципов полупроводниковой электроники, теории нелинейных цепей и антенн. Математическое моделирование проводилось по сред-

ствам программного комплекса LabVIEW путем решения систем дифференциальных уравнений.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработана методика, позволяющая рассчитывать уровень поля нелинейной помехи, переизлучаемого от помехового нелинейного рассеивателя в произвольном направлении.

2. Разработана численная модель широкополосного помехового нелинейного рассеивателя в виде биконического излучателя, нагруженного на полупроводниковый диод.

3. Разработана модель широкополосного эталонного нелинейного рассеивателя.

4. Решена задача моделирования амплитудных, пространственных и частотных свойств помехового нелинейных рассеивателей с произвольной антенной частью и произвольной нелинейной нагрузкой.

Степень достоверности. Достоверность и обоснованность результатов исследования обеспечивается научной методологией исследования; выбором и реализацией комплекса методов, адекватных цели, задачам и логике исследования. Достоверность полученных теоретических результатов подтверждается данными компьютерного моделирования выполненного по средствам программно-вычислительного комплекса LabVIEW версия 12.0 с использованием встроенных широко-известных алгоритмов решения системы дифференциальных уравнений (Рунге-Кутта). Результаты и выводы, представленные в диссертации, не противоречат известным исследованиям в области радиотехники и радиолокации.

Апробации результатов. Результаты работы докладывались на научно-технических конференциях:

– 11-ой международной научно-технической конференции ПТСПИ-2015, Суздаль, 12-14 ноября 2015г.- Владимир: ВлГУ;

– 13-ой международной научно-технической конференции ПТСПИ-2019, 3-5 июля 2019г.- Владимир: ВлГУ;

– XXIII Международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии ИСТ-2017». - Нижний Новгород: НГТУ, 2017;

– III Всероссийская научно-техническая конференция «Теоретические и прикладные проблемы развития и совершенствования автоматизированных систем управления военного назначения». г. Санкт-Петербург, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, 22 ноября 2017г.;

– III научно-техническая конференция «Радиолокация. Теория и практика», ННИИРТ, 13-14 сентября 2017г., Нижний Новгород;

– X международная научная конференция «Шуйская сессия студентов, аспирантов, педагогов, молодых ученых», г. Шуя, 7-8 июня 2017.

Публикации. Основные результаты работы изложены в шести публикациях в журналах, включенных в перечень изданий, рекомендованных ВАК для опубликования результатов диссертационных работ, получен один патент на изобретение.

Личный вклад автора заключается в следующем:

- построении математических и численных моделей рассмотренных в работе источников нелинейных помех;

- выполнении аппроксимации нелинейных ёмкости и проводимости различных типов полупроводниковых диодов, достаточной для построения численной модели диода в среде LabVIEW;

- выполнении численного моделирования с построением характеристик, описывающих амплитудные, частотные и пространственные свойства моделируемых источников нелинейных помех;

- расчёте конструкции и характеристик эталонного нелинейного рассеивателя для калибровки широкополосных нелинейных измерительных стендов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемых сокращений и библиографического списка из 134 наименований. Объем диссертации составляет 132 страницы текста, 98 рисунков и 1 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение: показана актуальность и степень разработанности темы, определены цели, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, обозначены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена вопросу помехового влияния, которое оказывает рассеянное пассивными нелинейными рассеивателями (НР) поле на сторонние радиоэлектронные средства (РЭС). Представлены результаты оценки интенсивности помехового влияния пассивных НР.

Под общим названием НР в работе рассматриваются объекты, обладающие способностью формировать рассеянный сигнал (РС), спектральный состав которого отличен от спектрального состава облучающего колебания. Анализ посвящённых изучению свойств рассеяния НР публикаций показал, что наименее разработанным направлением исследований является изучение помехового воздействия НР на близлежащие РЭС. В настоящее время исследования свойств рассеяния НР осуществляются преимущественно путём создания моделей таких объектов, их аналитического описания и экспериментального измерения их реакции (параметров РС) при воздействии внешним полем (далее – сигналом накачки (СН)), являющимся единственным источником энергии для формирования РС. Создание обобщённых моделей НР для обозначенной задачи исследования представляется наиболее подходящим способом исследования ввиду конструктивной сложности и разнообразия источников нелинейных помех.

Используемый сегодня для аналитического описания процесса рассеяния подход предполагает расчёт токов, наведённые в линейной части НР по данным, характеризующим СН, описание процессов, сопряжённых с искажением этих токов на нагрузке и процессов формирования поля РС, генерируемого искажёнными токами. Основным недостатком данного подхода состоит в том, что опускаются процессы согласования линейной и нелинейной частей НР. При этом не рассчитывается частотнозависимый коэффициент отражения от нагрузки и считается, что через линейную и нелинейную части протекают одни и те же токи. В результате, существующие модели описывают лишь частные, предполагающие «идеальное» согласование, случаи, а экспериментальная проверка проводится лишь для случаев, наиболее близких к «идеальным». В условиях подобного упрощения оказывается невозможным описание поведения НР в широкой полосе частот, в то время как реальные (не модельные) НР, могут содержать множество сосредоточенных

нелинейных элементов и оказываются способны формировать нелинейные помехи в широкой полосе частот.

Ещё одним существенным недостатком исследований, представленных в известных публикациях, является слабая освещённость или отсутствие данных о результатах изучения пространственных свойств НР. В частности, экспериментальное изучение характеристик рассеяния производится только для случаев, совмещённых или размещённых близко друг к другу антенн экспериментальной установки, излучающих СН и принимающих РС. Подобный подход неприменим в рамках задачи изучения помехового влияния РС на сторонние РЭС. Условия данной задачи предполагает произвольное взаимное расположение и ориентацию НР и РЭС, на которые оказывается помеховое воздействие, следовательно, при изучении пространственных свойств рассеяния необходим учёт ориентации НР как относительно фронта волны облучающего колебания, так и относительно направления на РЭС. Информация о подобных исследованиях пространственных свойств НР на сегодняшний день отсутствует.

В результате анализа публикаций был сделан вывод, заключающийся в том, что на сегодняшний день не разработаны математические модели, которые могут выступать в качестве моделей источников нелинейных помех, и позволяют учитывать следующие особенности задачи:

- формирование рассеянного поля в широкой полосе частот;
- произвольные габариты рассеивающей части НР (в том числе, превышающие длину волны рассеиваемого колебания);
- рассогласование рассеивающей части и нелинейной нагрузки;
- изучение свойств рассеянного поля не только в направлении облучения (или близком к нему).

Среди известных моделей НР, используемых сегодня для аналитического определения рассеиваемого поля, в рамках задачи описания нелинейных помех может быть применима процессная модель НР, которая в комплексе описывает следующие процессы: возбуждение токов наводки в некоторой линейной структуре, выступающей в роли рассеивающей части НР (вопросы приёма НР облучающего колебания), канализация сигналов между линейной частью и сосредоточенным не-

линейным элементом (вопросы согласования), искажение токов на нелинейном элементе, формирование поля РС линейной структурой (вопросы излучения на частотах нелинейных продуктов). Однако, процессная модель была разработана для задач синтеза НР, предполагающих формирование оптимальных конструкций при априори известной структуре СН, что позволяло считать входное сопротивление рассеивающей части НР чисто активным и существенно упрощало расчёты. Поэтому, формирование математической модели НР на базе процессной модели и её применение для описания рассеянного поля в рамках тематики данного исследования потребовало существенной доработки, в результате которой была сформирована методика определения уровня переизлучаемого поля нелинейной помехи в произвольной точке пространства.

Вторая глава посвящена учету процессов согласования рассеивающей части и нелинейной нагрузки НР. В ходе исследований была разработана математическая модель и определены амплитудные и частотные характеристики источника нелинейных помех на основе биконического диполя, нагруженного на импульсный диод – биконического нелинейного рассеивателя (БНР).

Выбор конструкции рассеивающей части определялся её широкополостностью, т.е. сопротивление излучения биконуса носит резистивный характер и относительно слабо изменяется в широком частотном диапазоне (1):

$$Z_{\text{вх}} = (\eta/\pi) \cdot \ln(\text{ctg}(\theta/2)) \cdot (1 + \Gamma_{\text{ЗС}})/(1 - \Gamma_{\text{ЗС}}), \quad (1)$$

где η – волновое сопротивление свободного пространства, θ – угол конуса.

Данное свойство биконической антенны обуславливает её широкое использование в качестве эталонных и измерительных антенн, а также модели цели нелинейной радиолокации.

Эквивалентная схема данного рассеивателя представлена на рисунке 1.

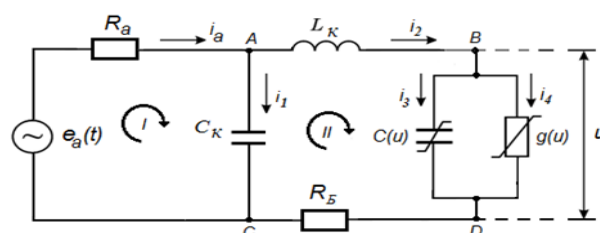


Рисунок 1 - Эквивалентная схема биконического нелинейного рассеивателя.

Эквивалентная схема, была описана системой дифференциальных уравнений Кирхгофа, которая с учетом аппроксимации характеристик диода, была преобразована в математическую модель в виде (2):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_a}{dt} = \frac{1}{C_k R_a} (i_2 - i_a) + \frac{1}{R_a} \frac{d\varepsilon}{dt} \\ \frac{di_2}{dt} = \frac{1}{L_k} (\varepsilon - i_a R_a - i_2 R_B - u) \\ \frac{du_d}{dt} = \frac{1}{C_k} (i_a - i_2) \\ \frac{du}{dt} = 0.5(1 + \text{sign } u) \frac{i_2 - gu}{(1+bu)g\theta} + 0.5(1 - \text{sign } u) \frac{i_2 - gu}{C_0 \sum_{n=0}^N (n+1) \beta_n u^n} \end{array} \right. \quad (2)$$

На основании полученной математической модели, было проведено численное моделирование, и, по средствам предложенной в главе 1 методики, были определены амплитудные характеристики (АХ) рассеянного поля для одночастотного и двухчастотного воздействия (с частотами $f_1 = 400$ МГц и $f_2 = 250$ МГц). Для двухчастотного воздействия были построены АХ как для частот вторых гармоник облучающих колебаний (рисунок 2), (рисунок 3), так и для комбинационной частоты, равной их сумме (рисунок 4).

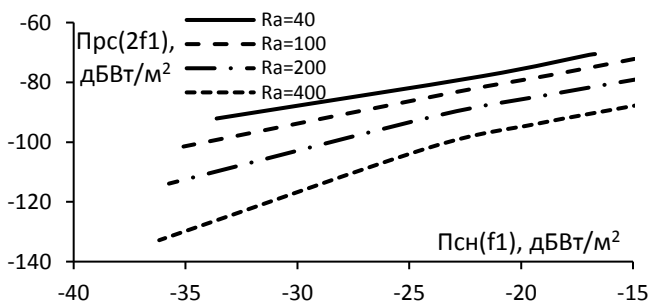


Рисунок 2 - Амплитудная характеристика для РС на частоте $2 \cdot f_1 = 800$ МГц.

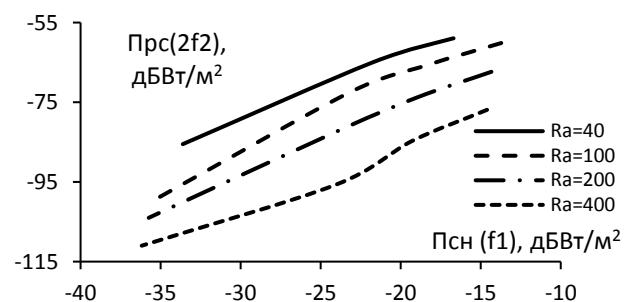


Рисунок 3 - Амплитудная характеристика для РС на частоте $2 \cdot f_2 = 500$ МГц.

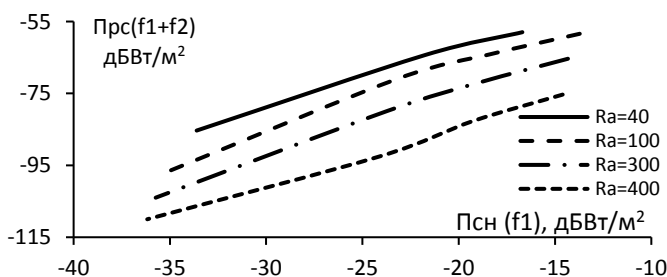


Рисунок 4 - Амплитудная характеристика для РС на частоте $f_1 + f_2 = 650$ МГц.

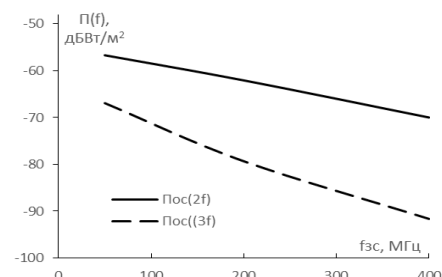


Рисунок 5 - Частотные характеристики для РС.

Помимо АХ представленная методика позволяет оценить частотные свойства БНР, например, сравнить уровень нелинейной помехи на частотах второй и третьей гармоник облучающего монохроматического колебания (рисунок 5). Также бы-

ла показана способность БНР при воздействии сложного сигнала, в частности ЛЧМ радиоимпульса, сохранять свою структуру в рассеянном сигнале.

В третьей главе предложена методика калибровки широкополосных нелинейных измерительных установок, для калибровки предложен эталонный НР в виде широкополосной антенны, нагруженной на туннельный диод.

Вопрос калибровки измерительных станций становится актуальным при проведении экспериментальных исследований поля, рассеянного нелинейными объектами (рисунок 6). Известный и широко применяемый в радиолокации метод замещения, предполагающий инвариантность ЭПР исследуемого объекта, не может быть применим к нелинейным объектам ввиду зависимости нелинейной ЭПР от интенсивности облучающего воздействия:

$$\sigma_n = \sigma_n(P_{3C}) = 4\pi P_{OC} / P_{3C} \quad (3)$$

Принципиальным моментом является то, что кроме вычисления нелинейной ЭПР σ_n необходимо определять соответствующее ей значение интенсивности волны ЗС, облучающей НР P_{3C} (3). В этой связи, было предложено измерять более простую с метрологической и методической точек зрения зависимость – АХ. Для экспериментального нахождения АХ исследуемого объекта необходимо сначала для эталона определить зависимость уровня излучаемой мощности – $P_{ИС}$ от мощности принимаемого ОС – $P_{ПС}$:

$$P_{ПС} = F_2(P_{ИС}) \quad (4)$$

Функциональная зависимость (4) подобна АХ. Таким образом, зная АХ эталона, могут быть определены калибровочные коэффициенты: $K_{ЗС} = P_{ИС} / P_{3C}$ и $K_{ОС} = P_{ПС} / P_{ОС}$. После чего эталон может быть заменен иным объектом, а измерения повторены. АХ исследуемого объекта может быть определена из (4).

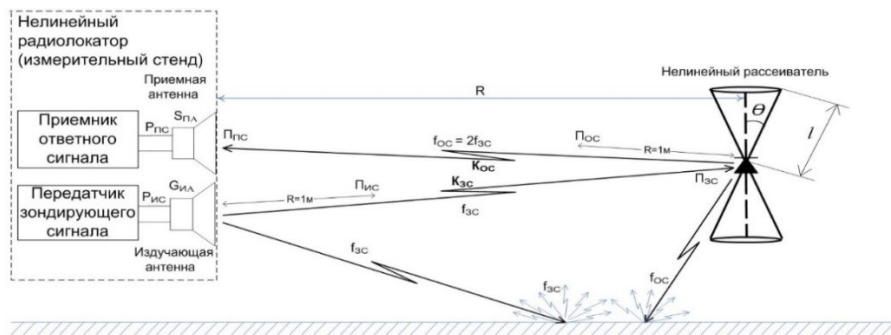


Рисунок 6 - Схема взаимодействия нелинейного радиолокатора и измеряемого НР.

Для реализации данного метода предлагалось использовать эталонные НР с характерной точкой на АХ (т.е. такой областью, где описывающая АХ функция или ее производная испытывает скачек или содержит экстремум). НР с характерной точкой на АХ обычно имеет в нагрузке сборку различных диодов или диод, содержащий несколько *p-n* переходов (туннельные или обращенные диоды). До настоящего времени подобные НР не нашли широкого применения в качестве эталонов, и в основном используется метод косвенного эталона. По мнению автора, это связано с тем, что не решены две важные задачи: описанные до настоящего времени в литературе НР с характерной точкой на АХ были узкополосными дипольными НР (ДНР), что предполагало наличие не одного, а целого ряда эталонных ДНР для обеспечения диапазонных измерений; не существовало метода теоретического расчёта характеристик ДНР с характерной точкой на АХ.

Для решения указанных задач может быть использована конструкция широкополосного ДНР с характерной точкой на АХ, подкрепленная методикой расчета его АХ. С учетом вышесказанного были предложены модели эталонных НР с рассеивающей частью в виде биконической антенны или антенны «бабочка» и нелинейной частью в виде туннельного или обращенного диода. Методика нахождения АХ таких БНР аналогична представленной в главе 2. На рисунке 7 и рисунке 8 представлены АХ и калибровочная характеристики для БНР с нелинейной частью в виде диода ГИ103.

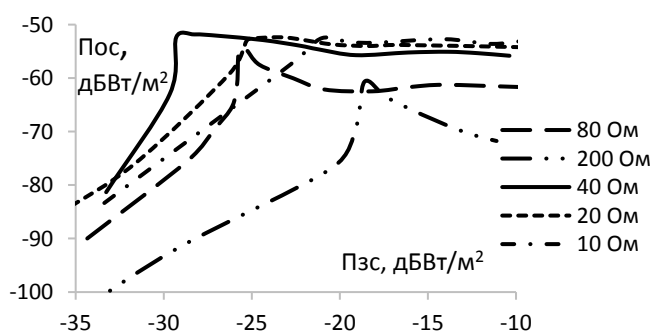


Рисунок 7 - Амплитудная характеристика БНР с нелинейной частью в виде диода ГИ103 для различных антенных сопротивлений R_a .

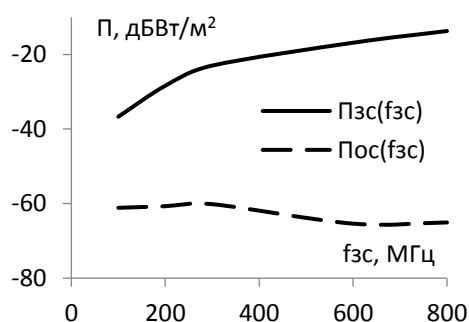


Рисунок 8 - Зависимость $P_{ос}$ и $P_{зс}$ от $f_{зс}$ для БНР с нелинейной частью в виде диода ГИ103 с фиксированным антенным сопротивлением $R_a = 80 \text{ Ом}$.

На рисунке 9 и 10 представлены амплитудно-частотная и калибровочные амплитудно-частотные характеристики антенны «бабочка», нагруженной на туннельный диод ГИ103, с антенным сопротивлением $R_a = 180 \text{ Ом}$.

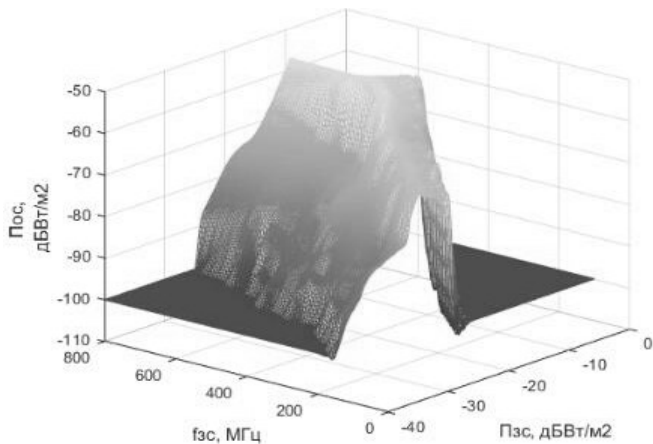


Рисунок 9 – АЧХ антенны «бабочка», нагруженной на туннельный диод ГИ103.

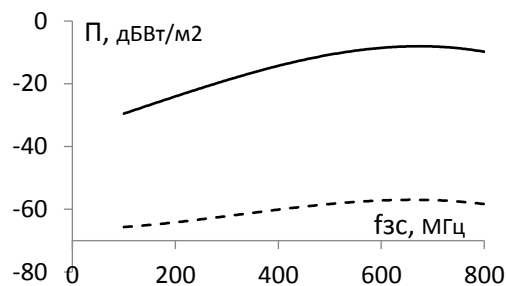


Рисунок 10 - Калибровочные характеристики (сплошная линия соответствует ЗС, пунктирная – ОС).

Четвертая глава посвящена исследованию рассеивающих свойств тонкого ДНР, линейная часть которого, в общем случае, не согласована с воздействующим на неё полем. Рассеивающая часть такого НР может иметь произвольные габариты, которые считаются известными в рамках численного моделирования.

Рассмотрение случая несогласованных рассеивающей и нелинейной частей НР, в контексте исследования рассеивающих свойств последних, необходимо для решения ряда практических задач, в которых НР являются объектами с априори неизвестными свойствами.

Отличительной особенностью моделей, рассмотренных в данной главе, являлось наличие реактивной компоненты импеданса излучения, представленного на эквивалентной схеме ДНР как X_a (рисунок 11). Нелинейная часть представлена импульсным диодом, рассмотренным в главе 2.

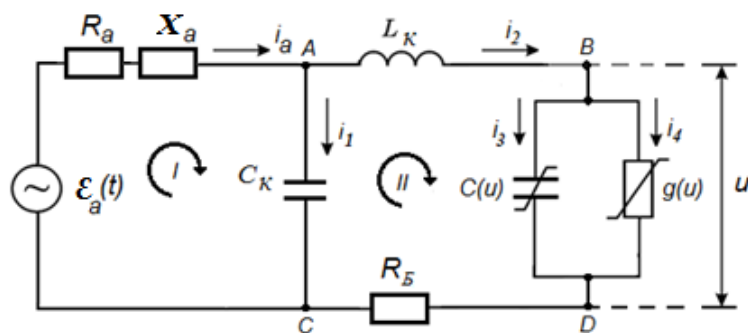


Рисунок 11 - Эквивалентная схема дипольного нелинейного рассеивателя.

Таким образом, математическая модель ДНР имеет вид (7):

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di_a}{dt} &= \frac{0.5(1+\text{sign } X_a)}{L_a} (\mathcal{E} - i_a R_a - u_d) + \\ &0.5(1 - \text{sign } X_a) \left[\frac{1}{C_k R_a} i_2 - \left(\frac{1}{C_k R_a} + \frac{1}{C_a R_a} \right) i_a + \frac{1}{R_a} \frac{d\mathcal{E}}{dt} \right]; \\ \frac{di_2}{dt} &= \frac{1}{L_k} (u_d - i_2 R_B - u); \\ \frac{du_d}{dt} &= \frac{1}{C_k} (i_a - i_2); \\ \frac{du}{dt} &= 0.5(1 + \text{sign } u) \frac{i_2 - gu}{(1+bu)g\theta} + 0.5(1 - \text{sign } u) \frac{i_2 - gu}{C_0 \sum_{n=0}^N (n+1) \beta_n u^n}; \end{aligned} \right. \quad (7)$$

Согласно методике, описанной во второй главе, были получены АХ для монохроматического СН ($f_{\text{СН}}=500\text{МГц}$) и РС на частотах 2-й и 3-й гармоник (рисунок 12), (рисунок 13), также получена зависимость величины нелинейной ЭПР от сопротивления антенной части (рисунок 14).

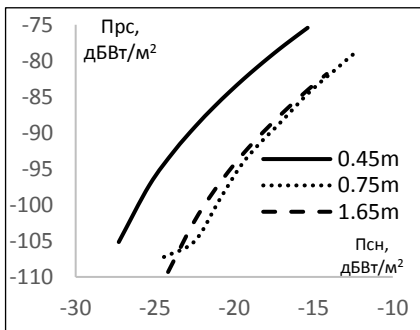


Рисунок 12 - Амплитудная характеристика для РС на частоте 1ГГц.

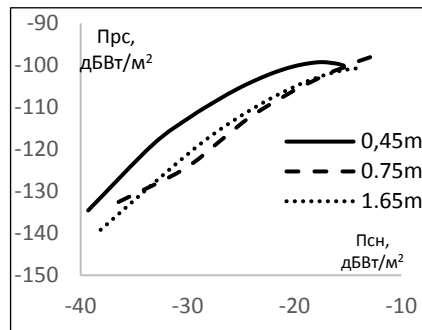


Рисунок 13 - Амплитудная характеристика для РС на частоте 1,5ГГц.

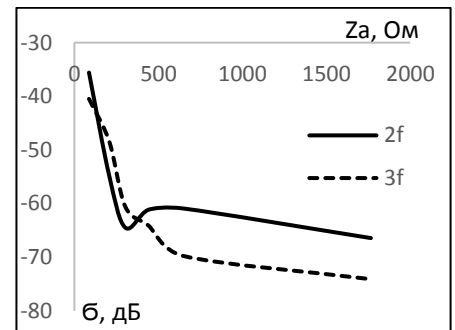


Рисунок 14 - Зависимость ЭПР на частотах 2-й и 3-й гармоники от величины сопротивления антенны ($f_{\text{НС}} = 400 \text{ МГц}$; $\mathcal{E} = 0,2 \text{ В}$).

В реальных приёмо-передающих устройствах с целью защиты от помех на выходе приёмного тракта размещается полосовой фильтр, который, будучи настроенным на предполагаемую частоту СН подавляет сигналы на иных частотах (в том числе, на частотах нелинейных продуктов), что существенно влияет на спектр РС. С целью учёта этой особенности в данной работе представлены результаты исследования модели НР, содержащей в своём составе помимо рассеивающей части и сосредоточенной нелинейности некоторую селективную схему – колебательный контур (рисунок 15), (рисунок 16).

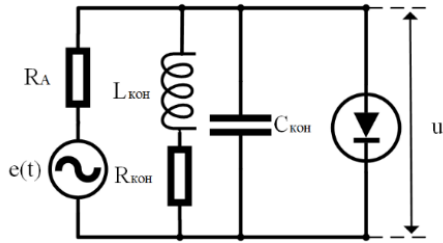


Рисунок 15 - Эквивалентная схема нелинейного рассеивателя с селективной схемой

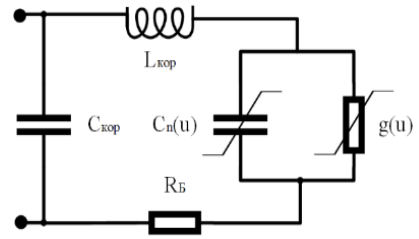


Рисунок 16 - Эквивалентная схема диода

Предполагая, что емкость контура $C_{\text{кон}}$ значительно превосходит вариации нелинейной емкости $p-n$ перехода $C_n(u)$, и опуская преобразования величин индуктивностей, ёмкостей и сопротивлений, эквивалентная схема НР может быть упрощена (рисунок 17). При этом значения C , L и R_K учитывают соответствующие параметры как диода, так и контура, а сами элементы C , L и R_K будут называться эквивалентным контуром (f_0 – резонансная частота эквивалентного контура).

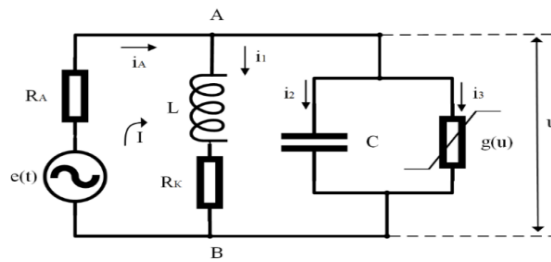


Рисунок 17 - Упрощённая эквивалентная схема НР с селективной схемой.

На основании упрощенной схемы была получена математическая модель (8):

$$\begin{cases} \frac{di_A}{dt} = (i_1 + C \frac{de}{dt} - i_A + gu) / (CR_a) \\ \frac{di_1}{dt} = \frac{1}{L} (u - i_1 R_K) \\ \frac{du}{dt} = \frac{1}{C} (i_A - i_1 - u g_0 \exp(bu)). \end{cases} \quad (8)$$

Применив обозначенную выше методику, были получены АХ (рисунок 18), (рисунок 19) для различных соотношений частот СН f_1 и контура f_0 . Сплошная линия соответствует случаю равенства частот $f_1 = f_0 = 200$ МГц, пунктирная – частотам $f_1 = 0,5f_0 = 100$ МГц, штрихпунктирная – частотам $f_1 = 0,75f_0 = 150$ МГц. Для значений СН малой интенсивности, из полученных диаграмм видно, что наибольший уровень РС соответствует случаю совпадения частоты РС с резонансной частотой эквивалентного контура, т.е. случаю $f_1 = 0,5f_0 = 100$ МГц. С ростом уровня СН участки стремительного роста РС последовательно проявляются для возрастающих значений частоты СН f_1 .

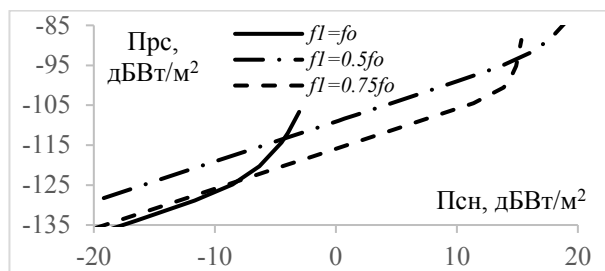


Рисунок 18 – АХ при значении антенного сопротивления $R_A=50$ Ом.

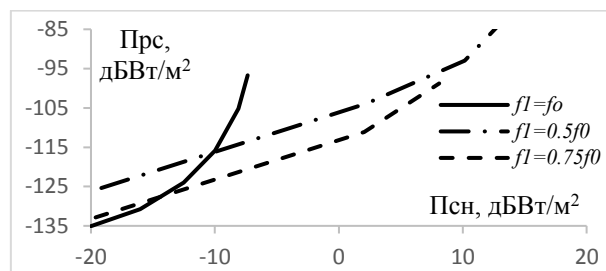


Рисунок 19 – АХ при значении антенного сопротивления $R_A=25$ Ом.

Второй подраздел данной главы посвящен исследованию пространственных свойств ДНР. Представлена методика расчёта диаграмм обратного нелинейного рассеяния (ДОНР), позволяющая вычислять зависимости плотности потока мощности РС от двух групп угловых величин (первая группа характеризует ориентацию рассеивающей части НР относительно фронта волны СН, вторая – относительно фронта волны РС) применимая для НР любой конструкции.

Искомые ДОНР могут быть получены путем последовательного расчёта величины $P_{PC}(P_{CH}, \vec{\theta})$ для каждого углового значения в отдельности, аналогично описанной ранее методике нахождения АХ, с той разницей, что фиксироваться должно значение плотности потока мощности СН P_{CH} , а значение наводимой в рассеивающей части НР ЭДС, должно вычисляться с учётом зависимости эффективной площади антенны S_{CH} от вектора угловых величин $\vec{\theta}$. Так были получены ДОНР для РС на частотах 2-й (рисунок 20) и 3-й гармоник (рисунок 21).

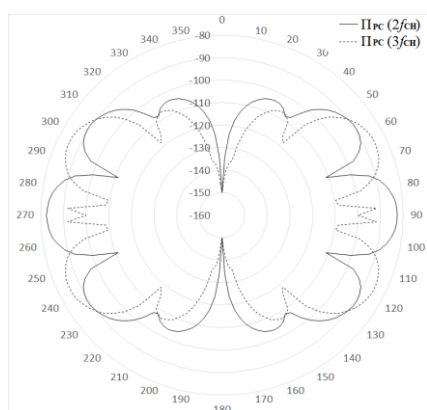


Рисунок 20 - ДОНР для $l=0,45$ м $f_{CH}=500$ МГц

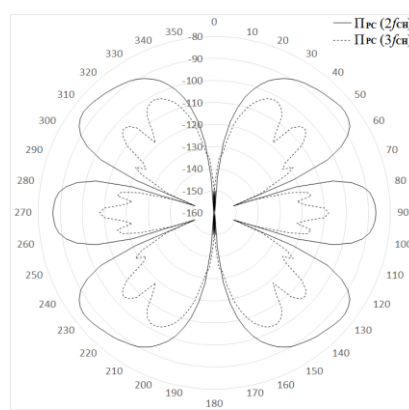


Рисунок 21 - ДОНР для $l=0,9$ м $f_{CH}=500$ МГц

Значительно упростить построение ДОНР можно используя АХ и известные значения величин $G_a(\vec{\theta}, \lambda_{PC})$, $G_a(\vec{\theta}, \lambda_{CH})$, рассчитанные для фиксированных углов $\vec{\theta}$. Указанные исходные данные позволяют вычислить величину плотности потока

мощность РС для любой ориентации НР, характеризуемой вектором $\vec{\theta}_1$, в любом направлении, характеризуемом вектором $\vec{\varphi}$, посредством следующих рассуждений. Если НР с ориентацией $\vec{\theta}_1$ облучать СН с плотностью потока мощности равной $\Pi_{\text{СН}}^*$, то им будет принята такая же мощность, которую примет НР с ориентацией $\vec{\theta}_0$, облучаемый СН с плотностью потока мощности:

$$\Pi_{\text{СН},\vec{\theta}_0} = K_{\text{СН}}(\vec{\theta}_1)\Pi_{\text{СН}}^*, \quad (9)$$

где $K_{\text{СН}}(\vec{\theta}_1) = G_a(\vec{\theta}_1, \lambda_{\text{СН}})/G_a(\vec{\theta}_0, \lambda_{\text{СН}})$. При одинаковой принятой мощности, величины протекающих в цепи НР токов не зависят от его ориентации, и, мощность РС НР с ориентацией $\vec{\theta}_1$ при его облучении $\Pi_{\text{СН}}^*$ окажется равной мощности РС НР с ориентацией $\vec{\theta}_0$ при его облучении $\Pi_{\text{СН},\vec{\theta}_0}$. Для этого значения плотности потока мощности СН по известной АХ может быть найдено значение плотности потока мощности РС $\Pi_{\text{РС},\vec{\theta}_0}$. Для НР с ориентацией $\vec{\theta}_1$ плотность потока мощности РС в направлении облучения будет отличаться на коэффициент:

$$\Pi_{\text{РС},\vec{\theta}_1} = K_{\text{РС}}(\vec{\theta}_1)\Pi_{\text{РС},\vec{\theta}_0}, \quad (10)$$

где $K_{\text{РС}}(\vec{\theta}_1) = G_a(\vec{\theta}_1, \lambda_{\text{РС}})/G_a(\vec{\theta}_0, \lambda_{\text{РС}})$. Указанная формула (10) применима и для любого иного направления распространения РС, характеризуемого вектором $\vec{\varphi}$, с тем отличием, что коэффициент усиления в числителе дроби должен быть заменён соответствующим этому направлению значением $G_a(\vec{\theta}_1, \vec{\varphi}, \lambda_{\text{РС}})$: $\Pi_{\text{РС},\vec{\theta}_1,\vec{\varphi}} = K_{\text{РС}}(\vec{\theta}_1, \vec{\varphi})\Pi_{\text{РС},\vec{\theta}_0}$, где $K_{\text{РС}}(\vec{\theta}_1, \vec{\varphi}) = G_a(\vec{\theta}_1, \vec{\varphi}, \lambda_{\text{РС}})/G_a(\vec{\theta}_0, \lambda_{\text{РС}})$.

Представленная методика позволяет реализовывать построение ДОНР в широкой полосе частот (рисунок 22 - 25).

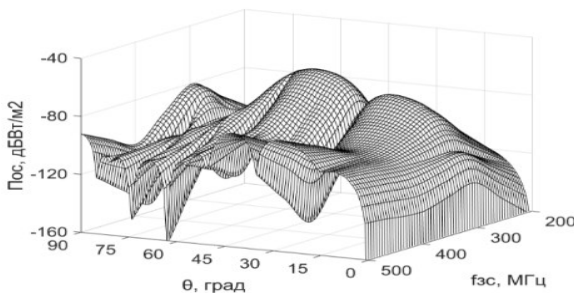


Рисунок 22. АХ для ответного сигнала на частоте 2-й гармоники ($l = 0,85\text{м}$).

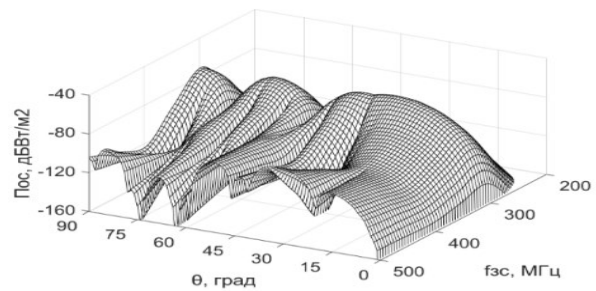


Рисунок 23. АХ для ответного сигнала на частоте 3-й гармоники ($l = 0,85\text{м}$).

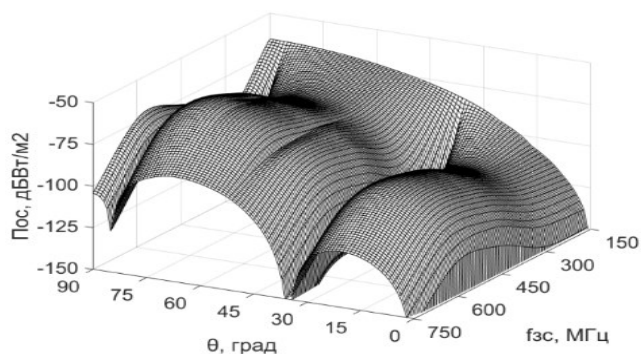


Рисунок 24. АХ для ответного сигнала на частоте 2-й гармоники ($l = 1,65\text{м}$).

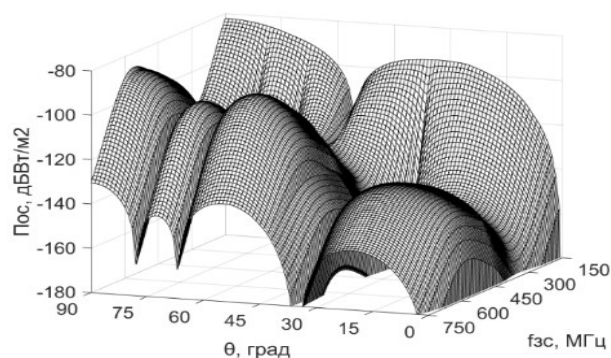


Рисунок 25. АХ для ответного сигнала на частоте 3-й гармоники ($l = 1,65\text{м}$).

Таким образом, анализ эквивалентной схемы ДНР с произвольным импедансом, нагруженного на полупроводниковый диод, при помощи моделирования процессов преобразования сигналов в программном комплексе LabVIEW позволяет учесть все процессы преобразования облучающего сигнала в переизлучаемый сигнал на частотах гармоник и построить АХ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основе процессной модели нелинейного рассеивателя решена задача определения уровня поля нелинейной помехи, переизлучаемой в произвольном направлении при этом:

- учитывается согласование рассеивающей и нелинейной частей;
- импеданс излучателя характеризуется частотнозависимыми активной и реактивной составляющими;
- нагрузка характеризуется вольт-амперной и вольт-фарадной характеристиками.

2. Предложена методика решения задачи вычисления помехового поля, создаваемого помеховым нелинейным рассеивателем в произвольной точке, окружающего пространства на основе использования его процессной модели. Для реализации методики априори должны быть известны:

- параметры источника сигнала, облучающего помеховый нелинейный рассеиватель;
- расстояние от источника сигнала, облучающего помеховый нелинейный рассеиватель, до помехового нелинейного рассеивателя и условия распространения облучающего сигнала на этом пути;

- коэффициент усиления нормированной диаграммы приемной антенны помехового нелинейного рассеивателя на частоте облучающего сигнала;
- амплитудная характеристика помехового нелинейного рассеивателя;
- нормированная диаграмма излучающей антенны помехового нелинейного рассеивателя на частоте переизлученного помехового сигнала;
- направление от помехового нелинейного рассеивателя на точку пространства, в которой определяются параметры помехового сигнала, расстояние до указанной точки от помехового нелинейного рассеивателя и условия распространения помехового сигнала на этом пути.

3. На основе разработанной численной модели широкополосного источника нелинейных помех, учитывающей процессы согласования импедансов рассеивающей части и нелинейной нагрузки, определены амплитудные характеристики биконического диполя, нагруженного на импульсный диод.

4. Для решения задач калибровки широкополосных нелинейных измерительных стендов разработана модель эталонного биконического излучателя, нагруженного на туннельный диод (ГИ103, 1И104Д). Определены оптимальные габаритные характеристики излучателя, построены амплитудно-частотные и калибровочные характеристики эталона, описана методика калибровки.

5. Разработаны численные модели и определены амплитудные и амплитудно-частотные характеристики узкополосных источников нелинейных помех в виде длинных тонких диполей, нагруженных на импульсный диод, либо на диод и колебательный контур.

6. Решена задача исследования пространственных свойств нелинейных рассеивателей по известным амплитудной характеристике и пространственным свойствам рассеивающей части. Полученное решение позволяет вычислять пространственно-частотные характеристики нелинейных рассеивателей дипольного типа в широкой полосе частот.

7. Произведены построение и сравнительный анализ диаграмм обратного нелинейного рассеяния от дипольных нелинейных рассеивателей, позволяющие оценить уровень нелинейной помехи на частотах второй и третьей гармоник сигнала

накачки в произвольном направлении при заданных параметрах, характеризующих ориентацию диполя относительно фронта волны сигнала накачки.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:

- 1) Бабанов, Н.Ю. О свойствах параметрического рассеивателя, необходимых для решения задач маркировки / Н.Ю. Бабанов, А.С. Корсаков, С.С. Корсаков, С.В. Ларцов // Вестник НГИЭИ (технические науки). - 2015. - N(57). - С.15-21.
- 2) Бабанов, Н.Ю. О расчете амплитудной характеристики биконического нелинейного рассеивателя, нагруженного на полупроводниковый диод / Н.Ю. Бабанов, С.С. Корсаков, С.В. Ларцов, А.В. Николаев, В.П. Самарин // Проектирование и технология электронных средств. - N1. – 2018. - С.18-26.
- 3) Бабанов, Н.Ю. Измерение параметров радиолокационных целей с нелинейными электромагнитными свойствами методом замещения / Н.Ю. Бабанов, С.С. Корсаков, А.В. Николаев, С.В. Ларцов // Датчики и системы. - 2019. - N2. - С.31-39.
- 4) Бабанов, Н.Ю. Об экспериментальном измерении уровня интенсивности вторичных нелинейных помех от электронных устройств с полупроводниковыми элементами / Н.Ю. Бабанов, С.В. Ларцов, С.С. Корсаков // Научные исследования в космических исследованиях Земли. - 2019. - Т.11. - N3. - С.14-23.
- 5) Бабанов, Н.Ю. Моделирование рассеяния электромагнитных волн на дипольных вибраторах с нелинейной нагрузкой / Н.Ю. Бабанов, С.С. Корсаков, С.В. Ларцов // Научные исследования в космических исследованиях Земли. - Т.9. - N6. - 2017. – С.36-43.
- 6) Корсаков, С.С. О расчёте амплитудной характеристики дипольного нелинейного рассеивателя с селективной схемой / С.С. Корсаков // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. - N4. – 2018. – С.67-75.

Другие публикации:

- 7) Бабанов, Н.Ю. О калибровке нелинейных радиолокационных измерительных стендов / Н.Ю. Бабанов, С.С. Корсаков, С.В. Ларцов // Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы 13-ой международной научно-

технической конференции ПТСПИ-2019, 3-5 июля 2019г.- Владимир: ВлГУ.- т.2. - 2019. - Стр.49-52.

8) Бабанов, Н.Ю. О возможности расчёта амплитудной характеристики биконического нелинейного рассеивателя, нагруженного на полупроводниковый диод / Н.Ю. Бабанов, С.С. Корсаков, С.В. Ларцов, А.В. Николаев, В.П. Самарин // III научно-техническая конференция «Радиолокация. Теория и практика», АО «ФНПЦ «ННИИРТ», Нижний Новгород, 13-14 сентября 2017г., Стр. 86-89;

9) Бабанов, Н.Ю. О возбуждении двухконтурных параметрических рассеивателей / Н.Ю. Бабанов, С.С. Корсаков, С.В. Ларцов // Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы 11-ой международной научно-технической конференции ПТСПИ-2015, Суздаль, 12-14 ноября 2015г.- Владимир: ВлГУ, Стр. 107-110.

10) Бабанов, Н.Ю. Использование фазовых свойств нелинейных рассеивателей для компенсации аппаратурных помех. / Н.Ю. Бабанов, С.С. Корсаков, С.В. Ларцов // Информационные системы и технологии ИСТ-2017. Материалы XXIII Международной научно-технической конференции.- Нижний Новгород: НГТУ, 2017., Стр. 1041-1045;

11) Бабанов, Н.Ю. Моделирование рассеяния электромагнитных волн на дипольных вибраторах с нелинейной нагрузкой / Н.Ю. Бабанов, С.С. Корсаков, С.В. Ларцов // III Всероссийская научно-техническая конференция «Теоретические и прикладные проблемы развития и совершенствования автоматизированных систем управления военного назначения». г. Санкт-Петербург, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, 22 ноября 2017г., Стр. 76-78;

12) Корсаков, С.С. Моделирование пространственных свойств диполей при воздействии бигармоническим сигналом / С.С. Корсаков // X Международная научная конференция «Шуйская сессия студентов, аспирантов, педагогов, молодых ученых», г. Шуя, 7-8 июня 2017г., Стр. 191-193.

Патент на изобретение

13) Пат. RU 2652150 С2. МПК H01Q 1/00. Полосковый мостовой пассивный нелинейный радиоответчик / Н.Ю. Бабанов, А.В. Клюев, С.С. Корсаков, А.А. Куликов, С.В. Ларцов, заявитель и патентообладатель НГТУ им. Р. А. Алексеева №2016136109; заявл.2016.09.07; опубл.2018.04.25.

Научное издание С.С. Корсаков
Моделирование свойств помеховых нелинейных рассеивателей
Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
Подписано в печать 15.10.2019. формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Тираж 100 экз. Заказ

Нижегородский государственный технический университет.
Типография НГТУ.
Адрес университета и полиграфического предприятия:
603950, ГСП-41, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

