

На правах рукописи



Чиков Николай Иванович

**МИКРОПОЛОСКОВАЯ РЕШЕТКА С НЕЛИНЕЙНЫМИ
ВКЛЮЧЕНИЯМИ НА ПОДЛОЖКЕ ИЗ МЕТАМАТЕРИАЛА**

специальность 05.12.07
«Антенны, СВЧ устройства и их технологии»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Таганрог – 2017 г.

Работа выполнена на кафедре Антенн и радиопередающих устройств Института радиотехнических систем и управления федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет».

Семенихина Диана Викторовна
 доктор технических наук, доцент, профессор кафедры
 Научный руководитель: АиРПУ
 (ИРТСУ ЮФУ, г. Таганрог)

Черкесова Лариса Владимировна
 доктор физико-математических наук, доцент
 Оппоненты: (ДГТУ, г. Ростов-на-Дону)

Горин Алексей Михайлович
 кандидат технических наук, доцент
 (АО «ГНИИС», г. Таганрог)
 Ведущая организация: АО «Конструкторское бюро по радиоконтролю систем
 управления, навигации и связи»
 (г. Ростов-на-Дону)

Защита состоится 16.03.2017 г., в 14:00 часов а ауд. Д-406 на заседании диссертационного совета Д 212.208.20 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет» по адресу: 347928, Ростовская область, г. Таганрог, ГСП-17А, пер. Некрасовский, д. 44.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке Южного федерального университета по адресу: ул. Зорге 21 ж, г. Ростов-на-Дону, Ростовская область, 344000 и на сайте:

<http://hub.sfedu.ru/media/diss/28990b41-7724-4f5b-8a49-5e993ee2590c/Диссертация.pdf>

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет».

Автореферат разослан «___» января 2017 г.

Ученый секретарь
 диссертационного совета Д 212.208.20
 кандидат технических наук, доцент



В.В. Савельев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и состояние вопроса. При разработке современных систем радиолокации гражданского или военного назначения возникают ситуации, в которых невозможно использовать стандартные средства для обнаружения объектов, находящихся в обстановке высокого фонового вторичного излучения (локация почвы, снежных завалов, железобетонных конструкций). Возникает необходимость разработки системы обнаружения, способной выделить сигнал от конкретной цели на фоне вторичного излучения. Одним из возможных решений данной проблемы является использование систем локации, в которые входят устройства с реализацией эффекта нелинейного рассеяния (ЭНР). В частности, в такую систему может входить нелинейный маркер или идентификатор, который осуществляет преобразование спектра падающего на него поля в спектр отраженного поля, в котором присутствуют новые частотные составляющие. Именно по новым частотным составляющим и происходит обнаружение того или иного объекта. Трудностью разработки такого устройства является обеспечение преобразования спектра падающего на него поля в спектр отраженного поля, в котором будут новые частотные составляющие, при том, что уровень основной составляющей (падающей) будет минимальным.

Еще одно применение ЭНР может найти в ситуации военного и промышленного шпионажа, когда возникает необходимость передачи информации по скрытым каналам связи. Для реализации таких систем можно использовать пассивные ретрансляторы с переносом спектра падающего на него поля в другой диапазон частот. Но при использовании пассивных ретрансляторов уровень переотраженного поля на частоте падающего поля существенно выше уровней кратных частотных составляющих, что ведет к усложнению электромагнитной обстановки.

Нелинейные маркеры и нелинейные ретрансляторы могут быть представлены нелинейными отражательными микрополосковыми решетками, в которых реализован ЭНР. Данные устройства могут быть изготовлены по технологии печатных плат, которая отличается высокой точностью, повторяемостью и технологичностью изготавливаемых образцов.

Современные теоретические и практические исследования нелинейных микрополосковых решеток показали возможность реализации ЭНР, но уровни кратных гармонических составляющих существенно ниже уровня основной гармоники в спектре отраженного поля.

В связи с развитием в СВЧ технике нового типа материалов, так называемых метаматериалов (ММ), возникает интерес к проведению исследования влияния ММ на отражательные свойства нелинейных

микрорешеток. Метаматериалы – это искусственно сформированные и особым образом структурированные среды, обладающие электромагнитными свойствами, сложно достижимыми технологически либо не встречающимися в природе.

Ранее не ставилась задача изучения влияния ММ на рассеяние электромагнитной волны (ЭМВ) от нелинейных структур. Это является основной предпосылкой проведения исследования в рамках данной работы.

Таким образом, существующие исследования и разработки нелинейных отражателей, покрытий и маркеров показывают возможность обогащения спектра отраженного поля, а недостатком устройств, реализующих подобные эффекты, является то, что в спектре отраженного поля уровень составляющей основной гармоники существенно превышает уровни кратных гармонических составляющих.

Цель диссертационной работы – повышение энергетических характеристик кратных частотных гармоник рассеянного электромагнитного поля до соизмеримых уровней с основной гармоникой для повышения эффективности работы микрорешетки с нелинейными нагрузками в составе нелинейных отражателей, покрытий или маркеров в системах нелинейной радиолокации.

Направления исследования

1. Решение электродинамической задачи рассеяния электромагнитных волн на плоской нелинейной микрорешетчатой периодической структуре на подложке из метаматериала.

2. Алгоритмизация задачи рассеяния для решетки микрорешетчатых элементов прямоугольной формы с поверхностными нелинейными нагрузками на подложке из метаматериала.

3. Исследование электродинамических свойств метаматериала, выбранного в качестве подложки.

4. Исследование путей повышения уровней высших гармоник поля, рассеянного нелинейной микрорешетчатой структурой на подложке из метаматериала.

5. Экспериментальные исследования характеристик рассеяния нелинейной микрорешетчатой структуры на подложке из метаматериала.

Методы исследования, достоверность и обоснованность результатов.

В работе использован метод электродинамического анализа структур с нелинейными включениями, который основывается на решении уравнений Максвелла с нелинейными граничными условиями. Решение поставленных задач сводится к бесконечной системе нелинейных интегральных уравнений, которая на

основании теоремы Флоке преобразуется к бесконечной системе нелинейных интегральных уравнений относительно поверхностных токов на одном периоде решетки и методом Галеркина сводится к бесконечной системе нелинейных алгебраических уравнений, которые численно решаются методом Бройдена. Результаты вычислений проверяются экспериментально. Достоверность полученных в работе результатов подтверждается применением метода интегральных уравнений, использованием многократно проверенных математических моделей нелинейных нагрузок, применением метода моментов, результатами тестирования алгоритма, сравнением значений коэффициентов отражения на кратных гармониках, полученных при независимых решениях, а также сравнением с тестовой программой, качественным совпадением теоретических и экспериментальных данных, верификацией поставленных экспериментов дополнительными измерениями и их численным моделированием.

На защиту выносятся следующие положения.

1. Электродинамический анализ методом интегральных уравнений на основе леммы Лоренца и нелинейных граничных условий (НГУ) показал возможность решения задачи рассеяния ЭМВ на нелинейной плоской микрополосковой структуре, подложка которой имеет частотную дисперсию электрофизических параметров, а также одновременно отрицательные значения этих параметров.

2. Модифицированный алгоритм решения задачи рассеяния плоской монохроматической электромагнитной волны нелинейной микрополосковой решеткой позволяет численно проводить анализ структур на подложке с дисперсионными частотными свойствами и отрицательными электрофизическими параметрами.

3. Численное моделирование выбранной подложки из ММ в виде DNG-структуры (double negative) и методика гомогенизации на основе комплексных коэффициентов отражения и прохождения показали возможность определения частотных свойств структуры, а также значений ее электрофизических параметров, которые можно использовать в задачах нелинейного рассеяния.

4. Численное моделирование с элементами конструктивного синтеза плоской нелинейной микрополосковой решетки на подложке из ММ позволяет определить параметры нелинейных элементов и размеры микрополосков, при которых уровни кратных гармоник в отраженном поле будут соизмеримы с уровнем основной гармоники.

5. Экспериментальное исследование подтверждает возможность выравнивания уровней гармонических составляющих в рассеянном поле от

нелинейной микрополосковой структуры за счет использования подложки из ММ, которая сохраняет дисперсионные свойства в составе нелинейного отражателя.

Научная новизна результатов исследования.

Впервые сформулирована и решена электродинамическая задача рассеяния плоской нелинейной микрополосковой структурой на подложке, которая имеет частотную дисперсию электрофизических параметров и одновременно отрицательные значения этих параметров.

Проведен конструктивный синтез микрополосковой решетки с целью максимизации уровней кратных гармонических составляющих в рассеянном от нее поле.

Проведена гомогенизация эффективных электрофизических параметров подложки.

Изучено влияние пространственно-резонансных свойств микрополосковой решетки и электрофизических свойств метаматериала на нелинейное рассеяние ЭМВ.

Опытным путем показана возможность выравнивания уровней кратных гармонических составляющих с основной гармоникой в спектре рассеянного поля от нелинейной микрополосковой решетки за счет использования подложки из метаматериала.

Практическая ценность результатов, полученных в диссертационной работе, состоит в следующем:

- получены новые знания в области исследования эффекта нелинейного рассеяния относительно влияния подложек из метаматериала на отражательные свойства микрополосковой решетки с нелинейными нагрузками;
- разработана модификация ранее существующего алгоритма решения задачи рассеяния электромагнитного поля (ЭМП) нелинейной микрополосковой структурой, позволяющая проводить численный анализ с учетом частотной дисперсии электрофизических параметров и одновременно отрицательных значений этих параметров подложки;
- выработаны рекомендации по выбору электрофизических и геометрических параметров исследуемой структуры для обеспечения минимально возможного уровня отражения на частоте падающего поля;
- изготовлен макет нелинейного отражателя, способного обогащать спектр рассеянного поля гармоническими составляющими, уровень которых соизмерим с уровнем основной гармоники.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях:

2015 Conference on Microwave Techniques (COMITE), Чехия; 2015 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), Италия; Международная конференция ИРЭМВ-2013, Россия; Международная конференция ИРЭМВ-2015, Россия; Ежегодная научная конференция студентов и аспирантов базовых кафедр ЮНЦ РАН 2015г.; XI Всероссийская научная конференция студентов и аспирантов КРЭС-2012г.; Конкурс «Молодой инноватор города Таганрога -2013».

Публикации. Основное содержание диссертационной работы отражено в 9 работах.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов основного текста и заключения. Работа содержит 147 с., в том числе 123 с. основного текста, 69 рисунков, 2 таблицы, список литературы из 61 наименований на 7 с.

Краткое содержание работы

В первой главе проведен обзор типов нелинейных нагрузок их моделирование и методы анализа нелинейных структур, обоснован выбранный метод электродинамического анализа. Приведены результаты численных и натурных экспериментов, проведенных сотрудниками ИРТСУ в г. Таганроге. Проведен обзор использования микрополосковых решеток с применением эффекта нелинейного рассеяния в радиотехнике. Рассмотрены модели метаматериалов в электродинамических задачах и обосновано использования методики гомогенизации на основе комплексных коэффициентов отражения и прохождения для определения электрофизических параметров ММ.

Во второй главе была сформулирована граничная задача на основе уравнений Максвелла с нелинейными граничными условиями для анализа бесконечной микрополосковой решетки с нелинейными нагрузками, расположенной на подложке с частотными дисперсионными свойствами и отрицательными электрофизическими параметрами. Получена система нелинейных интегральных уравнений относительно комплексных амплитуд гармоник поверхностного магнитного тока.

Постановка задачи сформулирована следующим образом. Пусть структура представляет собой бесконечный однородный слой ММ толщиной d , на одной из поверхностей которого располагаются микрополосковые элементы произвольной конфигурации, на другой – идеально проводящий экран. Между микрополосками могут быть включены нелинейные нагрузки (НН), ток через которые может течь вдоль оси x или y (рисунок 1).

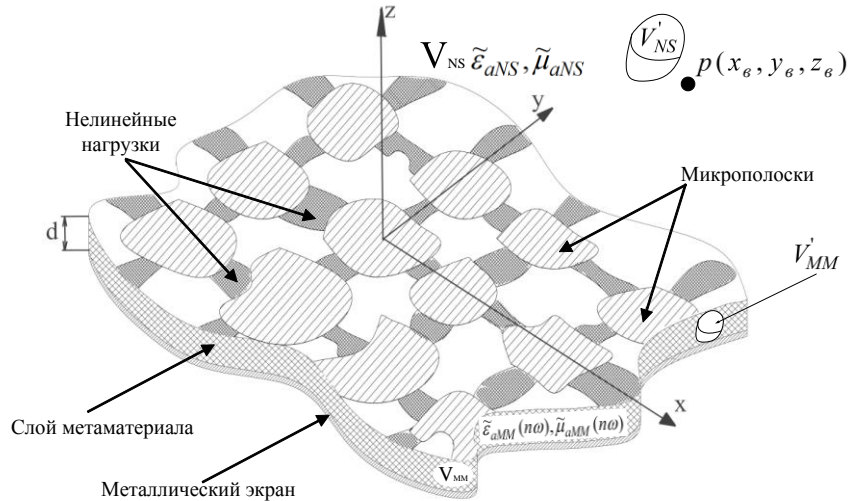


Рисунок 1 – Общий вид микрополосковой структуры

Область между экраном и плоскостью микрополосков, занятую ММ, обозначим через V_{MM} ; ММ описывается проницаемостями $\tilde{\epsilon}_{aMM}, \tilde{\mu}_{aMM}$. Среда V_{MM} задается веществом и обладает частотной дисперсией, т.е. $\tilde{\epsilon}_{aMM} = \tilde{\epsilon}_{aMM}(n\omega)$, $\tilde{\mu}_{aMM} = \tilde{\mu}_{aMM}(n\omega)$. Также параметры $\tilde{\epsilon}_{aMM}(n\omega)$ и $\tilde{\mu}_{aMM}(n\omega)$ могут быть одновременно отрицательными и менять знак в зависимости от частоты. Именно на этих особенностях описания параметров среды V_{MM} основывается ключевое отличие данной работы от ранее проведенных исследований.

Нелинейные нагрузки представлены поверхностными элементами, занимающими площадки $S_{нл1}$. Ток через нелинейные элементы (НЭ) может течь только в одном направлении: вдоль ось x или вдоль оси y . В частности, НЭ могут браться в виде сосредоточенных нагрузок.

Внешнюю полубесконечную область $z>0$, заполненную однородной изотропной линейной средой $\tilde{\epsilon}_{aNS}, \tilde{\mu}_{aNS}$, обозначим через V_{NS} .

В объеме V_{NS}' области V_{NS} и объеме V_{MM}' области V_{MM} заданы комплексные амплитуды плотностей объемных стороннего электрического $\vec{J}_1^{\epsilon c}, \vec{J}_2^{\epsilon c}$ и магнитного $\vec{J}_1^{mc}, \vec{J}_2^{mc}$ токов частоты $n\omega$.

С учетом того, что структура содержит НН, в областях V_{MM} и V_{NS} необходимо найти ЭМП, которое удовлетворяет граничным условиям на поверхностях раздела сред, уравнениям Максвелла и материальным уравнениям.

После задания граничных условий на поверхностях идеальных проводников, ММ, и НН, с помощью леммы Лоренца для частотной области выводились интегральные соотношения для полей:

$$\begin{aligned}
\vec{b}_1 \vec{H}_n^{NS}(p) &= - \int_{V_1} (\vec{j}_1^{\text{эс}}(q) \vec{E}_n^{MNS}(q, p) - \vec{j}_1^{mc}(q) \vec{H}_n^{MNS}(q, p)) dV_q - \\
&- \int_{S_1} \left\{ \vec{E}_n^{MNS}(q, p), \vec{H}_n^{NS}(q) \right\} - \left[\vec{E}_n^{NS}(q), \vec{H}_n^{MNS}(q, p) \right] \vec{n}_1 dS, \quad p \in V_{NS}; \\
\vec{b}_1 \vec{H}_n^{NS}(p) &= - \int_{V_1} (\vec{j}_1^{\text{эс}}(q) \vec{E}_n^{MNS}(q, p) - \vec{j}_1^{mc}(q) \vec{H}_n^{MNS}(q, p)) dV_q - \\
&- \int_{S_1} \left\{ \vec{E}_n^{MNS}(q, p), \vec{H}_n^{NS}(q) \right\} - \left[\vec{E}_n^{NS}(q), \vec{H}_n^{MNS}(q, p) \right] \vec{n}_1 dS, \quad p \in V_{NS}.
\end{aligned}$$

Неизвестными в полученной системе уравнений являются комплексные амплитуды полей $\vec{E}_n^{MNS, MM}$, $\vec{H}_n^{MNS, MM}$ на частотах $n\omega$ (n – номер частотной гармоники). Данные соотношения позволяют отыскать полное поле в любой точке верхнего полупространства и в слое метаматериала. Поля в области V_{MM} следует находить с учетом частотной дисперсии среды и возможными отрицательными электрофизическими параметрами. Эти свойства заключаются в особенностях задания коэффициента распространения $k_{MMn}(n\omega)$ для области V_{MM} .

Следующим этапом решения задачи является получение системы интегральных уравнений относительно гармоник поверхностных токов. Для этого использовалась теорема эквивалентных поверхностных токов.

В итоге получалась система уравнений, представляющая собой бесконечную систему нелинейных интегральных уравнений (СНИУ) относительно комплексных амплитуд гармоник токов на поверхности микрополосковой структуры.

Затем находились интегральные соотношения для полей рассеяния.

Пусть на структуру падает плоская монохроматическая электромагнитная волна, направление распространения которой в сферической системе координат задается углами θ_i, φ_i .

Вектор \vec{H}_n^i падающего поля описывается как

$$\vec{H}_n^i = (\delta_n^1 + \delta_n^{-1}) \vec{H}_0^i e^{ik_{1n}(\cos \varphi_i \sin \theta_i x + \sin \varphi_i \sin \theta_i y + \cos \theta_i z)}, \quad \text{где } \delta_n^{1,-1} = \begin{cases} 1, n=1, -1 \\ 0, n \neq 1, -1 \end{cases}.$$

Амплитуда $\vec{H}_0^i = H_0^i(-\vec{i}_x \cos \varphi_i \cos \theta_i - \vec{i}_y \sin \varphi_i \cos \theta_i + \vec{i}_z \sin \theta_i)$ в случае перпендикулярной поляризации, $\vec{H}_0^i = H_0^i(\vec{i}_x \sin \varphi_i - \vec{i}_y \cos \varphi_i)$ – в случае параллельной поляризации падающей ЭМВ.

Напряженности полного поля находятся в области V_{NS} через $\vec{H}_n^{NS} = \vec{H}_n^i + \vec{H}_n^s$, $\vec{E}_n^{NS} = \vec{E}_n^i + \vec{E}_n^s$, в области V_{MM} – $\vec{H}_n^{MM} = \vec{H}_n^T$, $\vec{E}_n^{MM} = \vec{E}_n^T$.

Рассеянное поле нелинейно нагруженной структуры на частоте $n\omega$ определяется из леммы Лоренца для рассеянных полей. В качестве вспомогательных полей выбираются поля, возбуждаемые магнитным диполем на

частоте $n\omega$. Диполь располагается в области V_{NS} или V_{MM} . Вспомогательные поля в областях V_{NS} и V_{MM} удовлетворяют граничному условию равенства нулю касательной составляющей вектора напряженности электрического поля при $z = 0, z = -d$.

Также учитывается, что комплексные амплитуды плотностей магнитных поверхностных токов можно выразить через комплексные амплитуды напряженности полного электрического поля. Применяется условие равенства касательных составляющих полных полей на границе раздела сред V_{NS} и V_{MM} при $z = 0$ на участках поверхности метаматериала, задав $\vec{b} = \vec{b}_1 = \vec{b}_2(z = 0), p \in S_1 - S_{n1}$.

В итоге была получена бесконечная СНИУ относительно гармоник поверхностного магнитного тока с учетом НГУ.

Затем решались вспомогательные задачи: внутренняя и внешняя. При решении внутренней задачи требовалось уделять внимание заданию некоторых электродинамических параметров.

Так, в особенностях задания коэффициентов распространения $k_{MMn}(n\omega)$ заключается учет ММ в качестве подложки. Когда ММ является DNG-структурой, то $\tilde{\epsilon}_{aMM}(n\omega) < 0$ и $\mu_{aMM}(n\omega) < 0$. Представим диэлектрическую и магнитную проницаемости в показательной форме:

$$\tilde{\epsilon}_{aMM}(n\omega) = |\tilde{\epsilon}_{aMM}(n\omega)|e^{i\pi}, \mu_{aMM}(n\omega) = |\mu_{aMM}(n\omega)|e^{i\pi}, \text{ где } e^{i\pi} = -1,$$

тогда коэффициент распространения в среде описывается выражением:

$$k_{MMn}(n\omega) = e^{i\pi}n\omega\sqrt{|\tilde{\epsilon}_{aMM}(n\omega)| \cdot |\mu_{aMM}(n\omega)|}, k_{MMn}(n\omega) = -n\omega\sqrt{|\tilde{\epsilon}_{aMM}(n\omega)| \cdot |\mu_{aMM}(n\omega)|}.$$

В случае, когда ММ на одних частотах приобретает свойства DNG-структуры, а на других свойства обычного диэлектрика, выражение для коэффициента распространения нужно переписать в виде:

$$k_{MMn}(\omega) = \begin{cases} -n\omega\sqrt{|\tilde{\epsilon}_{aMM}(n\omega)| \cdot |\mu_{aMM}(n\omega)|}, \tilde{\epsilon}_{aMM}(n\omega) < 0; \mu_{aMM}(n\omega) < 0 \\ n\omega\sqrt{|\tilde{\epsilon}_{aMM}(n\omega)| \cdot |\mu_{aMM}(n\omega)|}, \tilde{\epsilon}_{aMM}(n\omega) > 0; \mu_{aMM}(n\omega) > 0. \end{cases}$$

Таким образом, данное выражение, описывающее коэффициент распространения $k_{MMn}(n\omega)$ в области V_{MM} , включает два основных свойства ММ. Во-первых, учитывается частотная дисперсия подложки из ММ, в силу задания частотной зависимости электрофизических параметров $\tilde{\epsilon}_{aMM}(n\omega)$ и $\mu_{aMM}(n\omega)$. Во-вторых, учитывается возможность задания отрицательных параметров ММ на определенных частотных составляющих.

Таким образом, были получены выражения для полей в области V_{MM} , с учетом свойств подложки из ММ. Частотная дисперсия ММ учтена заданием частотной зависимости диэлектрической $\tilde{\epsilon}_{aMM}(n\omega)$ и магнитной $\mu_{aMM}(n\omega)$ проницаемостей, входящих в выражения коэффициента распространения. Возможность учета одновременно отрицательных значений диэлектрической и магнитной проницаемостей описывается в выражении для коэффициента распространения в области ММ.

В качестве модели микрополосковой структуры с нелинейными нагрузками рассмотрена бесконечная периодическая решетка микрополосковых элементов с включенными нелинейными нагрузками. Период расположения полосковых элементов по оси x равен d_1 , по оси y – d_2 . Ось z декартовой системы координат проходит через середину одного из периодов. Вдоль оси x периоды пронумерованы индексом M , вдоль оси y – индексом L . Период, через который проходит ось z , имеет номера $M=0, L=0$.

Если сторонний источник, расположенный в области V_{NS} , возбуждает плоскую ЭМВ, либо сторонним источником в области V_{MM} является периодическая решетка излучателей с периодами d_1 по x и d_2 по y , то, так как рассматриваемая структура – плоская, периодическая, выполняются условия теоремы Флоке.

Согласно теореме, плотность поверхностного магнитного или электрического тока $\vec{J}_n^{\varepsilon, m NS, MM}$ в точке (x, y) периода ML будет равна по амплитуде плотности поверхностного тока в точке (x_0, y_0) периода с индексами, равными нулю ($M=0, L=0$) и сдвинута по фазе относительно тока на нулевом периоде на величину, равную $(h_{1n}Md_1 + h_{2n}Ld_2)$.

Решение задачи сводится к рассмотрению одного периода решетки.

В силу сложности решения полученной системы уравнений, связанной с ее бесконечностью и нелинейностью, решение проводилось численными методами. Для реализации решения была проведена алгоритмизация задачи.

В качестве характеристик нелинейного рассеяния были выбраны коэффициенты отражения на согласной поляризации R_n^{ml} (нижний индекс указывает на номер частотной компоненты, верхние – на номер пространственной моды)

Вводился поляризационный базис

$$\vec{e}_1 = -\vec{i}_x \cos \varphi_i \cos \theta_i - \vec{i}_y \sin \varphi_i \cos \theta_i + \vec{i}_z \sin \theta_i, \vec{e}_2 = \vec{i}_x \sin \varphi_i - \vec{i}_y \cos \varphi_i.$$

Коэффициент отражения на согласной поляризации определяется как

$$R_n^{ml} = \frac{\vec{e}_1 \vec{H}_n^s}{\vec{e}_1 \vec{H}_n^i} \text{ - для горизонтальной, } R_n^{ml} = \frac{\vec{e}_2 \vec{H}_n^s}{\vec{e}_2 \vec{H}_n^i} \text{ - для вертикальной поляризации.}$$

Коэффициенты отражения на согласной поляризации на частоте $n\omega$ позволяют нам судить об уровне гармоник по отношению к основной частоте падающего поля.

Для решения полученной системы нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ) используется численный подход, основанный на методе Бройдена, реализованный в программе, написанной на языке FORTRAN.

Программа является модификацией ранее разработанной версии программы расчета характеристик рассеяния для нелинейной микрополосковой структуры, расположенной на подложке из диэлектрика. Первая отличительная черта модифицированной программы заключается в возможности ввода частотной зависимости электрофизических параметров ММ. Диэлектрическая и магнитная проницаемости для подложки из ММ описываются как переменные из трех выборок (три гармоники). Таким образом программа определяет ММ как частотно зависимую область, чего не было в оригинальном алгоритме.

Затем в программе описываются основные выражения, требуемые для дальнейшего расчета. Как говорилось ранее, влияние ММ учитывается в особой записи коэффициента распространения в области V_{MM} . В программе коэффициент распространения зависит от знака диэлектрической и магнитной проницаемостей, значения которых в свою очередь зависят от номера гармоники. Данный коэффициент задается через условный оператор так, что если диэлектрическая и магнитная проницаемости на n -й гармонике отрицательные, то коэффициент также отрицательный, если диэлектрическая и магнитная проницаемости на n -й гармонике положительные, то коэффициент также положительный. Значение номера гармоники меняется во внешнем цикле. На этом отрывке алгоритма основывается ключевое отличие модифицированной программы от оригинальной. После проведения всех расчётов, программа сохраняет полученные результаты амплитуд и фаз коэффициентов отражения на гармониках в файлы данных, которые обрабатываются во внешней программе MATCAD.

Тестирование программы проводилось сравнением зависимостей коэффициентов отражения на основной и кратных гармониках от параметров нелинейной нагрузки a_1, a_2 (коэффициенты полинома вольтамперной характеристики (ВАХ) $i^3(u) = a_1 u + a_2 u^2 + a_3 u^3$), рассчитанных для модели с подложкой из диэлектрика в оригинальной программе и модифицированной программе. В ходе тестирования показана высокая степень соответствия результатов, полученных в модифицированной программе, с оригинальной.

Следующий этап тестирования программы – тестирование осуществлялось сравнением значений коэффициентов отражения на кратных гармониках, полученных при независимых решениях. Результаты тестирования также подтвердили достоверность разработанного алгоритма.

В третьей главе проведен численный анализ выбранного метаматериала в виде DNG-структуры.

Элементарная ячейка в такой структуре представляет собой кольцевой резонатор, который обеспечивает отрицательные значения эффективной магнитной проницаемости, и линейный проводник, который обеспечивает отрицательные значения эффективной диэлектрической проницаемости. Резонатор и линейный проводник размещаются на диэлектрической подложке из материала FR-4. Моделирование проводилось в САПР СВЧ Ansys HFSS. Задавался канал Флоке, и вычислялись комплексные коэффициенты отражения и прохождения (модули коэффициентов отражения и прохождения показаны на рисунке 3), на основе которых, путем гомогенизации, находились диэлектрическая и магнитная проницаемости (рисунок 4).

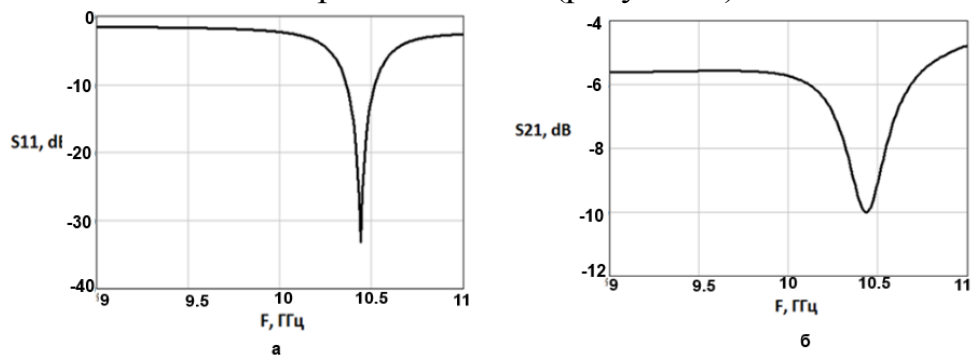


Рисунок 3 – ЧХ модулей коэффициентов ММ: а – отражения, б – прохождения

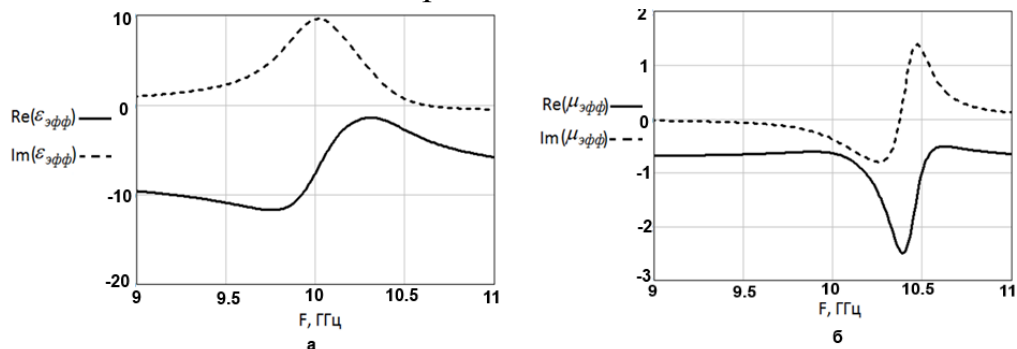


Рисунок 4 – ЧХ комплексных эффективных проницаемостей модели ММ: а – диэлектрической, б – магнитной

Низкие значения коэффициента отражения и прохождения обусловлены высокими значениями тангенса диэлектрических и тангенса магнитных потерь.

После определения электрофизических параметров ММ они использовались в задачах рассеяния микрополосковой нелинейной решетки, расположенной на подложке из ММ. Первым этапом расчета было определение влияния ММ на отражательные свойства нелинейной решетки. Проводился расчет зависимостей коэффициентов отражения на основной и кратных гармониках от параметров нелинейных нагрузок (коэффициентов ВАХ НН) при размещении микрополосков и НН на подложке из обычного диэлектрика (FR-4; $\epsilon_{эфф} = 4,4$; $\mu_{эфф} = 1$) и на подложке из ММ. Как говорилось ранее, ММ описывается в программе как вещество с параметрами $\epsilon_{эфф}(\omega)$, $\mu_{эфф}(\omega)$.

На рисунке 5 представлены типичные зависимости коэффициентов отражения от параметров НН. Очевидно, что использование ММ способствует выравниванию уровней кратных гармонических составляющих с уровнем основной за счет подавления основной гармоники в отраженном поле.

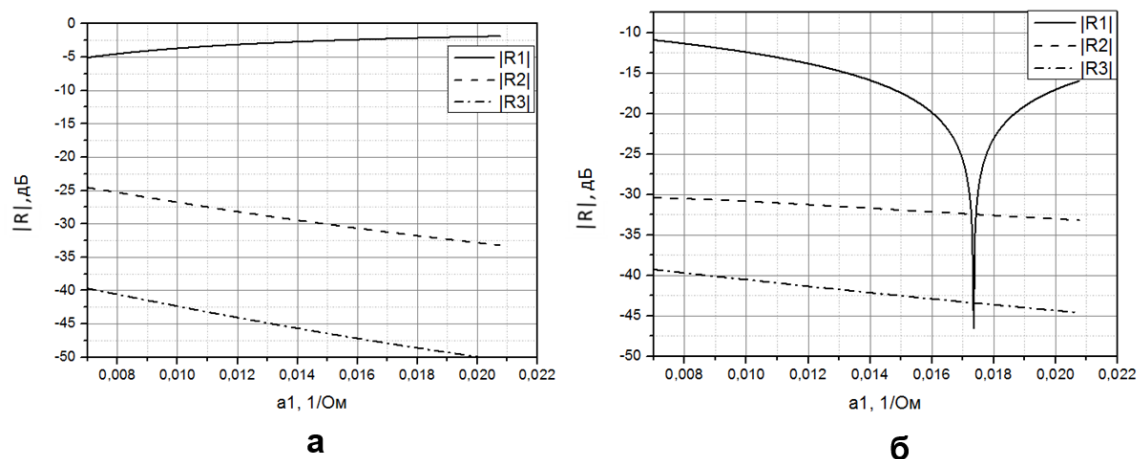


Рисунок 5 – Типичные зависимости коэффициентов отражения микрополосковой решетки от параметров НН (а) – на подложке из FR-4, (б) – на подложке из ММ

Анализ частотных свойств коэффициентов отражения нелинейной микрополосковой решетки с ММ показал взаимосвязь с частотными свойствами «чистого» ММ, то есть ММ, примененный в качестве подложки нелинейной отражательной структуры, не теряет свои частотные свойства.

Проведенный конструктивный синтез микрополосковой решетки позволил определить размеры микрополосков, при которых нелинейная отражательная решетка будет работать эффективнее за счет увеличения уровня отраженного поля на кратных гармониках.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных исследований макета выбранной подложки из ММ и макета микрополосковой решетки с нелинейными нагрузками на подложке из ММ.

Экспериментальные исследования подложки (рисунок 6) выполнены для определения ее электродинамических свойств.

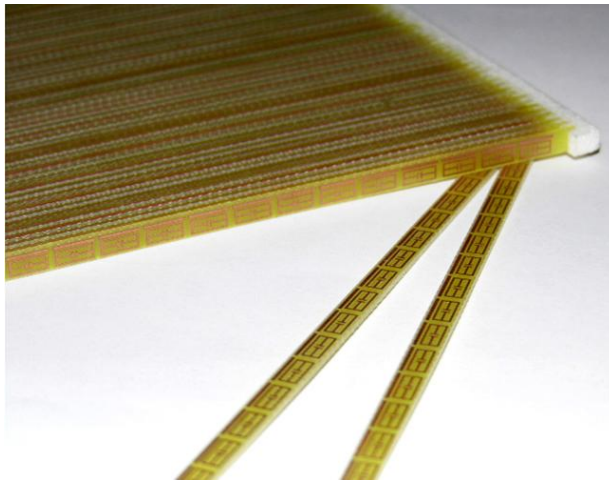


Рисунок 6 – Макет подложки из метаматериала

На основе измеренных комплексных параметров S_{11} и S_{21} были рассчитаны эффективные диэлектрическая и магнитная проницаемости (рисунок 7).

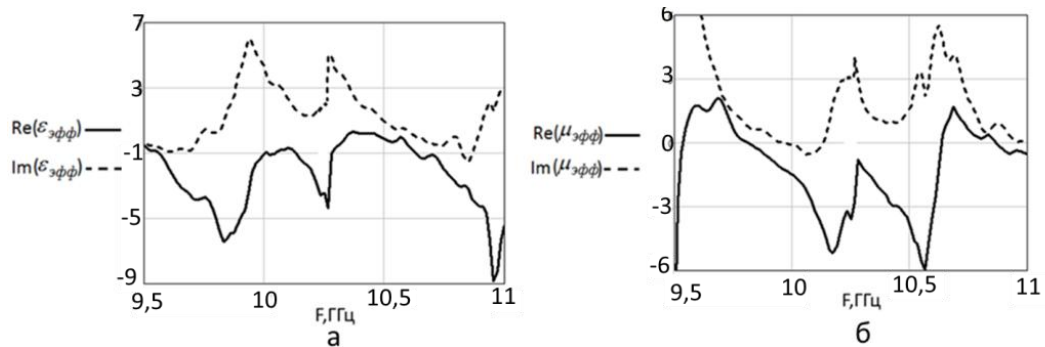


Рисунок 7 - Частотные зависимости комплексных эффективных проницаемостей ММ: а – диэлектрической, б – магнитной

Затем измерялись поля рассеяния на основной гармонике и на второй гармонике от нелинейной микрополосковой структуры (рисунок 8).

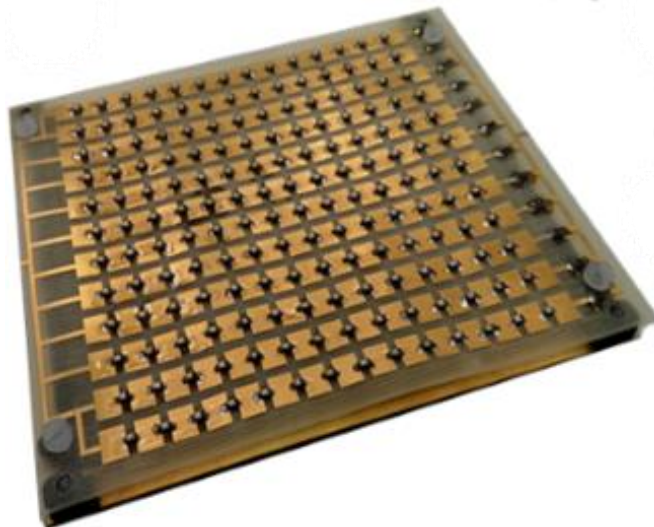


Рисунок 8 – Нелинейная микрополосковая решетка на подложке из ММ
Измерялись рассеянные поля для случаев использования подложки из ММ и без нее (рисунок 9).



Рисунок 9 – ЧХ первой (а) и второй (б) гармоники поля, рассеянного макетом с подложкой из ММ (кривая 1) и воздуха (кривая 2) в «обратном» направлении

Использование подложки из ММ способствовало повышению уровня коэффициента отражения на второй гармонике относительно первой. На нижней частоте полосы подавления (под полосой подавления подразумевается уровень -10 дБ коэффициента отражения основной гармоники) относительный уровень второй гармоники вырос в 10 раз, на резонансной частоте – в 50 раз и на верхней частоте – в 6 раз.

Заключение

В ходе диссертационного исследования «Микрополосковая решетка с нелинейными включениями на подложке из метаматериала» были получены новые теоретические и практические знания в области нелинейного рассеяния.

Впервые поставлена и решена задача нелинейного рассеяния на микрополосковой решетке с нелинейными нагрузками, которая располагается на подложке из метаматериала.

Разработка теоретических положений на основе электродинамического анализа методом интегральных уравнений на основе леммы Лоренца и НГУ показала возможность решения задачи рассеяния ЭМВ на нелинейной плоской микрополосковой структуре, подложка которой имеет частотную дисперсию электрофизических параметров, а также одновременно отрицательные значения этих параметров.

Модифицированный алгоритм решения задачи рассеяния плоской монохроматической электромагнитной волны нелинейной микрополосковой решеткой позволил численно проводить анализ структур на подложке с дисперсионными частотными свойствами и отрицательными электрофизическими параметрами.

Проведенное численное моделирование выбранной подложки из ММ в виде DNG-структуры и методика гомогенизации на основе комплексных коэффициентов отражения и прохождения показали возможность определения частотных свойств структуры и значений ее электрофизических параметров, которые можно использовать в задачах нелинейного рассеяния.

Проведенное численное моделирование с элементами конструктивного синтеза плоской нелинейной микрополосковой решетки на подложке из ММ позволило определить параметры нелинейных элементов и размеры микрополосков, при которых уровни кратных гармоник в отраженном поле будут соизмеримы с уровнем основной гармоники.

Экспериментальные исследования впервые подтвердили возможность выравнивания уровней гармонических составляющих в рассеянном поле от нелинейной микрополосковой структуры за счет использования подложки из ММ, которая сохраняет дисперсионные свойства.

Таким образом, за счет использования ММ в качестве подложки нелинейной микрополосковой решетки впервые достигнуты уровни кратных гармоник соизмеримые с уровнем основной гармоники в рассеянном от решетки поле. Выравнивание уровней происходит за счет снижения уровня основной гармоники.

Полученные результаты позволили заключить, что нелинейная микрополосковая решетка на подложке из метаматериала может служить основой для создания нелинейных маркеров и идентификаторов в задачах обнаружения людей, терпящих бедствия, в условиях высокого уровня фонового излучения. Подбор электрофизических и геометрических параметров решетки в совокупности с подбором типов нелинейного элемента позволяют повышать относительные уровни той или иной кратной спектральной составляющей в рассеянном поле.

Перспективным направлением исследований является изучение влияния ММ на свойства рассеяния нелинейных структур при использовании в качестве покрытия, что могло бы обеспечить снижение радиолокационной заметности объектов в требуемых направлениях на основной гармонике. Другим перспективным направлением является изучение других типов ММ (ENG, MNG) на свойства рассеяния ЭМВ от нелинейных структур, а также исследование нелинейной решетки на подложке из ММ с более широкой полосой подавления для эффективного использования в области радиолокации. Таким образом, требуется дальнейшее исследование влияния метаматериалов на отражательные свойства нелинейных структур.

**Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 9 работ:
В изданиях из перечня ВАК**

1. Чиков Н.И. Электродинамическое моделирование отражающей нелинейной микрополосковой структуры с использованием DNG-материала в качестве подложки//Изв. ЮФУ. Технические науки, 2013 № 11, с 135-141.

2. Semenikhina D. V., Semenikhin A. I., Chikov N. I. Analysis of nonlinear microstrip lattice with metamaterial substrate using method of integral equations// 2015 Conference on Microwave Techniques (COMITE) 22-23 April 2015. INSPEC Accession Number:15201612, ISBN:978-1-4799-8121-2, p. 1-4.

3. Д.В. Семенихина, Н.И. Чиков, А.И. Семенихин, Н.Н. Горбатенко. Электродинамический анализ и конструктивный синтез нелинейной микрополосковой решетки с подложкой из метаматериала.// Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2015. N7. URL: <http://jre.cplire.ru/iso/jul15/8/text.pdf>

4. D. V. Semenikhina, N. I. Chikov, A. I. Semenikhin, Y. V. Yukhanov. A model of nonlinear microstrip lattice with metamaterial substrate. 2015 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA) 7-11 Sept. 2015 INSPEC 15523539. p. 211 - 214.

5. Д.В. Семенихина, Н.И. Чиков, А.И. Семенихин, Н.Н. Горбатенко. Экспериментальные исследования нелинейной микрополосковой решетки на подложке из метаматериала // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2016. N4. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/apr16/7/text.pdf>

В других изданиях

6. Чиков Н.И. Применение метаматериала в качестве подложки нелинейной отражающей микрополосковой структуры. // Сборник материалов Ежегодной научной конференции студентов и аспирантов базовых кафедр ЮНЦ РАН. Изд-во ЮНЦ РАН, 2013. С. 130-131.

7. Семенихина Д.В., Чиков Н.И. Исследование отражающей нелинейной микрополосковой структуры с использованием метаматериалов в качестве подложки//Труды Международной научной конференции «ИРЭМВ - 2013», Таганрог, Изд – во ГТИ ЮФУ, 2013, с.419-424.

8. Горбатенко Н.Н., Семенихина Д.В., Чиков Н.И. Использование метаматериала в качестве подложки нелинейной микрополосковой структуры. // Приволжский научный вестник, ISSN, 2224-0179 № 4-1 (44) апрель 2015, с. 18 -20.

9. Д.В. Семенихина, Н.И. Чиков. Электродинамический анализ нелинейной микрополосковой решетки с подложкой из метаматериала с элементами конструктивного синтеза// Труды Международной научной конференции «ИРЭМВ - 2015», Таганрог, Изд – во ЮФУ Ростов-на-Дону, 2015, с. 270-274.

Сдано в набор 22.12.2016 г. Подписано в печать 23.12.2016
Бумага офсетная. Ротапринт. Гарнитура
Times News Romans. Формат 60 x 84 1/16.
Объем 1,0 п. л. Тираж 100 экз. Заказ № 1022
Отпечатано в типографии «АртИкс»,
г. Ростов-на-Дону, пр. Ворошиловский, 78, тел. 290-46-42