

УДК: 621.37/.39;621.38; 621.37; 621.39

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ МИКРОПОЛОСКОВОЙ РЕШЕТКИ НА ПОДЛОЖКЕ ИЗ МЕТАМАТЕРИАЛА

Д. В. Семенихина, Н. И. Чиков, А. И. Семенихин, Н. Н. Горбатенко
Южный Федеральный Университет, г. Таганрог

Статья поступила в редакцию 10 апреля 2016 г.

Аннотация: В работе проводится исследование отражательных свойств макета нелинейной микрополосковой решетки с подложкой из ММ для подтверждения возможности выравнивания кратных гармонических составляющих в отраженном от нее поле. Экспериментально получены комплексные частотные характеристики отражения и прохождения макета подложки микрополосковой решетки из метаматериала (ММ). На их основе проводится процесс гомогенизации с целью подтверждения работоспособности макета ММ и оценки точности электродинамической модели.

Ключевые слова: метаматериал, DNG-структура, нелинейное рассеяние, микрополосковая решетка, гомогенизация.

Abstract. In this paper the reflective properties of a layout of a nonlinear microstrip lattice with the substrate of the MM are studied to confirm the possibility of aligning multiple harmonic components of the reflected field. The complex frequency characteristics of the reflection and transmission for the layout of the microstrip substrate from the metamaterial were experimentally obtained. On this basis, the process of homogenization is conducted to confirm operability of the layout MM and evaluation the accuracy of the electrodynamic model.

Keywords: metamaterial, DNG-structure, nonlinear scattering, microstrip lattice, homogenization.

Введение

Практическое применение эффекта нелинейного рассеяния (ЭНР)

охватывает достаточно широкую область радиотехники. Одним из направлений является использование нелинейных рассеивателей [1] для обнаружения людей, попавших в бедствия (заблудившихся в лесу, заваленными лавинами и т.п.). Также нелинейные рассеиватели могут быть использованы в качестве идентификаторов, которые размещаются на товарах в магазинах, грузовых контейнерах, автомобилях или в качестве пассивных ретрансляторов в системах беспроводной связи, бесфидерных датчиков электромагнитного поля.

Использование ЭНР в перспективе позволит создавать пассивные ретрансляторы, которые смогут передавать данные по скрытым каналам связи на частотах кратных гармоник. Также появляется возможность создавать маскирующие покрытия, которые будут отражать поля на частотах кратных гармоник.

В случаях последних двух применений сталкиваются с тем, что чаще всего отраженный сигнал имеет в своем спектре уровень основной гармоники существенно выше, чем уровни кратных гармоник. Это резко снижает эффективность работы устройства. Основной задачей в этом случае является выравнивание уровней кратных гармоник в спектре отраженного сигнала с уровнем основной гармоники.

Наиболее предпочтительным способом реализации ЭНР является использование отражательных микрополосковых решеток, нагруженных нелинейными элементами (НЭ). Микрополосковые решетки отличаются простотой исполнения и разнообразием используемых микрополосков [9]. В тоже время, НЭ представлены широким выбором устройств, отличающихся диапазоном рабочих частот, электрофизическими свойствами, возможностью создавать схемы с управляемыми во времени параметрами и др.

Для решения задачи выравнивания уровней кратных составляющих в отраженном поле нами предлагается использование в качестве подложки микрополосковой решетки слой из ММ. Так, в последнее время, ММ широко используются в антенной технике, например, в работе [2] обсуждается использование ММ для миниатюризации антенн, обеспечения высокого

коэффициента усиления, коэффициента полезного действия, многочастотного режима работы, повышения частотной избирательности и чувствительности, формирования требуемых обратных потерь, обеспечения широкоугольного согласования входного сопротивления микрополосковых антенных решеток в заданной полосе частот. С другой стороны, ММ обладает частотной дисперсией. Его параметры – комплексные (в общем случае) диэлектрическая $\varepsilon_{эфф}$ и магнитная $\mu_{эфф}$ проницаемости зависят от частоты [3]. Это позволяет одну и ту же подложку рассматривать на одних частотах – как ММ, на других (например, кратных частотах) – как «обычный» диэлектрик.

Целью работы является экспериментальное подтверждение возможности выравнивания уровней кратных гармонических составляющих с уровнем основной гармоники в поле отраженного от нелинейной микрополосковой решетки сигнала с помощью подложки из ММ, выполненной в виде DNG-структуры (*double negative*).

1. Экспериментальный анализ DNG-структуры. Гомогенизация параметров макета ММ

В качестве ММ было решено использовать структуру, предложенную в работе [4]. Элементарная ячейка в такой структуры представляет собой кольцевой резонатор, который обеспечивает отрицательные значения магнитной проницаемости, и линейный проводник, который обеспечивает отрицательные значения диэлектрической проницаемости (рис. 1, а, б).

Численный анализ модели бесконечной решетки ММ проводился с использованием САПР для расчета электродинамических структур. В ходе моделирования были получены комплексные коэффициенты отражения и прохождения ММ. На их основе, используя методику гомогенизации параметров ММ, предложенную в [5], рассчитываются эффективные значения параметров (рис. 1 в, г); $\varepsilon_{эфф} = -2,17 + i1,34$, $\mu_{эфф} = -1,63 + i1,22$ на резонансной частоте F_p .

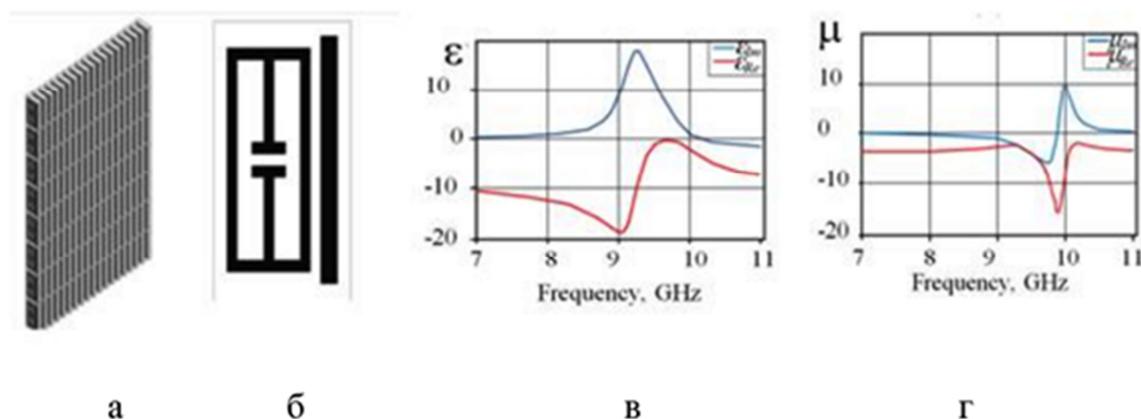


Рисунок 1. – Фрагмент слоя ММ (а); структура одиночного элемента ММ (б); эффективная диэлектрическая проницаемость ММ (в); эффективная магнитная проницаемость ММ (г)

Для подтверждения данных, полученных в ходе численного эксперимента, был изготовлен макет ММ (рис. 2). Структура представляет собой набор диэлектрических пластинок из материала FR-4 толщиной 1 мм, на поверхности которых нанесена топология ММ. Пластинки размещались с шагом 1 мм.

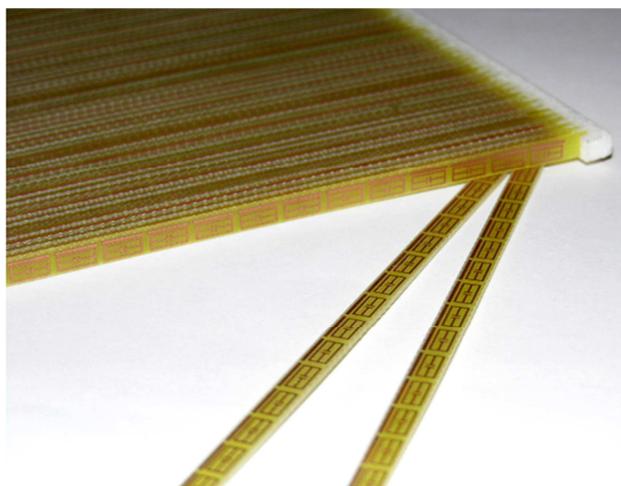


Рисунок 2 – Макет ММ

На рис. 3 приведена схема установки для проведения измерения коэффициента отражения и прохождения макета ММ. На рис. 4 показана экспериментальная установка для проведения измерения характеристик ММ.

В ходе эксперимента были получены комплексные коэффициенты отражения (рис. 5, а) и прохождения (рис. 5, б), а также модули коэффициентов отражения (рис. 6, а) и прохождения (рис. 6, б) изготовленного ММ.

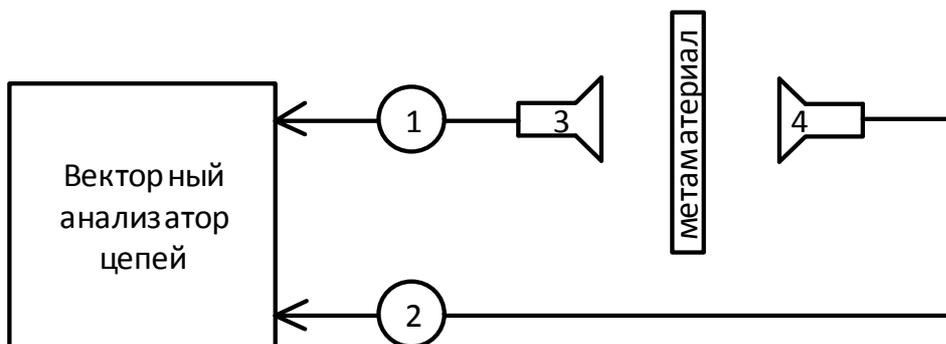


Рисунок 3– Схема стенда для измерения параметров ММ (1,2 – кабельные сборки SMA-SMA, 3,4 – рупорные антенны)

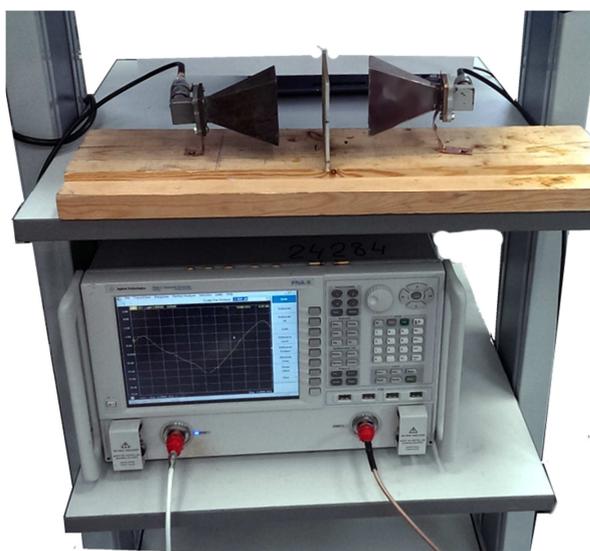


Рисунок 4. – Стенд для измерения параметров ММ

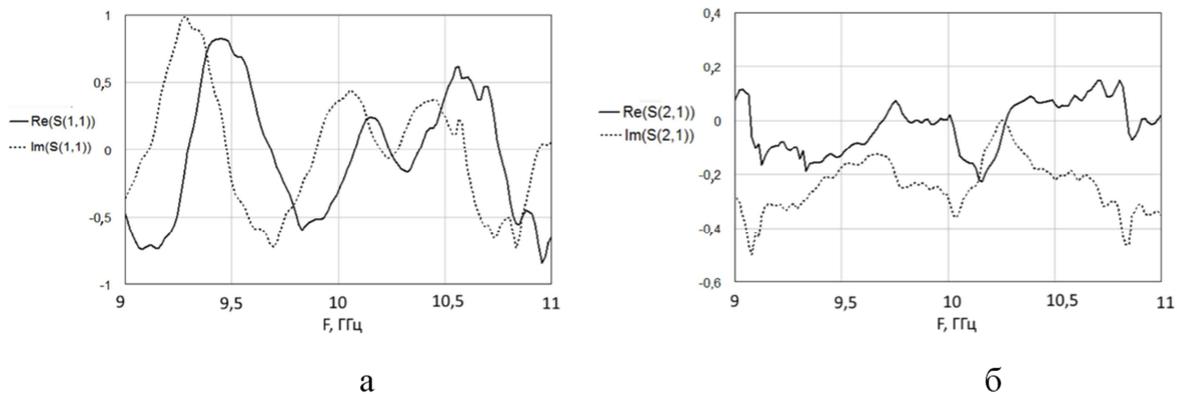


Рисунок 5. – ЧХ измеренных комплексных коэффициентов отражения (а) и прохождения (б) ММ

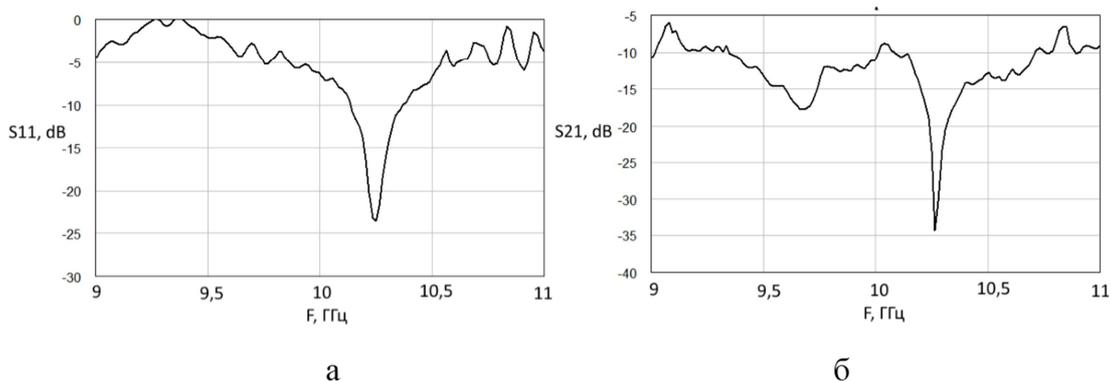


Рисунок 6 – ЧХ измеренных модулей коэффициентов отражения (а) и прохождения (б) ММ

Далее, с использованием методики гомогенизации параметров ММ [5], были получены комплексные эффективные диэлектрическая и магнитная проницаемости в диапазоне частот (рис. 7).

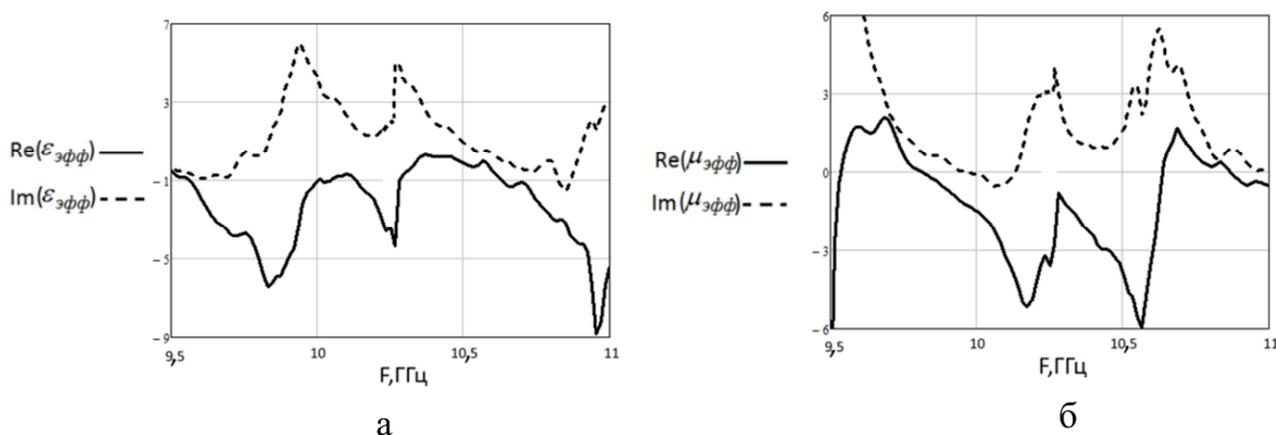


Рисунок 7 – ЧХ комплексных эффективных диэлектрической (а) и магнитной (б) проницаемостей макета ММ

Для изготовленного макета DNG-структуры на резонансной частоте F_p получены следующие значения комплексных проницаемостей ($\epsilon_{эфф} = \epsilon' + i\epsilon''$, $\mu_{эфф} = \mu' + i\mu''$) $\epsilon_{эфф} = -2,37 + i1,35$, $\mu_{эфф} = -1,89 + i1,9$. Полученные значения проницаемостей для макета ММ имеют несущественное отличие от параметров модели.

Стоит обратить внимание на тот факт, что реальные части проницаемостей имеют отрицательные значения, а мнимые части – положительные значения. Это отвечает условию антипараллельности векторов Пойнтинга и вектора фазовой скорости, что записывается как $\epsilon'\mu'' + \mu'\epsilon'' < 0$ [8].

Таким образом, проведенные измерения параметров макета (коэффициентов отражения и прохождения, эффективных диэлектрической и магнитной проницаемости) изготовленного ММ подтвердили достаточную точность модели. Также экспериментальным путем было показана возможность подавления отраженного от ММ сигнала на определенной частоте. Это объясняется тем, что эффективные диэлектрическая и магнитная проницаемости имеют мнимые составляющие, что говорит о потерях в структуре на данной частоте, и происходит поглощение электромагнитной энергии.

2. Экспериментальные исследования нелинейной микрополосковой структуры на подложке из метаматериала

Ранее в работах [6], [7] проводился электродинамический анализ нелинейной микрополосковой решетки с подложкой из рассмотренного выше ММ. Были получены численные результаты в виде коэффициентов отражения от структуры на основной и кратных гармониках. Результаты показали возможность выравнивания уровней кратных гармоник благодаря использованию подложки из ММ.

Для подтверждения численных результатов был изготовлен макет нелинейной микрополосковой решетки на подложке из ММ.

Микрополосковая решетка, как и элементы ММ, изготавливались методом фрезерования печатных плат. Топология микрополосков располагалась на одной стороне диэлектрической подложки из материала FR-4 толщиной 0,2 мм. Размеры микрополосков и период между ними выбирались так, чтобы по оси y микрополосков перекрывал один период ММ, а по оси x два периода ММ. Между микрополосками напайвались отечественные безкорпусные детекторные диоды на основе арсенида галлия (GaAs) марки 3A206A-6. На

рисунке 8 представлены внешний вид (рис. 8, а) и ВАХ ((рис. 8, б) данного диода.

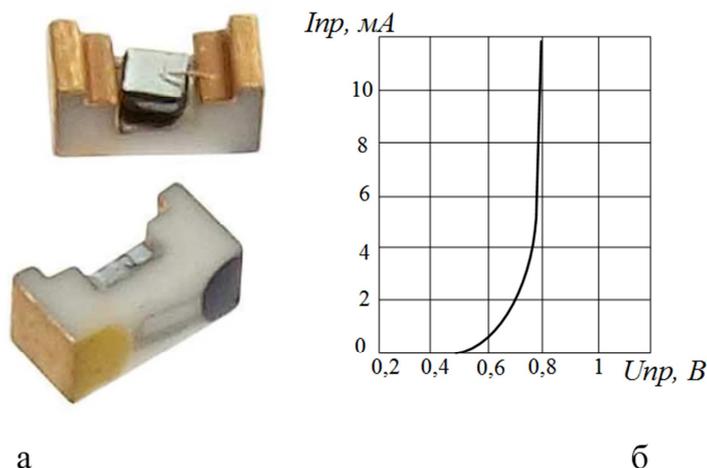


Рисунок 8 – Внешний вид (а) и ВАХ (б) детекторного диода 3A206A-6

Составные части ММ (диэлектрические пластинки с топологией) устанавливались в гребенчатые планки, изготовленные методом 3D печати из ABS пластика, в которых были изготовлены крепежные элементы в виде бобышек с резьбовыми отверстиями. Микрополосковая решетка с питаемыми диодами крепилась на структуре ММ пластиковыми винтами. Собранный структура ММ с установленной на него нелинейной микрополосковой решеткой ставилась на экран, представляющий собой печатную плату с односторонней сплошной металлизацией. На рисунке 9 показан макет с указанием составных частей.

После сборки макета проводились измерения его параметров. Первым этапом измерения являлось определение положения частоты F_p , на которой происходит наименьшее отражение от структуры. Для этого собиралась измерительная установка (рис. 4), схема которой изображена на рис. 3 и измерялся коэффициент отражения S_{11} (см. рис. 10).

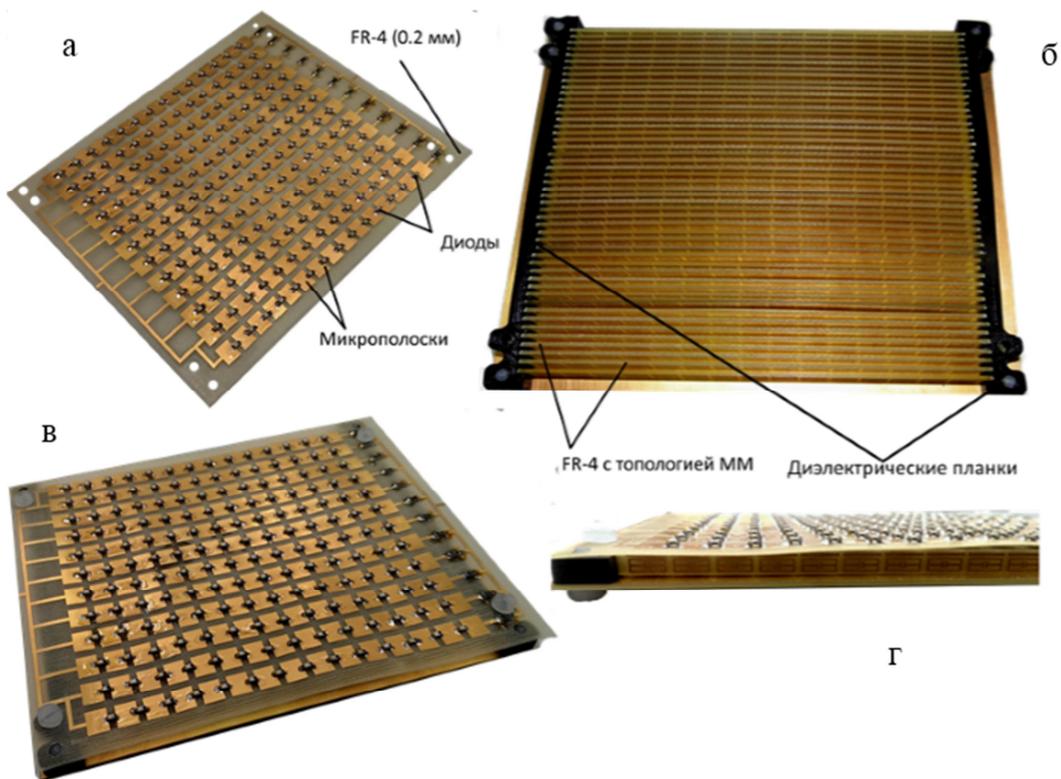


Рисунок 9. – а – Микрополосковая решетка с диодами 3A206A-6; б – ММ на экране; в – нелинейная микрополосковая решетка на подложке из ММ (вид сверху); г – нелинейная микрополосковая решетка на подложке из ММ (вид сбоку)

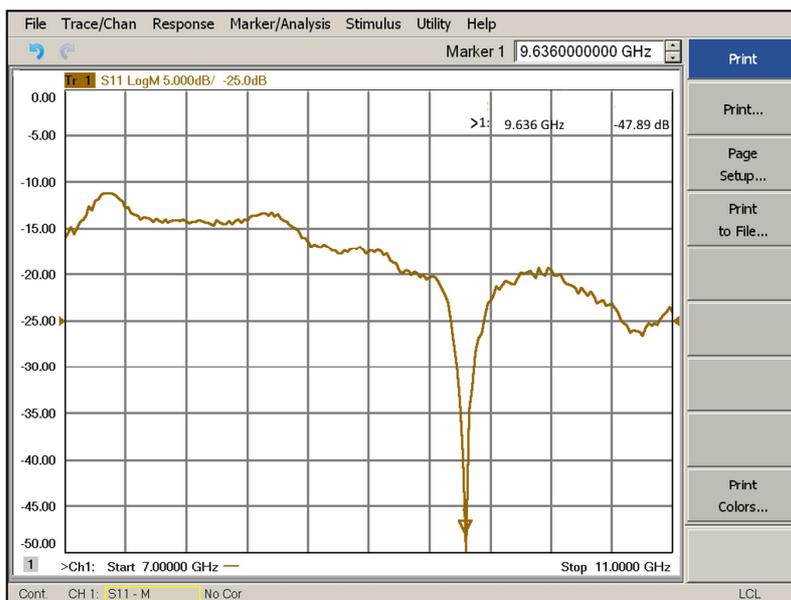


Рисунок 10. – ЧХ коэффициента отражения основной гармоники нелинейной микрополосковой решетки с подложкой из ММ

Из рисунка видно существенное уменьшение отраженного сигнала на частоте $F_p=9,636$ ГГц.

После определения значения F_p проводилось измерение коэффициентов отражения при падении монохроматической волны на структуру. Для этого собиралась установка по схеме, показанной на рис. 11. На рис. 12 приведена фотография установки для измерения.

Для определения влияния ММ на отражательные свойства нелинейной структуры сначала измерялся спектр отраженного сигнала от нелинейной микрополосковой решетки без подложки из ММ. Для этого на генераторе устанавливалась частота падающего поля равной F_p с амплитудой 20 dBm. На анализаторе спектра фиксировались значения мощности отраженного сигнала P_1 на основной гармонике и P_2 на второй гармонике (рисунок 13).

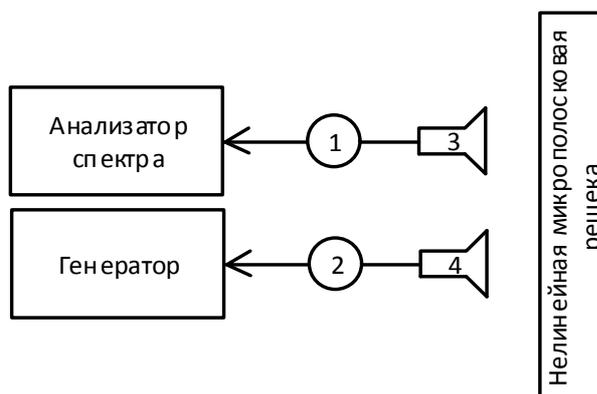


Рисунок 11. – Схема стенда для измерения параметров ММ (1,2 – кабельные сборки SMA-SMA, 3,4 – рупорные антенны)

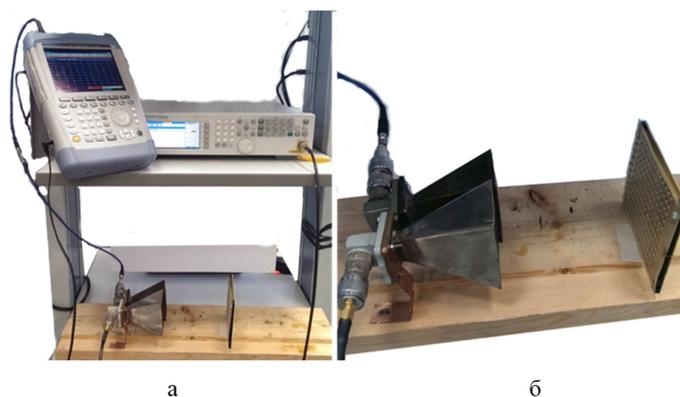


Рисунок 12 – а – Стенд для измерения спектра отраженного поля от нелинейной микрополосковой решетки; б – измерительные антенны и нелинейная микрополосковая решетка на подложке из ММ

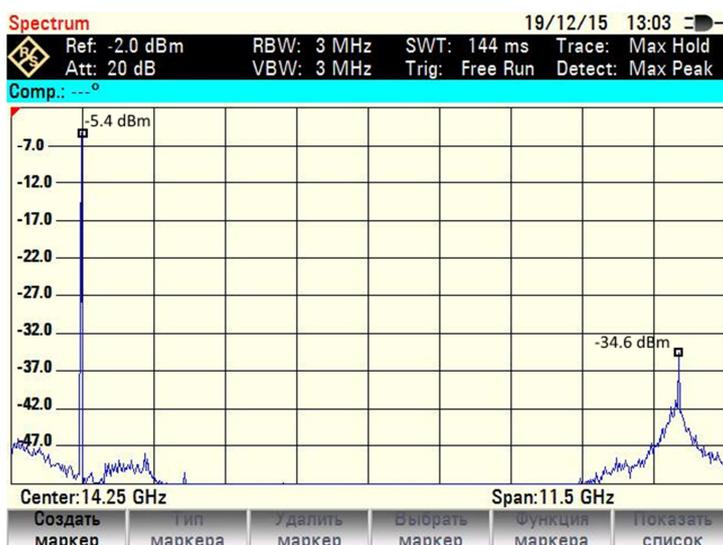


Рисунок 13– Спектр отраженного поля от нелинейной микрополосковой решетки без подложки из ММ

Далее добавлялась подложка из ММ и измерения повторялись (рис. 14). Для такой структуры получились следующие значения спектральных составляющих: $P_1 = -33,6$ dBm, $P_2 = -31,1$ dBm.



Рисунок 14. – Спектр отраженного сигнала от нелинейной микрополосковой решетки с подложкой из ММ

Применение подложки из ММ позволило снизить уровень отраженного поля на основной гармонике на 28,2 дВ, а также повысить уровень отраженного поля на второй гармонике на 3,5 дВм.

Заключение

По результатам проделанной работы можно сказать, что эффективные электрофизические параметры изготовленного макет ММ достаточно точно совпали с параметрами рассчитанной электродинамической модели. Это говорит о достоверности разработанной модели и методики гомогенизации параметров ММ.

С помощью измерения ЧХ модуля коэффициента отражения от ММ показана возможность подавления сигнала на определенной частоте. Это происходит вследствие того, что эффективные диэлектрическая и магнитная проницаемости имеют мнимые части, что является свидетельством поглощения электромагнитной энергии.

Экспериментальным путем была показана возможность выравнивания уровней отраженных сигналов на кратных гармониках от нелинейной микрополосковой отражательной решетки путем использования макета ММ в качестве подложки. Выравнивание уровней обеспечивается уменьшением уровня отраженного поля на основной гармонике на 28,2 дВ, благодаря поглощению энергии в ММ.

«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №16-19-10537)»

Литература

1. Горбачев А. А., Колданов А. П. Методы зондирования электромагнитными волнами сред с нелинейными включениями в задачах поиска терпящих бедствие людей. – //Нелинейная радиолокация, том 1 № 1-2. – 2009 Новгород. – С 59 – 63

2. Пономарев О.П., Клишин С.М. Улучшение электрических характеристик планарных антенн на основе метаматериалов и перспективы их использования, Калининград, 2010
3. Слюсар В. Метаматериалы в антенной технике: основные принципы и результаты. – //Первая миля 3-4/2010 – С 44 – 60.
4. H.-M. Lee, H.-S. Lee. A metamaterial based microwave absorber composed of coplanar electric-field-coupled resonator and wire array.// Progress In Electromagnetics Research C, Vol. 34, 111-121, 2013
5. S Anantha Ramakrishna. Physics of negative refractive index materials.// Department of Physics, Indian Institute of Technology, Kanpur 208 016, India. P.475. 2005
6. 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>
7. Н.И. Чиков Электродинамическое моделирование отражающей нелинейной микрополосковой структуры с использованием DNG-материала в качестве подложки// Известия ЮФУ. Технические науки. №11 ноябрь 2013. С 135-140.
8. Depine, R. A. and A. Lakhtakia, "A new condition to identify isotropic dielectric-magnetic materials displaying negative phase velocity," *Microwave Opt. Tech. Lett.*, Vol. 41, 315{316, 2004.
9. Kin-Lu Wong, Compact and Broadband Microstrip Antennas, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002