

DOI 10.30898/1684-1719.2020.6.5

УДК 621.396.96

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ, ПОКРЫТОЙ ГИБКИМ МЕТАМАТЕРИАЛОМ

Н. Н. Горбатенко, Д. В. Семенихина

Южный Федеральный Университет, Институт радиотехнических систем и управления,
347922, Таганрог, пер. Некрасовский, 44

Статья поступила в редакцию 5 мая 2016 г., после доработки – 23 мая 2020 г.

Аннотация. В данной работе анализируются результаты экспериментального исследования гибкой нелинейной ВЧ-метки. ВЧ-метка представляла собой нелинейную цилиндрическую структуру, покрытую гибким метаматериалом, проявляющим свойства поглотителя на частотах X-диапазона. Вначале были исследованы характеристики отражения и рассеяния гибкого метаматериала. Экспериментальные характеристики метаматериала совпали с ранее полученными результатами расчета. Из них следует, что этот метаматериал является поглотителем на основной частоте и обычным диэлектриком на второй гармонике поля. Затем, с помощью экспериментального стенда были изучены частотные характеристики нелинейной ВЧ-метки для различных радиусов металлического цилиндра. Результаты исследования показали, что использование гибкого метаматериала помогает повысить относительный (по сравнению отсутствием метаматериала) уровень 2-й гармоники рассеянного поля до -10 дБ относительно основной гармоники.

Ключевые слова: гибкий метаматериал, нелинейная ВЧ-метка, нелинейная цилиндрическая структура, эффект нелинейного рассеяния.

Abstract. Nowadays, the study of interaction between medium with nonlinear elements and electromagnetic waves has a practical application on such fields of activity as: detection of human vital signs, tracking insects, people search in natural disasters. The essence of the implementation of this approach is to place a nonlinear RF-tag on the object. It converts the frequency of the incident signal and scatters the

signal at the converted frequency. In the previous research, the cover of nonlinear RF-tag from the flat metamaterial contributed to the increase in the relative level of 2nd harmonic component in a scattered field. But using the flat metamaterial is not always possible. Concerning, in this paper the experimental study of nonlinear RF-tag was carried out. RF-tag is a nonlinear cylindrical surface covered with flexible metamaterial that has absorber properties at X band frequencies. The frequency characteristics of the flexible metamaterial are experimentally obtained. The research confirmed previously obtained calculation that this metamaterial is an absorber at the fundamental frequency and an ordinary dielectric at the second harmonic. Using an experimental setup, a study of the frequency characteristics of nonlinear RF-tag for various radii of a metal cylinder is carried out. The results of the study show that the use of flexible metamaterial helps increasing the relative level of the 2nd harmonic in a scattered field.

Key words: flexible metamaterial, nonlinear RF-tag, nonlinear cylindrical structure, nonlinear scattering effect.

Введение

В последнее время исследование эффекта нелинейного рассеяния (ЭНР) находит всё большее практическое применение. ЭНР был обнаружен в середине 20-го века при облучении искусственных объектов высоким уровнем зондирующего сигнала от мощных передатчиков [1]. Данный эффект приводил к появлению новых гармонических и комбинационных составляющих в спектре рассеянного электромагнитного поля (ЭМП). Источником возникновения ЭНР являются объекты искусственного происхождения с нелинейными характеристиками (микросхемы, транзисторы, диоды и т.д.), а также различные оксиды и окислы.

Ранее ЭНР рассматривался как негативное явление, которое создавало большие помехи для работы систем связи, радиолокаторов, систем навигации. Однако в настоящий момент данный эффект широко используют в таких областях, как: детектирование медицинских показателей человека [2], слежение

за насекомыми [3], поиск людей при стихийных бедствиях [4]. В большинстве использующих ЭНР устройств применяются нелинейные ВЧ-метки, которые размещаются на объекте поиска и преобразуют частоту падающего сигнала на частоту преобразования (кратную гармонику), рассеивая поле на преобразованной частоте. Проблема практического использования таких меток состоит в их малом радиусе действия ввиду слабого ответного сигнала.

Для увеличения радиуса действия было предложено использовать подавление основной гармоники. Для выделения в приемном тракте второй гармоники необходимо использовать высокие уровни выходной мощности передатчика для увеличения уровня второй гармоники, так как её уровень имеет, как правило, низкое значение и в пространстве затухает сильнее. Однако в приемном тракте при высоком уровне выходной мощности может возникнуть перегруз малошумящего усилителя даже с учётом фильтра. Для этого используется подавление основной гармоники в маркере. Подавление основной гармоники в нелинейной структуре позволяет повысить уровень выходной мощности передатчика, тем самым увеличивая дальность действия радиолокатора. Кроме этого, задача снижения основной гармоники актуальна при решении проблемы снижения заметности объекта для обычных радиолокаторов, тогда как для нелинейного радара объект должен сохранять свою заметность (например, при ведении разведывательных операций на территории противника).

Ранее в [5] было исследовано покрытие нелинейной ВЧ-метки из плоского метаматериала, которое способствовало увеличению относительного уровня 2-й гармоники в рассеянном поле. Однако, при размещении на объекте поиска не всегда возможно использовать структуры из плоского метаматериала в виду сложности такой конструкции (рисунок 1).

Поэтому нами было предложено использовать конформное покрытие из гибкого метаматериала, характеристики которого не сильно отличались бы от аналогичной плоской структуры.

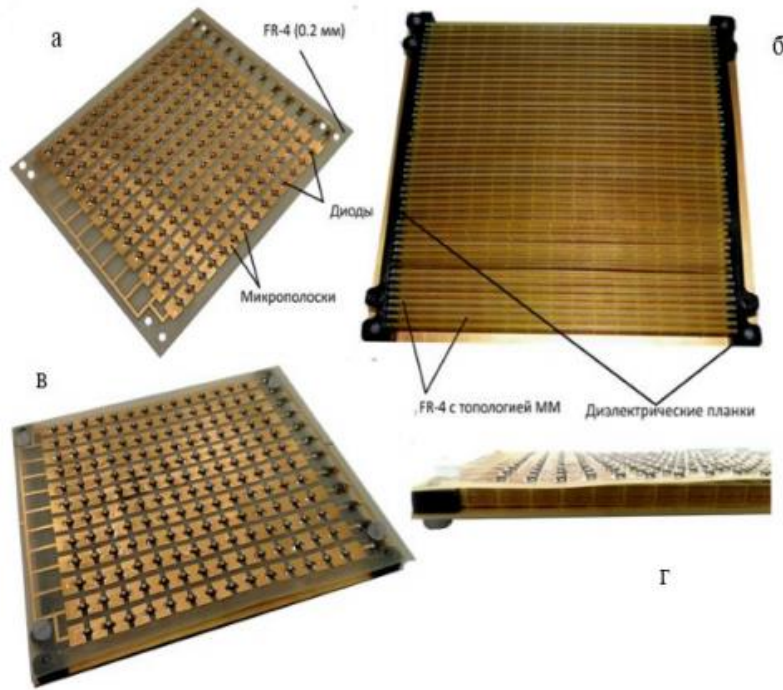


Рис 1. Макет структуры из плоского ММ.

1. Моделирование ММ

За основу конформного ММ была взята структура, рассмотренная в [6]. Ячейка такого ММ представляет собой два концентрических кольца, расположенных на тонкой подложке из материала FR-4. Данная модель имеет два резонанса поглощения. Подобрать резонансы достаточно близко к друг другу, можно добиться достаточной ширины поглощения для компенсации смещения резонанса, вызванного изгибом метаматериала. Однако в данном материале это не реализовано из-за технологических ограничений производства. Модель ячейки ММ показана на рисунке 2.

С помощью периодических условий Master-Slave, в пакете HFSS были рассчитаны коэффициенты отражения и прохождения бесконечной периодической структуры из таких ячеек. В качестве портов были выбраны Floquet port. Поскольку ММ располагается на проводящем экране, коэффициент прохождения $S_{21}=0$. В HFSS рассчитывается коэффициент отражения S_{11} и, на основе полученных данных, коэффициент поглощения определяется по формуле

$$A(\omega) = (1 - S_{11}^2(\omega)) \cdot 100\% \quad (1)$$

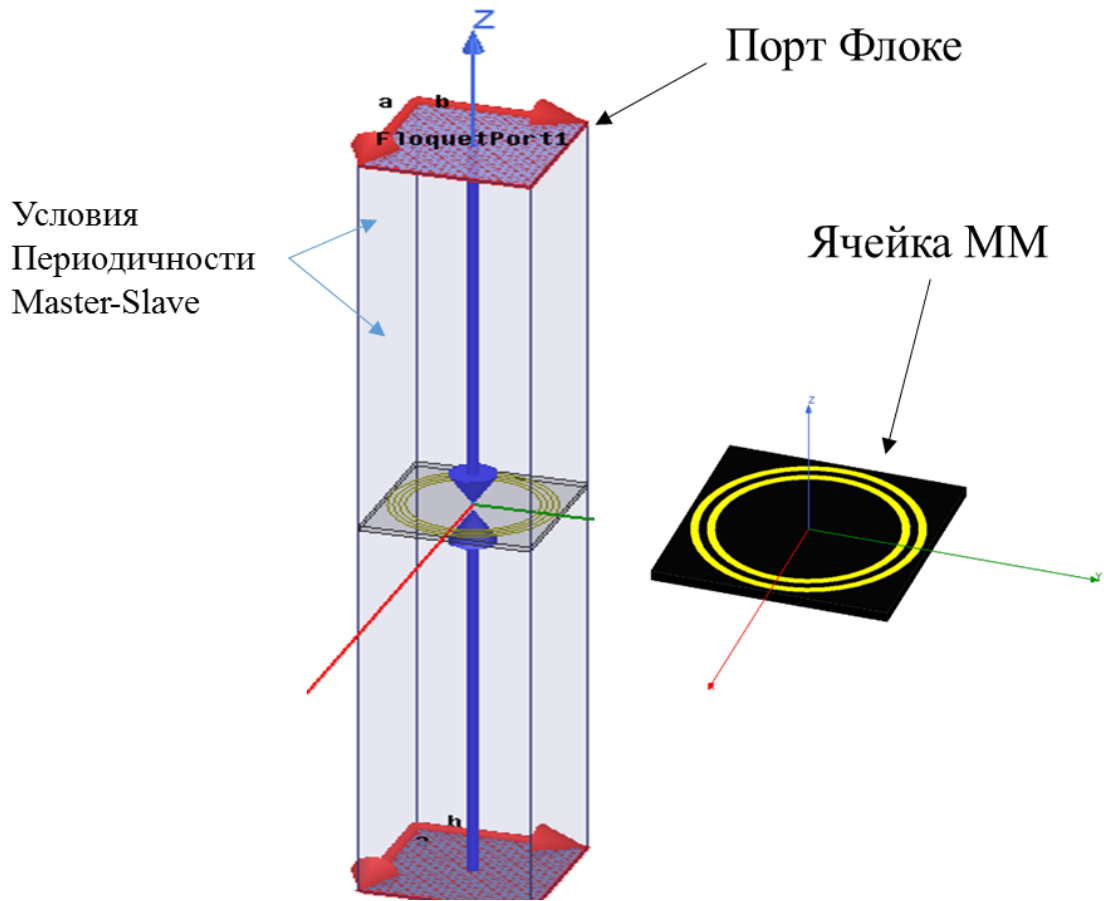


Рис. 2. Макет структуры из плоского ММ.

Частотная зависимость коэффициента поглощения показана на рисунке 3.

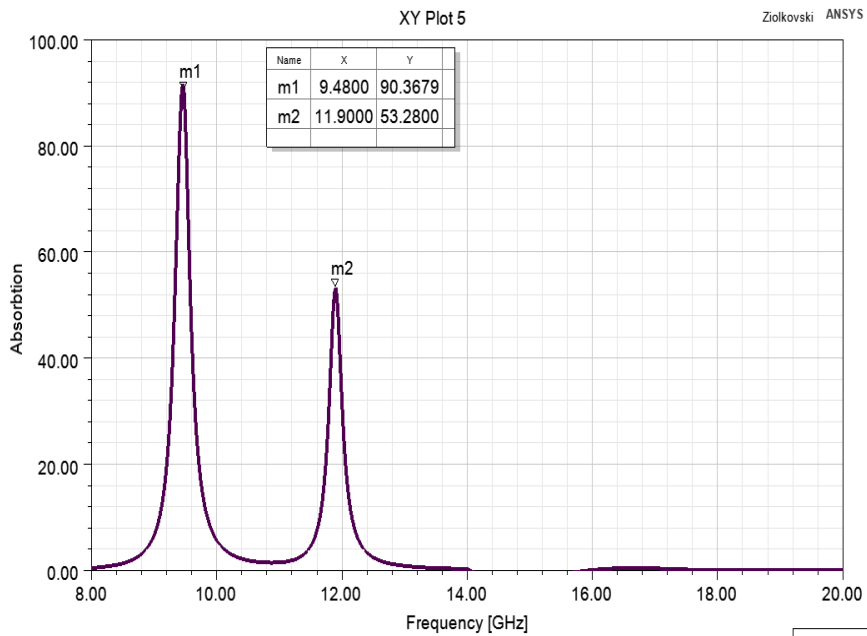


Рис. 3. Зависимость коэффициента поглощения ММ от частоты.

Как видно из приведенной ЧХ, рассматриваемый ММ имеет два пика поглощения на частотах $f_1 = 9,48$ ГГц – 90% и $f_2 = 11,9$ ГГц – 53,28 %. Важным свойством данного ММ является отсутствие поглощения на $2f_1$. Резонанс на частоте f_2 является вспомогательным и, возможно, будет использоваться в дальнейших исследованиях частичного поглощения 1-ой гармоники.

2. Экспериментальное исследование конформного метаматериала

По результатам численного моделирования был изготовлен макет гибкого метаматериала. Макет представляет собой периодическую решетку размером 160x160 мм, состоящую из 23x23 ячеек, нанесённых способом фотолитографии на диэлектрик FR-4, толщиной 0,25 мм. Внешний вид макета представлен на рисунке 4.

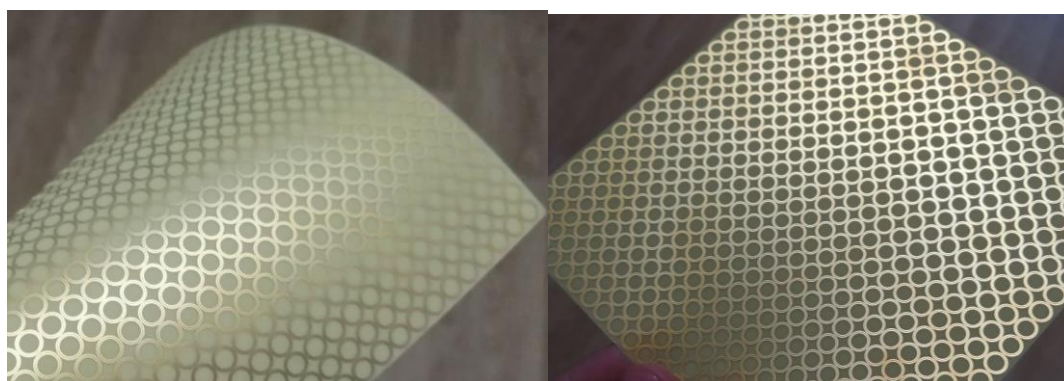


Рис. 4. Фотографии макета метаматериала.

Для получения частотных характеристик ММ (его коэффициента прохождения и отражения) был собран стенд для измерения коэффициента прохождения ММ, представленный на рисунке 5.

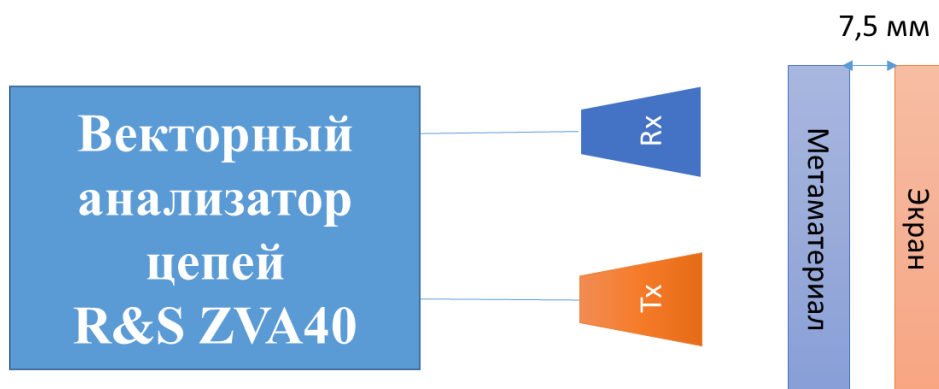


Рис. 5. Схема стенда для измерения коэффициента прохождения ММ.

Стенд состоит из векторного анализатора цепей R&S ZVA40, и двух пирамидальных рупорных антенн (Rx, Tx). Перед началом измерения параметров ММ была проведена калибровка векторного анализатора для учёта потерь в кабелях и в свободном пространстве. Требовалось установить значения наводимого поля из передающего рупора в приёмный. Для этого на анализаторе цепей R&S ZVA40 задавался уровень 20 дБм (100 мВт), и измерения проводились в диапазоне с 5 до 30 ГГц. Расстояние между фазовыми центрами антенн составило 2λ , между краями апертур - $0,15\lambda$. На рисунке 6 показана частотная характеристика уровня поля, наводимого в приёмном рупоре.

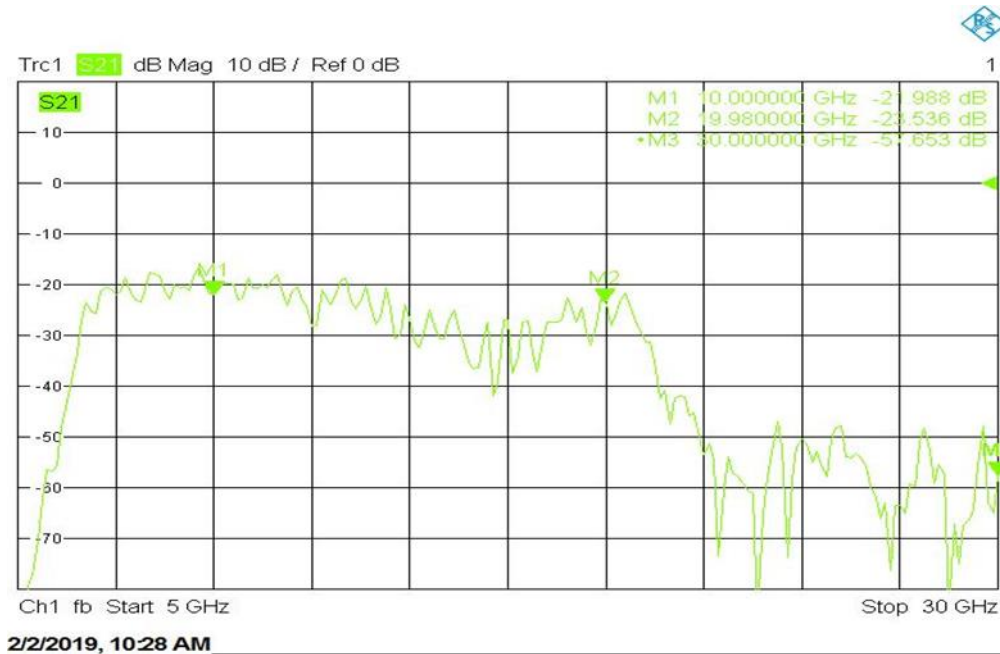


Рис. 6. Уровень поля, наведенного из передающего рупора в приёмный.

Как видно из рисунка 6, с учётом подаваемого уровня мощности 20 дБм, развязка между рупорами составляет 42 дБ на основной частоте.

Калибровка осуществлялась с помощью медной пластины (рисунок 7) тех же размеров, что и метаматериал. Расстояние между рупорами и пластиной составляло 160 мм.

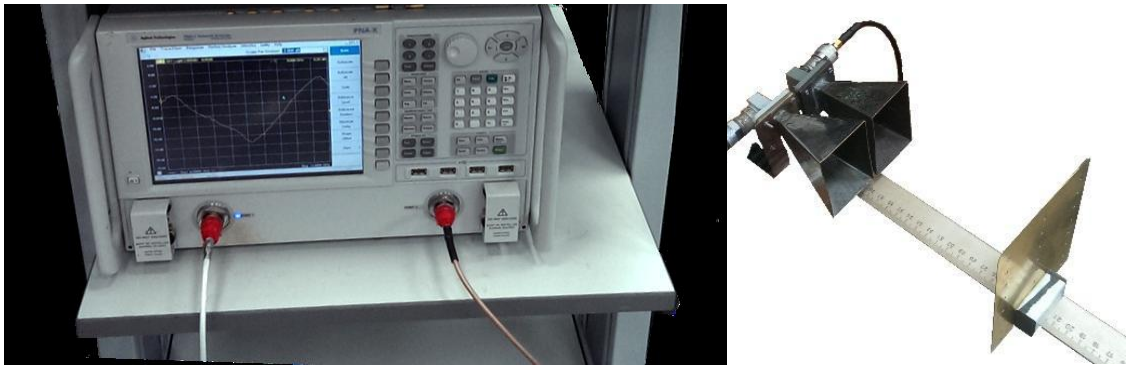


Рис. 7. Калибровка рупоров с помощью медной пластины.

Из первого канала анализатора цепей сигнал поступал на передающую антенну Tx в диапазоне частот 8-12 ГГц. ЭМП, отраженное от метаматериала, принималось приемной антенной Rx и передавалось во 2-ой канал анализатора цепей. На экране векторного анализатора цепей фиксировалась частотная зависимость коэффициента прохождения. На рисунке 8 показана результирующая частотная зависимость коэффициента прохождения.

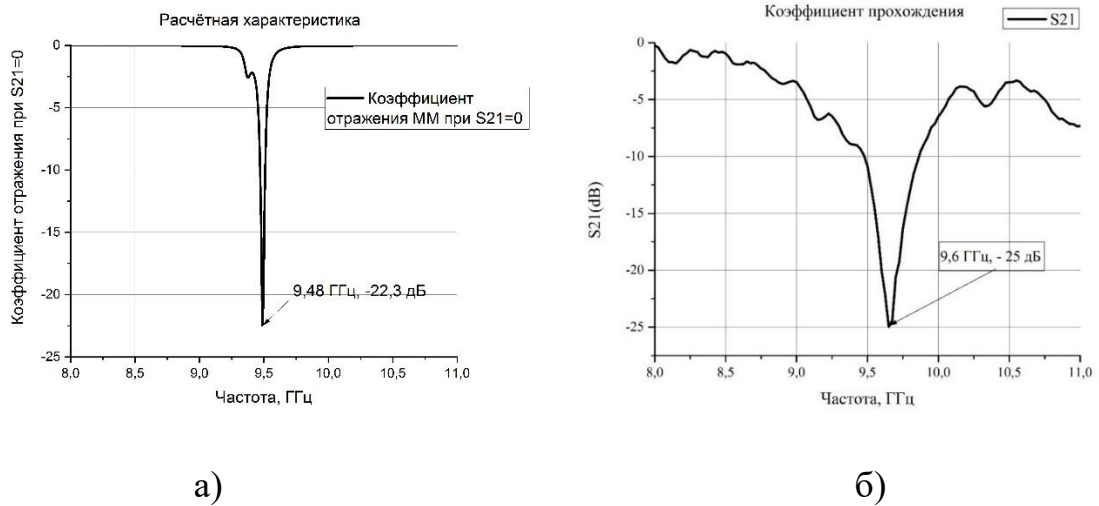


Рис. 8. Расчётная частотная зависимость коэффициента отражения ММ при $S_{21}=0$ (а); измеренная частотная зависимость коэффициента прохождения ММ (б)

3. Экспериментальное исследование нелинейной цилиндрической структуры

После подтверждения результатов моделирования метаматериала проводилось исследование нелинейной цилиндрической метаструктуры (рис. 9), покрытой слоем конформного ММ (рис. 4).

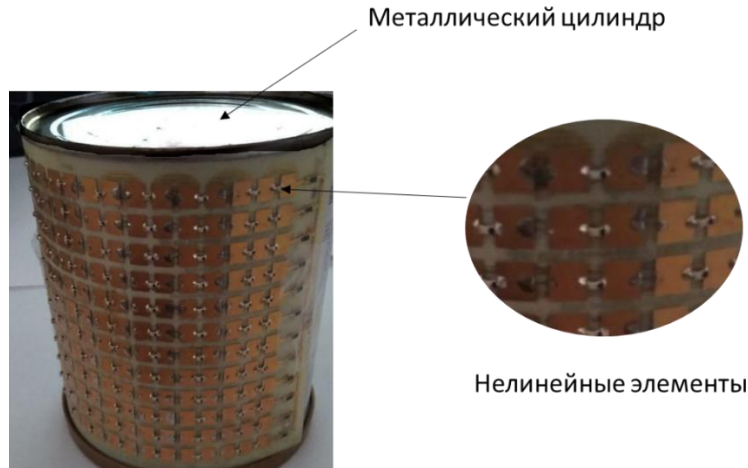


Рис. 9. Нелинейная цилиндрическая структура.

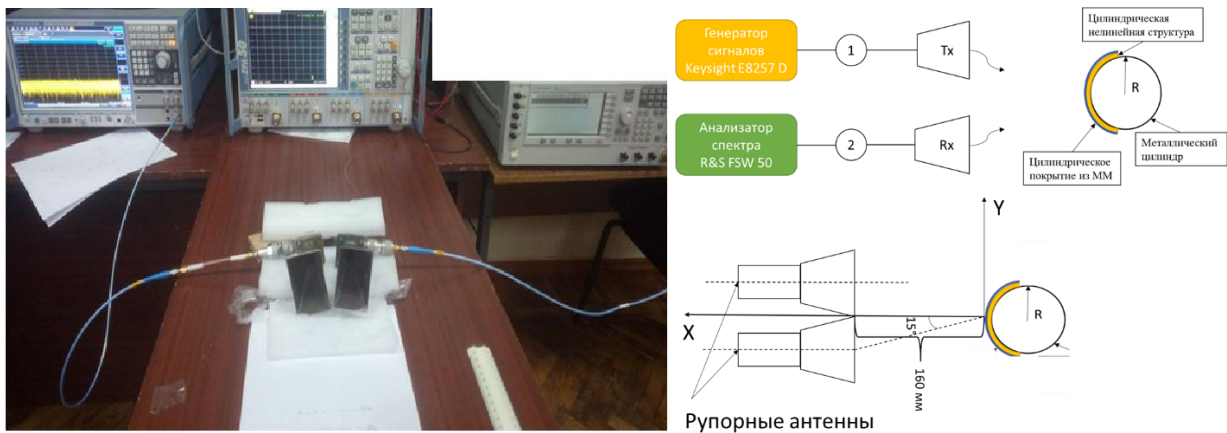
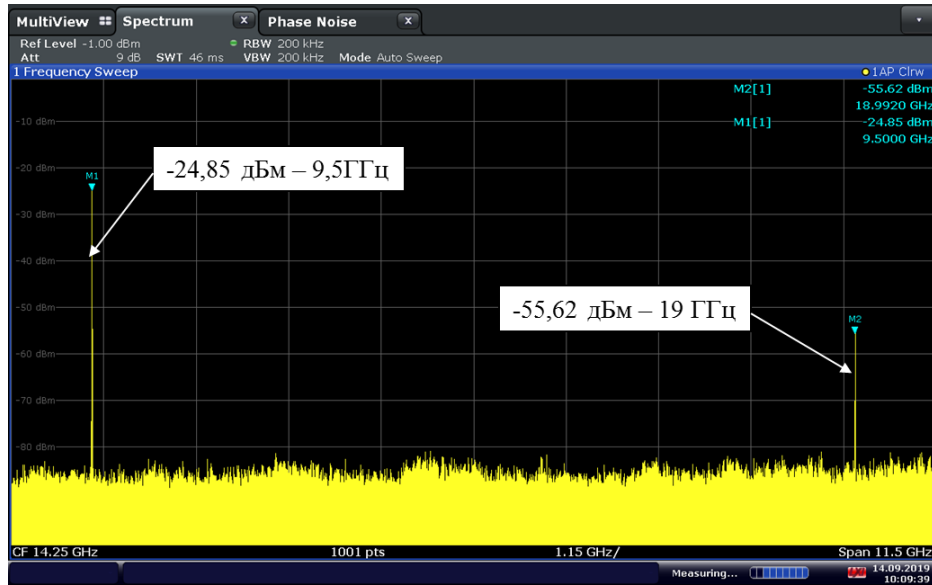


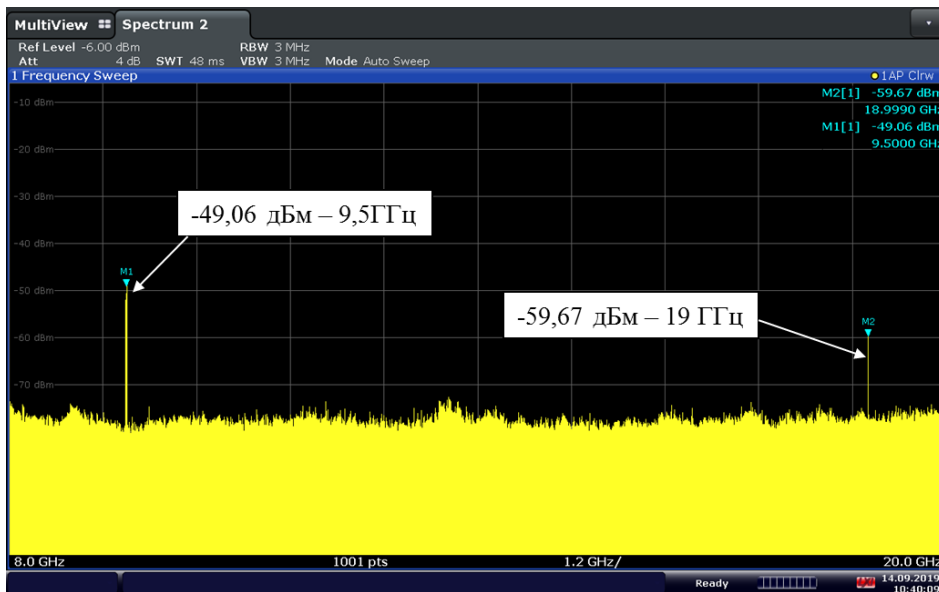
Рис. 10. Фотография и схема стенда для измерения спектра, рассеянного от нелинейной структуры поля.

Нелинейная цилиндрическая структура включает металлический цилиндр радиусом 55 мм, подложку с нелинейными элементами и конформный ММ. Подложка с нелинейными элементами содержит посадочные места для диодов на верхней части диэлектрической подложки из материала FR-4 толщиной 0.2 мм. На посадочные места помещены детекторные диоды Шоттки 3A206A-6, которые обеспечивают перекачку энергии с частоты падающего поля F_3 на

гармоническую составляющую $2F_3$. Фотография и схема для измерения спектра, рассеянного от нелинейной структуры поля, показаны на рисунке 10.



а)



б)

Рис. 11. ЧХ поля, рассеянного от нелинейной структуры: а) без покрытия ММ; б) с покрытием из ММ

На генераторе задавалась частота зондирующего сигнала F_3 с амплитудой 100 мВт. Зондирующий сигнал через коаксиальный кабель подавался на рупорную антенну T_x , которая излучала монохроматическую электромагнитную волну в направлении исследуемого макета. На анализаторе фиксировался уровень рассеянного от макета сигнала, который поступал на

вход приемной антенны Rx. Для определения влияния ММ на свойства рассеяния нелинейной структуры измерялась ЧХ поля, рассеянного в обратном направлении на основной частоте и 2-ой гармонике. Сравнение уровней полей, полученных приемной антенной Rx на частотах F_3 и $2F_3$, для цилиндрической нелинейной структуры с радиусом 55 мм без покрытия из ММ (а) и с покрытием из ММ (б) показаны на рисунке 11.

Как видно из рисунка 11, уровень рассеянного поля на 1-ой гармонике при покрытии ММ нелинейной цилиндрической структуры ниже на 24,2 дБ, относительно случая без покрытия. Уровень 2-ой гармонике снизился на 4 дБ, что можно объяснить дисперсионными свойствами подложки на данной частоте. Разница между 1-ой и 2-ой гармоникой составила 10,7 дБ, поэтому можно сделать вывод, что конформное покрытие из ММ способствует выравниванию уровня 2-ой гармонике относительно 1-ой, благодаря свойствам конформного ММ: поглотителя - на основной частоте, обычного диэлектрика - на 2-ой гармонике.

Также был измерен спектр рассеянного от нелинейной структуры поля, показанный на рисунке 12 в полосе частот 9-10 ГГц.

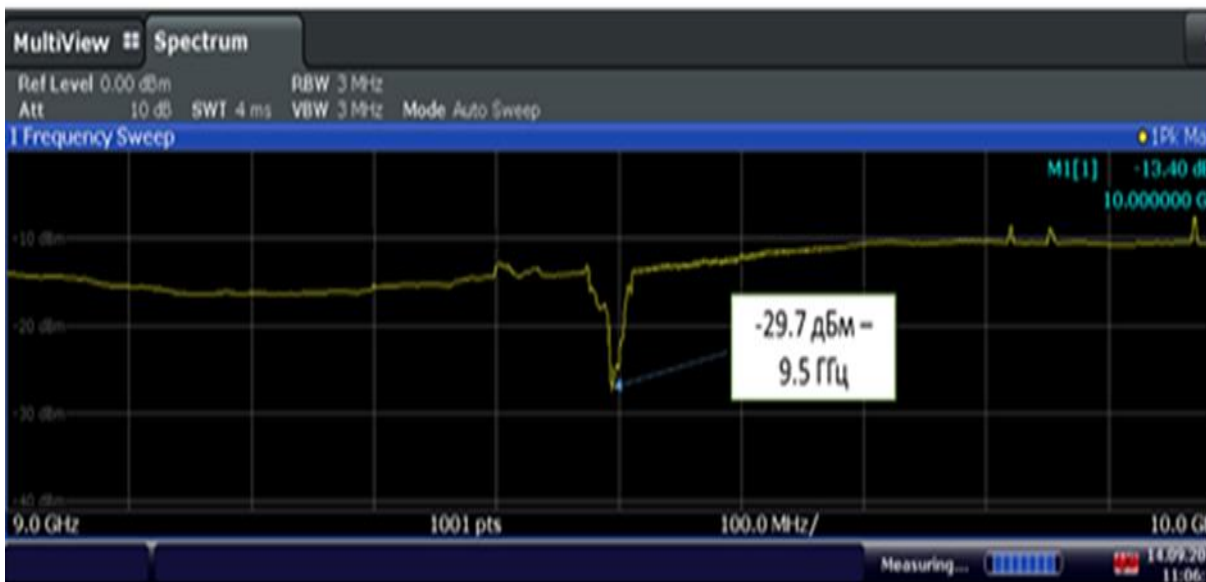


Рис. 11. Спектр рассеянного от нелинейной структуры поля вблизи 1-ой гармонике.

Как видно из полученной зависимости, результаты моделирования (рисунок 6, а) довольно точно совпали с экспериментально полученными характеристиками (рисунок 11). Причина смещения резонанса на 120 МГц может быть вызвана отличием между макетом и моделью из-за технологической погрешности метода фотолитографии.

Полученная характеристика спектра рассеянного поля качественно совпадает с частотной характеристикой коэффициента отражения ММ, что говорит о том, что нелинейная структура без ММ не вносит искажений в ЧХ. Пик поглощения приходит на частоту 9.5 ГГц. Полоса полосы поглощения по уровню -10 дБ составляет 30 МГц.

Также, для сравнения, был измерен спектр поля вблизи 2-ой гармонике поля 18 -20 ГГц (рисунок 12).

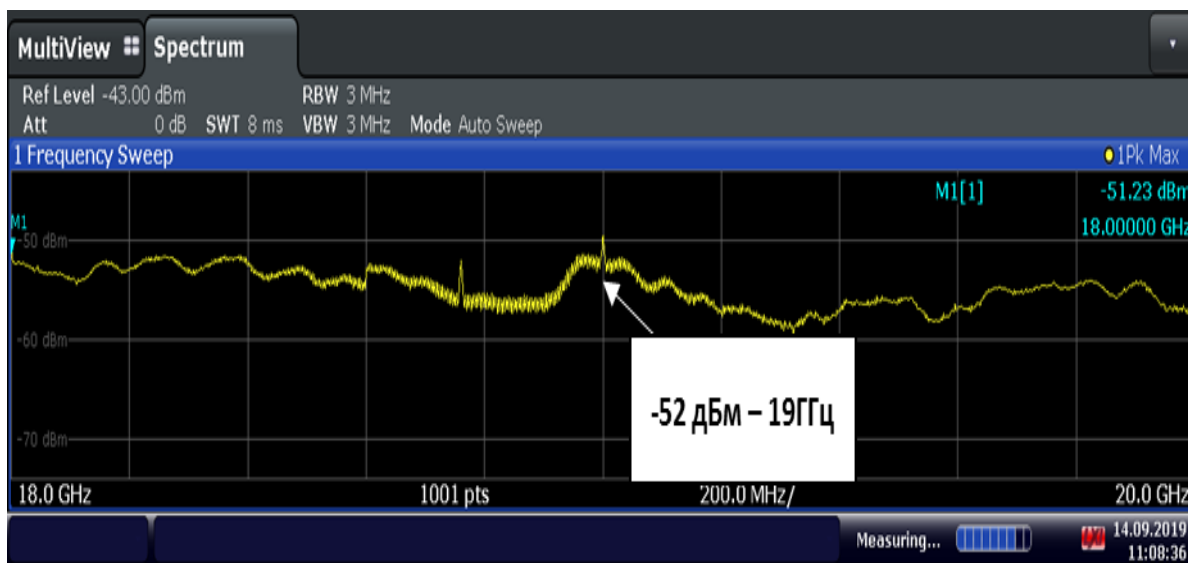


Рис. 12. Спектр рассеянного от нелинейной структуры поля вблизи 2-ой гармоники.

Спектр рассеянного поля вблизи частоты второй гармоники равномерный и не имеет явных провалов. Разница между максимальным и минимальным уровнем в полосе частот 18-20 ГГц составляет 5 дБ.

Заключение

Таким образом, результаты эксперимента показывают, что использование покрытия из конформного цилиндрического ММ позволяет получить в спектре рассеянного поля 2-ю гармонику всего на 10 дБ ниже уровня 1-ой гармоники. Это достигается благодаря частотно-избирательным свойствам ММ на основной частоте, тогда как на второй гармонике покрытие обладает свойствами обычного диэлектрика.

В дальнейшем, использование материалов с меньшим тангенсом угла потерь, вероятно, позволит добиться уровня 2-ой гармоники, превышающей основную в спектре отраженного поля.

Исследованные структуры могут найти применение описанным эффектам также в сфере снижения радиолокационной заметности в требуемом направлении, создание умных покрытий, для создания скрытых каналов связей.

Литература

1. Штейншленгер В.Б., Мисежников Г.С. Исследование эффекта нелинейного рассеяния радиоволн металлическими объектами. // Радиотехника и электроника. 1984. Т. 39. №. 6. С. 902 – 906.
2. Chioukh L., Boutayeb H., Deslandes D., Wu K. Noise and sensitivity of harmonic radar architecture for remote sensing and detection of vital signs. // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. September 2014. Vol. 63. No. 9. P. 1847-1855.
3. Aumann H.M., Emanetoglu N.W. A wideband harmonic radar for tracking small wood frogs. // Proc. IEEE Radar Conf. May 2014. P. 108-111.
4. Aniktar H., Baran D., Karav E., Akkaya E., Birecik Y.S., Sezgin M. Getting the bugs out: A portable harmonic radar system for electronic counter surveillance applications. // IEEE Microw. Mag. 2015. Vol. 16. No. 10. P. 40-52.
5. Gorbatenko N.N., Semenikhina D.V. Experimental Study of a Metal Cylinder with Nonlinear Loads which Covered with Metamaterial. // Proceedings of 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). Divnomorskoe, Russia. 2019. P. 440-443.

6. Campbell S.D., Ziolkowski R.W. Lightweight, Flexible, Polarization-Insensitive, Highly Absorbing Meta-Films. // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2013. Vol. 61. No. 3. P. 1191-1200. DOI: [10.1109/TAP.2012.2227658](https://doi.org/10.1109/TAP.2012.2227658)

Для цитирования:

Горбатенко Н.Н., Семенихина Д.В. Экспериментальное исследование нелинейной цилиндрической поверхности, покрытой гибким метаматериалом. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun20/5/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.6.5