

УДК 621.369.9

ВОЗБУЖДЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН НА ИДЕАЛЬНО ПРОВОДЯЩЕМ ЦИЛИНДРЕ С НЕЛИНЕЙНЫМИ НАГРУЗКАМИ, ПОКРЫТОМ СЛОЕМ МЕТАМАТЕРИАЛА

Н. Н. Горбатенко, Д. В. Семенихина

Институт радиотехнических систем и управления, Южный Федеральный Университет,
347904 г. Таганрог пер. Некрасовский д.44

Статья поступила в редакцию 13 октября 2018 г.

Аннотация. В данной статье проводится электродинамический анализ идеально проводящего цилиндра с нелинейной нагрузкой, покрытый слоем метаматериала. Рассмотрены условия существования поверхностных волн на идеально проводящем цилиндре. Показано, что использование материала DNG позволяет возбуждать поверхностную волну на границе раздела между материалами металл-металл. Используя моделирование проблемы в Ansys HFSS, были рассчитаны параметры метаматериала, для которых происходит возбуждение поверхностных волн на нескольких частотах. С помощью моделирования задачи в Ansys HFSS были рассчитаны параметры метаматериала, при которых возникает возбуждение поверхностных волн на кратных частотах. Приводятся диаграммы рассеяния цилиндра, покрытого слоем ММ на основной частоте и на второй гармонике.

Ключевые слова: нелинейная нагрузка, нелинейные граничные условия, метаматериал, диаграмма обратного рассеяния, нелинейные маркеры.

Abstract. In this paper, an electrodynamic analysis of an ideally conducting cylinder with a nonlinear load (NL), covered with a layer of metamaterial, had carried out. The nonlinear load has described by the polynomial volt-ampere characteristics. The problem has solved with the help of a system of non-linear integral equations (SNIE), with the application of nonlinear boundary conditions on the surface of nonlinear load. SNIE has transformed into a system of nonlinear algebraic equations (SNAU) using the Krylov-Bogolyubov method. An iterative method of numerical optimization used to solve the SNAU. As the main, the method of Broyden-Fletcher-Goldfarba-

Shanno (BFGS) had chosen since it does not require an exact initial approximation. The conditions for the existence of surface waves on an ideally conducting cylinder are considered. It is shown that the use of a DNG material allows one to excite a surface wave at the interface between metamaterial-metal media. Using the modeling of the problem in Ansys HFSS the metamaterial parameters had calculated for which excitation of surface waves at multiple frequencies occurs. The scattering diagrams at the fundamental frequency and at the second harmonic for various parameters of the metamaterial were obtained.

Key words: metamaterial, nonlinear load, harmonic tags, nonlinear boundary condition, nonlinear radar.

1. Введение

Эффект нелинейного рассеяния (ЭНР) от полупроводниковых приборов широко известен многие годы. Полупроводники и соединения металл-окисел-металл являются источниками нелинейности. Во многих приложениях нелинейный отклик проявляется в электронных системах и обычно воспринимается как помеха. Например, гармоническое искажение, генерируемое в аудиосистеме. Однако, существует ряд полезных применений ЭНР [1]: системы предотвращения столкновения автомобилей, поиск людей, терпящих бедствия в природных катастрофах, системы радиочастотной идентификации RFID, поиска насекомых. Так, в RFID системах серьезной проблемой является отражение от естественных объектов (камни, деревья и т.д.). Преимуществом использования нелинейных RFID-меток является отсутствие шума от естественных объектов на гармонических частотах.

Нами была предложена [4] метаструктура, состоящая из микрополосковой структуры с диодами на подложке из материала DNG. Материал DNG имел отрицательные значения магнитной и диэлектрической проницаемости на частоте падающей волны (основной частоте). Такая метаструктура позволяет обогатить спектр падающего сигнала и может использоваться в качестве нелинейной RFID метки,

Однако, использование микрополосковых метаструктур с нелинейными нагрузками имеет ограниченные возможности применения из-за своих конструктивных особенностей. В связи с этим представляет большой интерес изучение конформных метаповерхностей с нелинейными нагрузками.

2. Постановка задачи

Пусть имеем бесконечный идеально проводящий цилиндр радиусом R_1 . На поверхности цилиндра S_1 расположены W нелинейных элементов, параллельных оси цилиндра в цилиндрической системе координат (рис 1.), где w - угловая ширина нагрузки. Предположим, что нагрузки являются узкими нелинейными щелями. Первичным источником является нить магнитного тока, расположенная в области V_2 , которая возбуждает ЭМП на частоте ω с амплитудой H . Параметры нагрузки определяются следующей полиномиальной вольтамперной характеристикой (ВАХ) [6]:

$$i(t) = \sum_{v=0}^Q \left(a_v u^v(t) + \frac{b_v du^v(t)}{dt} \right) \quad (1)$$

где a_v, b_v - параметры ВАХ, тока i который течёт через нелинейную нагрузку с напряжением на краях щели.

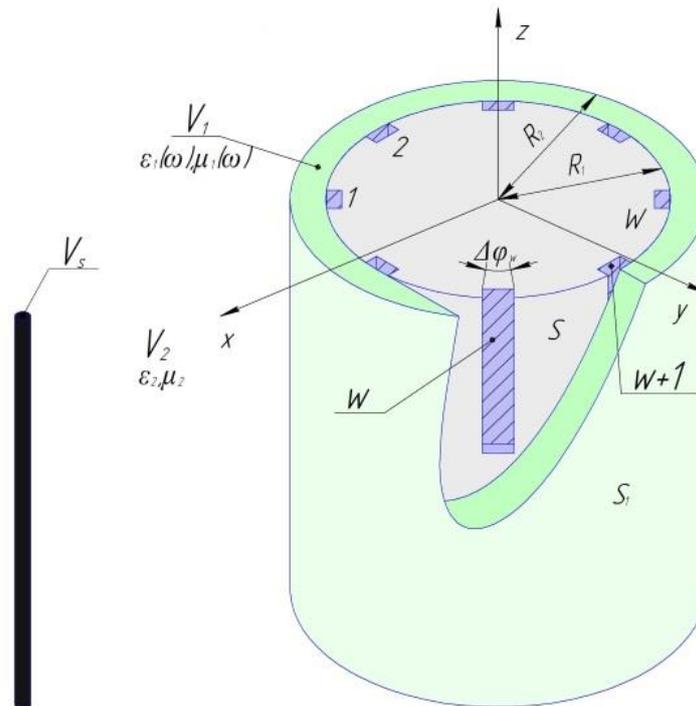


Рис. 1. К постановке задачи.

Цилиндр покрыт слоем метаматериала с радиусом R_2 . ММ описывается параметрами эффективной диэлектрической и магнитной проницаемостей $\epsilon_1(\omega)$ и магнитной $\mu_1(\omega)$ на основной частоте и на второй гармонике.

Необходимо найти векторы электрического и магнитного поля в дальней зоне.

Решение данной задачи было получено в [5]. Задача решается с помощью системы нелинейных интегральных уравнений (СНИУ), с применением нелинейных граничных условий на поверхности НН. СНИУ преобразуется в систему нелинейных алгебраических уравнений с помощью метода Крылова-Боголюбова. Для решения СНАУ использовался итерационный метод численной оптимизации. В качестве основного, был выбран метод Бройдена — Флетчера — Гольдфарба — Шанно (BFGS) так как он не требует точного начального приближения.

3. Описание модели

Модель данной структуры представлена на рис. 2.

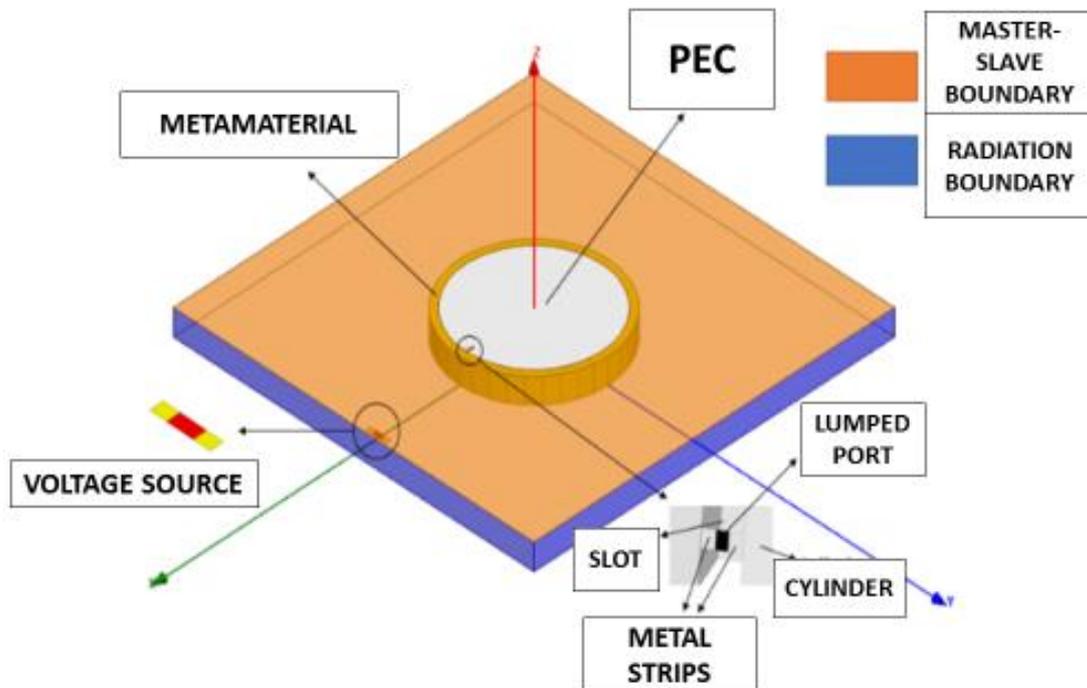


Рис. 2. Модель цилиндра, покрытого слоем ММ

Для моделирования данной задачи воспользуемся программой Ansys HFSS, в которой задача решалась методом конечных элементов. Считаем, что цилиндр является идеально проводящим (PEC). Цилиндр покрыт ММ (METAMATERIAL) с параметрами $\epsilon_1(\omega)$, $\mu_1(\omega)$ на основной частоте и $\epsilon_1(2\omega)$, $\mu_1(2\omega)$ на второй гармонике. Условия периодичности (MASTER-SLAVE BOUNDARY) на верхних и нижних гранях границы задачи устанавливаем для указания бесконечности цилиндра. Пусть боковые грани удовлетворяют условию излучения на бесконечности (RADIATION BOUNDARY). За источник возбуждения электромагнитного поля (ЭМП) на основной гармонике примем источник напряжения (VOLTAGE SOURCE) с амплитудой H [А/м] и частотой ω . За источник возбуждения ЭМП на второй гармонике 2ω , примем сосредоточенный порт (LUMPED PORT), расположенный в щели (SLOT) цилиндра, который будет моделировать математическую модель нелинейной щели.

Будем искать параметры метаматериала, при которых наблюдается возбуждение поверхностной электромагнитной волны (ПЭВ). ПЭВ – это волны, которые распространяются вдоль границы раздела двух сред, и проникают в эти среды на расстояние, меньшее длины волны [6]. В поверхностных волнах вся энергия сосредоточена в узкой окрестности границы раздела, и состояние поверхности существенно влияет на их распространения. Взаимодействие объемных и поверхностных волн может приводить к различным поверхностным эффектам, таким как генерация гармоник. Волны такого типа возникают при падении объемной волны из диэлектрика на поверхность металла, что обуславливается некоторыми особенностями распространения волн в средах со свободными зарядами, примерами которых являются металлы. В нашем случае интересно рассмотреть возбуждение ПЭВ на границе метаматериал-металл, при которых может происходить перекачка энергии.

Для существования ПЭВ необходимо, чтобы реальные части диэлектрической проницаемости сред имели разные знаки [6]:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = -\frac{k_1}{k_2}, \quad (2)$$

где

$$k_{1,2} = (k_s^2 - \varepsilon_{1,2}\mu_{1,2}\frac{\omega^2}{c^2}), \quad (3)$$

является компонентом волнового вектора, направленным по нормали к поверхности. Волновой вектор k_s в соответствии с граничными условиями одинаков в обеих средах: Этому условию удовлетворяют метаматериалы с отрицательными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей – DNG материалы. Найдем значения ММ, при которых возникает возбуждение ПЭВ.

4. Численные результаты

В качестве результатов показаны диаграммы рассеяния цилиндра при различных электрофизических параметрах ММ. Найденные значения параметров метаматериала, при которых на частотах гармоник возникает поверхностная волна, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры ММ

Диаграмма направленности Номер рисунка	Параметры метаматериала			
	$\tilde{\varepsilon}_1(\omega)$	$\tilde{\varepsilon}_1(2\omega)$	$\tilde{\mu}_1(\omega)$	$\tilde{\mu}_1(2\omega)$
Рис 3.а	4.4	-7.5	1	-5
Рис3.б		-6.75		-6.6
Рис 3.в		-5		-7.5
Рис 3.г		-5		-1

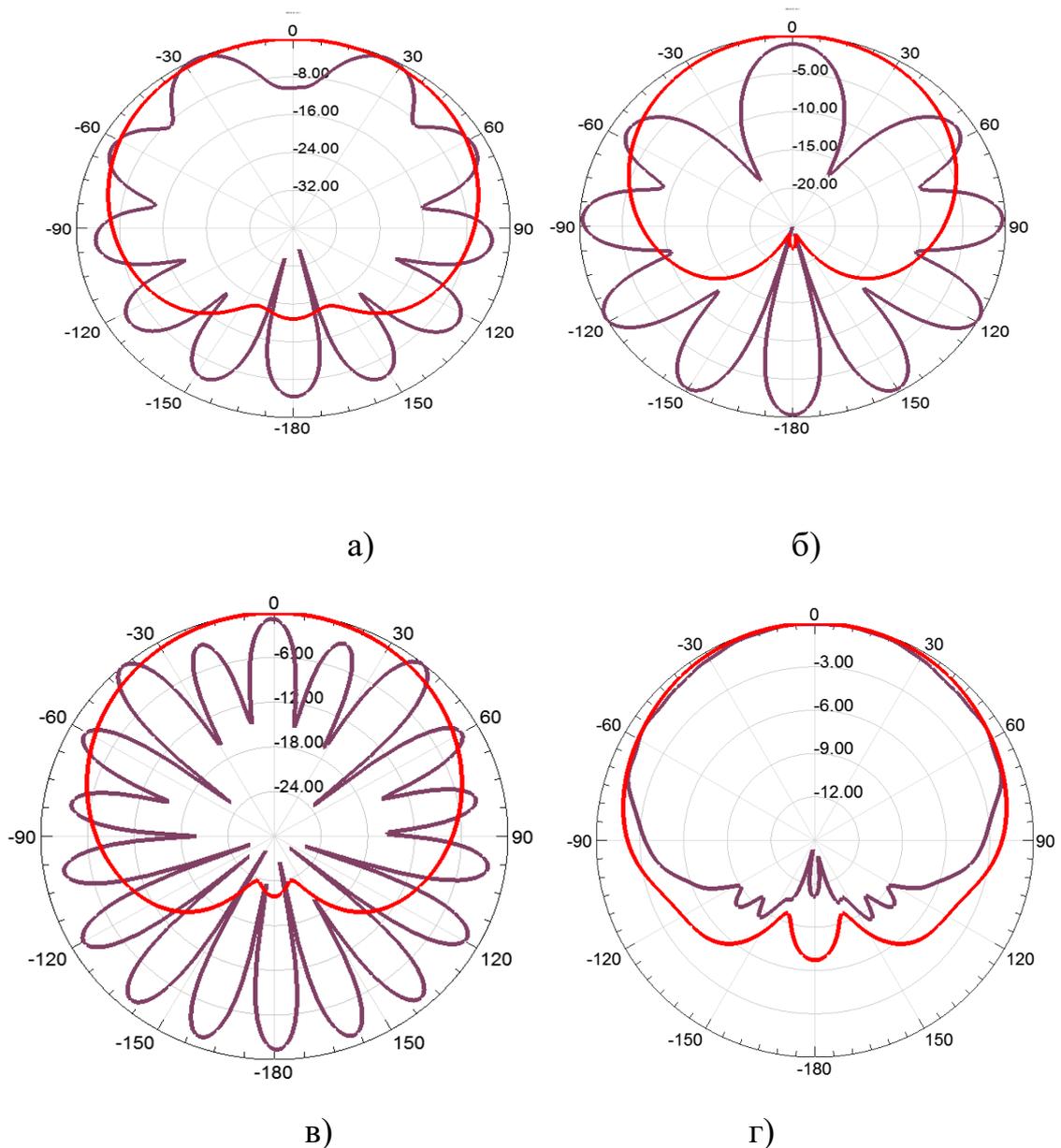


Рис 3 Диаграммы рассеяния цилиндра при различных параметрах ММ, красная линия – основная гармоника, фиолетовая линия – вторая гармоника.

Из рис. 3(а--в) видно, что благодаря возбуждению поверхностной волны в разделе сред металл-метаматериала, уровень поля в теневой области цилиндра на 2-ой гармонике значительно превосходит уровень поля на основной гармонике при моделировании нелинейной нагрузки как линейного сосредоточенного порта. Для сравнения, на рис. 3(г) показана диаграмма рассеяния при отсутствии эффекта возбуждения ПЭВ.

Заключение

В результате данной работы были найдены параметры ММ при которых могут возникать поверхностные электромагнитные волны на цилиндрических

структурах с нелинейной нагрузкой в среде метаматериал-металл. Расчёт показал, что использование поверхностных электромагнитных волн может повысить относительный уровень второй гармоники в теневой области цилиндра.

Литература

1. G.J. Mazzaro, A.F. Martone, D.M. McNamara. Detection of RF electronics by multitone harmonic radar. // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014, Vol. 50, No. 1, pp. 477-490
2. P. Nikitin and K. Rao. Harmonic scattering from passive uhf rfid tags. // Antennas and Propagation Society International Symposium, 2009. APSURSI '09. IEEE, June 2009, pp. 1-4.
3. GL Charvat, EJ Rothwell, LC Kempel. Harmonic radar tag measurement and characterization. // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium., 2003, Vol. 2, pp. 696–6992. DOI: [10.1109/APS.2003.1219331](https://doi.org/10.1109/APS.2003.1219331)
4. D. V. Semenikhina, N.I. Chikov, A. I. Semenikhin, N.N. Gorbatenko. Experimental studies of nonlinear metasurface with metamaterial substrate // 24th Telecommunications Forum (TELFOR), 2016.
5. D. V. Semenikhina; N. N. Gorbatenko. Analysis of excitation of nonlinear loaded perfectly conducting cylinder coated with the layer of metamaterial using method of integral equations. // Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), 2017
6. Б Князев Б. А., Кузьмин А. В. Поверхностные электромагнитные волны: от видимого диапазона до микроволн. // Вестник НГУ. Серия: Физика. ISSN 1818-7994. 2007. Т. 2. Вып. 1. С. 108-122.

Для цитирования:

Н. Н. Горбатенко, Д. В. Семенихина. Возбуждение поверхностных волн на идеально проводящем цилиндре с нелинейными нагрузками, покрытом слоем метаматериала. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 10. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct18/14/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.10.14