

ПЕРЕДАЧА СУБВОЛНОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРОВОЛОЧНОЙ ЛИНЗОЙ С ФАЗОВОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Введение

Одним из важных вопросов в исследовании электродинамики метаматериалов является изучение процессов распространения волн в объектах с различными типами анизотропии. Большое значение здесь имеют знания о дисперсионных свойствах метаматериалов. Удобной моделью таких объектов являются так называемые проволочные среды/структуры, образованные набором (решеткой) металлических проволочек, изготовленных из немагнитных и магнитных материалов [1 – 3]. В миллиметровом диапазоне длин волн многообещающими объектами являются проволочные структуры [4, 5].

Основным преимуществом проволочных структур является возможность достижения высокого разрешения [6]. Разрешение обычных устройств передачи и обработки изображений ограничено дифракционным пределом. Детали изображения, расположенные на расстоянии менее половины длины волны, не могут быть различены. Данное ограничение возникает потому, что в линзовых устройствах передачи и обработки изображений используются волны, распространяющиеся в пространстве. Информация о деталях, которые много меньше длины волны, содержится в волнах, соответствующих затухающей части пространственного спектра, которые сконцентрированы в непосредственной близости от источника излучения [6]. Эта информация теряется при незначительном удалении от источника и не может быть обработана с помощью обычных линзовых систем.

Одним из перспективных методов передачи субволнового изображения на расстояние, большем длины волны с пространственным разрешением $\lambda/10$ является предложенный в [6] метод канализации изображений. Авторами было показано, что специально разработанный фотонный кристалл в таком режиме является специфическим метаматериалом, в котором нет эванесцентных (затухающих) волн. В режиме канализации слой такого метаматериала функционирует не как обычная линза, которая фокусирует излучение в фокальное пятно, а как волноведущая структура, передающая изображение с одной поверхности слоя на другую. Реализация такого режима возможна только в случае, когда метаматериал имеет плоскую изочастотную поверхность, а его толщина удовлетворяет условиям резонанса Фабри – Перо (равна целому числу полуволн).

Цель работы – исследование процессов передачи распределения электромагнитного поля от двух рядом расположенных точечных источников в линзе, выполненной в виде решетки сходящихся медных проволочек, с разрешающей способностью много меньшей длины волны.

Основная часть

Общий вид исследуемой проволочной линзы [7] представлен на рис. 1,б.

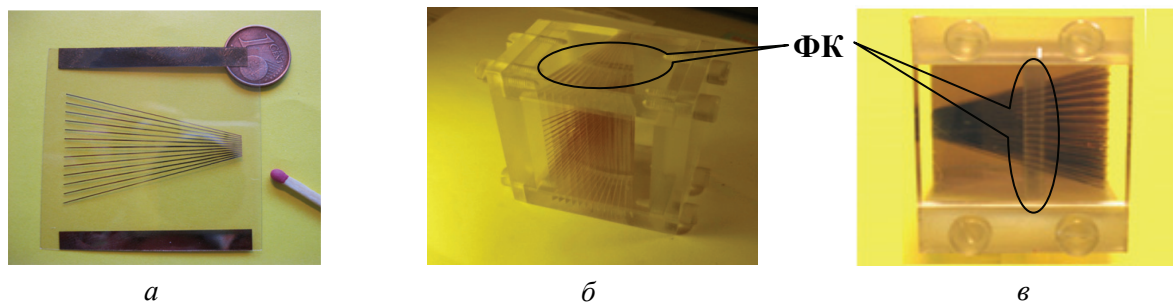


Рис. 1. а – слюдяная пластинка с напыленными медными полосками; б – проволочная линза, выполненная из медных проволочек; в – проволочная линза со встроенным диэлектрическим фазовым компенсатором (вид сбоку)

Исследуемая линза – это собранная из слюдяных пластинок ($\epsilon = 7.2$), периодическая структура, которая представляет собой решетку из 13×13 проволочек толщиной 0.15 мкм , напыленных в виде медных полосок на слюдяные пластинки (рис. 1, а). Толщина слюдяных пластинок составляет 0.05 мм . Пластины (13 штук) закреплены в полистироловом корпусе ($\epsilon = 2.55$) и размещены симметрично относительно центра корпуса (рис. 1, б). Таким образом, период между проволочками в широкой части линзы составляет 2.4 мм и градиентно уменьшается до 0.4 мм в узкой части, вследствие чего проволочки имеют различную длину и «сходящийся характер». Входной поверхностью линзы является плоскость с меньшими расстояниями между слюдяными пластинками (узкая апертура). Выходной плоскостью (широкой апертурой) линзы является плоскость линзы с большими расстояниями между слюдяными пластинами. Для компенсации разности фаз, которая появляется из-за различной физической длины проволочек, в исследуемую линзу встроены диэлектрический фазовый компенсатор (рис. 1, б, в), выполненный из полистирола ($\epsilon = 2.55, tg\delta = 0.5 \times 10^{-3}$). Фазовый компенсатор (ФК) представляет собой сегмент сферы. Он собран из 12 долей, размещенных приблизительно в середине линзы (рис. 1, б, в). Размеры ФК рассчитывались аналогично работе [5]. ФК имеет максимальную толщину в области, соответствующей расположению центральной проволочки линзы, и его толщина постепенно уменьшается к краям и углам (для четырех угловых проволочек толщина компенсатора равна нулю). Использование в проволочной линзе ФК нивелирует различие между электрической и физической длиной в проволочках и тем самым обеспечивает необходимые условия для реализации, описанного ранее, метода канализации изображений.

На первом этапе исследований были измерены спектральные характеристики линзы в частотном диапазоне от 2 до 24 ГГц и выполнена отладка экспериментальной методики измерения характеристик спектра. В ходе анализа спектра (рис. 2, а) были обнаружены периодические частотные области с высоким уровнем прохождения. Наилучшим образом из них соответствуют требованиям резонанса Фабри – Перо области 1 и 2 (рис. 2, а), т.е. для данных частот в линзе имеет место режим канализации энергии. Линза работает как волноведущая структура.

Следующим этапом было исследование фокусирующих свойств исследуемой проволочной линзы. Исследования проводились с помощью волновода WR90 с размерами $(22.5 \times 9.5 \times 25) \text{ мм}$, который служил источником однородного поля.

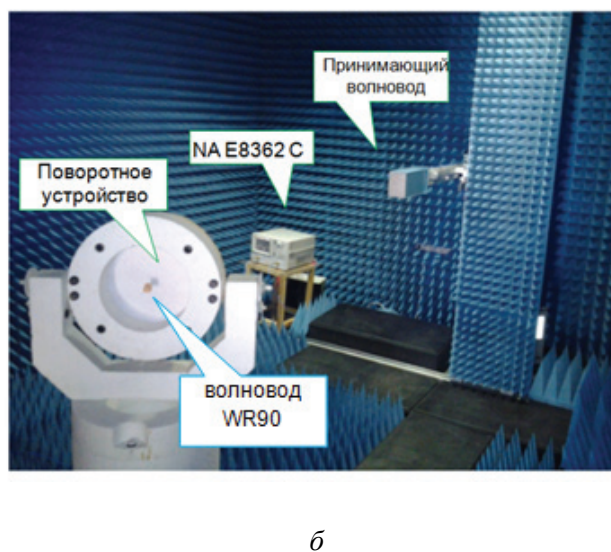
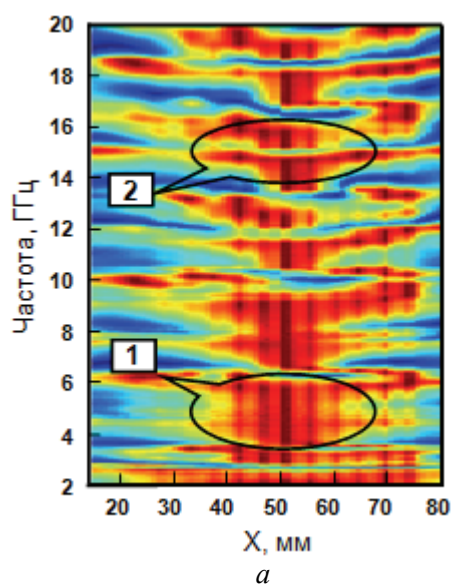


Рис. 2. а – спектр прохождения в проволочной линзе, выполненной из медных проводников; б – общий вид экспериментальной установки по измерению диаграммы направленности проволочной линзы

Рабочий диапазон волновода составляет 8 – 16 ГГц. Общий вид экспериментальной установки по измерению диаграммы направленности линзы представлен на рис. 2, б.

На рис. 3, а представлены экспериментально измеренные диаграммы направленности для двух случаев: в первом случае была измерена диаграмма направленности волновода с диафрагмой, которая обеспечивает на выходе из волновода однородное поле (линия 1), во втором – диаграмма направленности волновода со стоящей вплотную проволочной линзой (линия 2). Измерение диаграммы направленности производилось только в одной поперечной плоскости (E-plane) т.к. численный расчет трехмерной диаграммы направленности показал, что диаграммы направленности для E-plane и для трехмерного случая практически симметричны. Из рис. 3, а видно, что для случая волновода со стоящей вплотную проволочной линзой главный лепесток диаграммы стал уже в сравнении с диаграммой волновода (линия 1).

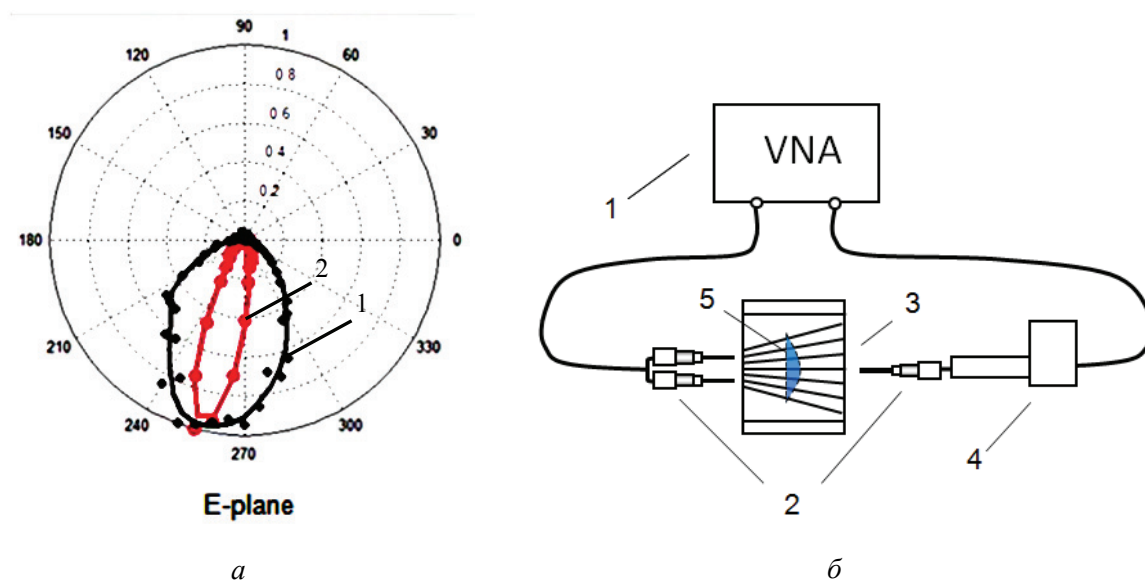


Рис. 3. а – диаграмма направленности проволочной линзы в E-плоскости на частоте 11.9 ГГц: 1 – волновод; 2 – линза с волноводом; б – схема экспериментальной установки измерения характеристик спектра в проволочной линзе: 1- векторный анализатор цепей (VNA), 2 – коаксиальные кабели, 3 – исследуемая проволочная линза, 4 – прецизионный трехкоординатный сканер, 5 – фазовый компенсатор

Этот эффект объясняется тем, что проволочная линза поддерживает так называемые волны линии передач или ТМ – поляризованные волны [8], которые переносят электромагнитную энергию строго вдоль проволочек с фиксированной фазовой скоростью, поперечная составляющая волнового вектора при этом может быть произвольной.

Так как исследуемая линза работает в режиме канализации изображения и геометрия линзы имеет «сходящийся характер», то за счет интерференции ТМ-волн на выходе узкой апертуры линзы имеет место увеличение интенсивности распределения картины поля.

Дальнейшим направлением экспериментальных исследований была демонстрация возможности передачи проволочной линзой субволнового изображения. А именно реализована передача распределения поля от двух точечных источников, расположенных в плоскости, нормальной к оси (в плоскости узкой апертуры) линзы, состоящей из решетки медных проволочек.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 3, б. Источником излучения служил векторный анализатор цепей – Network Analyzer VNA E8362C. Исследуемая структура располагается между открытыми коаксиальными кабелями. Две дипольные антенны (в виде коаксиальных кабелей), которые являются источниками, поднесены на расстояние 1 мм от поверхности узкой апертуры проволочной линзы.

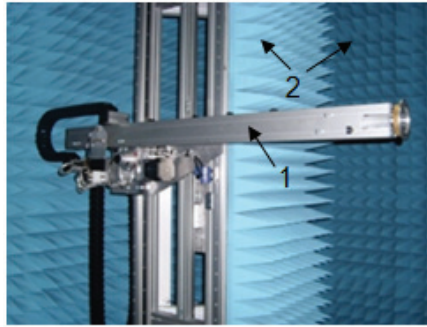


Рис. 4. 1 – прецизионный трехкоординатный сканер (X, Y, Z),
2 – широкополосные пирамидальные поглотители: Eccosorb VHP-12-NRL

Аналогичным коаксиальным кабелем, расположенным на расстоянии 1 мм от поверхности широкой апертуры линзы, представлен приемник. С помощью приемника также выполняется сканирование распределения электромагнитного поля в плоскости нормальной к оси линзы.

Исследования проводились с помощью прецизионного трехкоординатного сканера (X, Y, Z) (рис. 4), который позволяет регистрировать трехмерные картины пространственного распределения поля вблизи объекта. Было выполнено сканирование ближнего поля на поверхности широкой апертуры проволочной линзы. Результаты сканирования представлены на рис. 5.

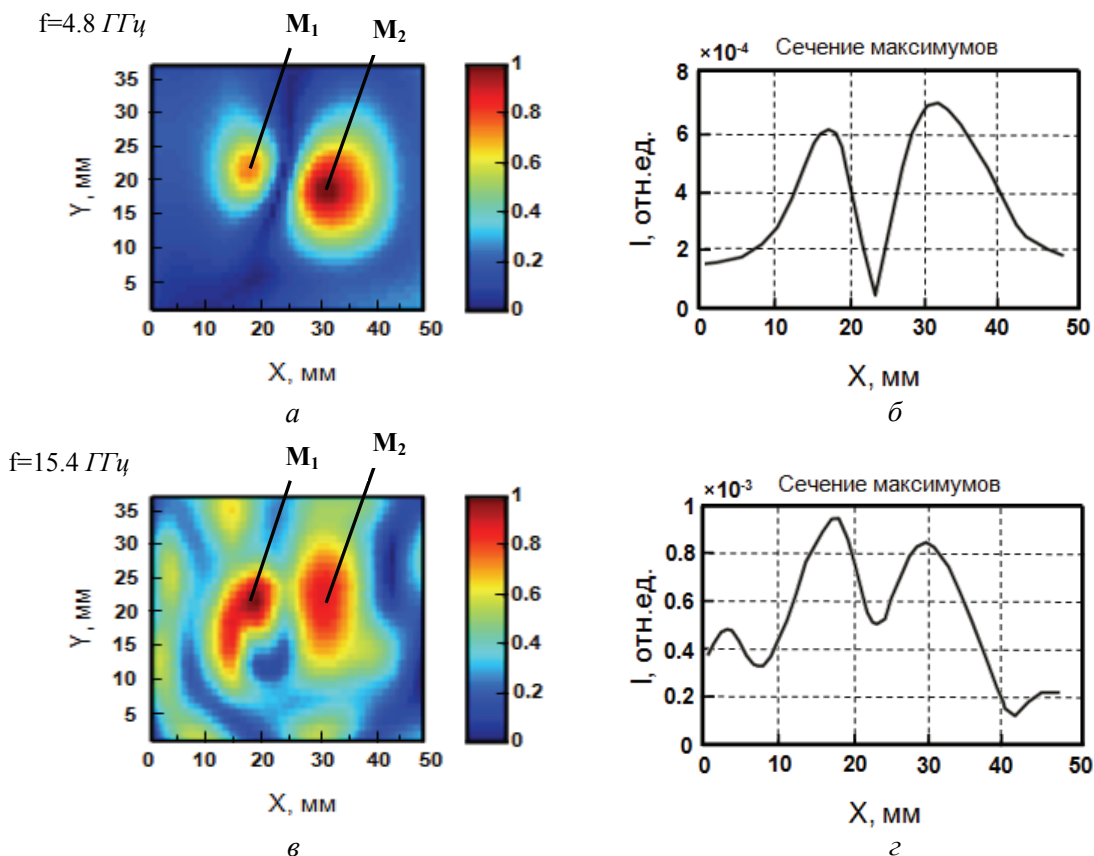


Рис. 5. Экспериментальные результаты сканирования изображения поля от двух точечных источников на поверхности широкой апертуры проволочной для разных частот (в относительных единицах)

Когда волна определенной частоты (значение этой частоты соответствует резонансу Фабри – Перо), проходит через линзу, то передаваемая мощность оказывается сосредоточенной в окрестности оси структуры.

Наилучшее качество субволнового изображения наблюдалось при 4.8 ГГц. Видно что, на широкой апертуре проволочной линзы четко различимы два острых максимума М1, М2 (рис. 5, а, б) распределения поля от двух точечных источников, что подтверждает способность проволочной линзы передавать изображение с разрешением много меньшим длины волны.

Оценка радиуса изображения (по половинному уровню интенсивности поля), полученного при помощи исследуемой линзы показала разрешающую способность $\lambda/15$.

Аналогичный эффект по передачи субволнового изображения, но с худшим качеством наблюдаются на частоте 15.4 ГГц (рис. 5, в, г). Эта частота также удовлетворяет условиям резонанса Фабри – Перо, которые возникают, когда толщина проволочной линзы равна целому числу полуволн. В этом случае наблюдаемые эффекты хорошо описываются с помощью режима канализации. Предполагается, что причинами ухудшения качества изображения со сверхразрешением для данной частоты являются:

- наличие в проволочной линзе переменного (в зависимости от координат) эффекта сильной пространственной дисперсии;
- физические длины проволочек в линзе не совпадают с их электрическими длинами.

Заключение

Таким образом, в рамках исследования физических механизмов распространения электромагнитных волн миллиметрового диапазона в линзе, выполненной из сходящихся медных проволочек и снабженной диэлектрическим фазовым компенсатором, были получены следующие результаты:

- 1) экспериментально продемонстрировано явление концентрации электромагнитной энергии проволочной линзой и проанализированы фокусирующие свойства проволочной линзы;
- 2) экспериментально продемонстрирована передача проволочной линзой субволнового изображения с разрешением около $\lambda/15$.

Экспериментальные измерения выполнены в научно-исследовательской лаборатории «Метаматериалы» Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики.

Авторы выражают благодарность д-ру физ.-мат.наук Белову П.А. за плодотворную дискуссию и ценные замечания.

Список литературы: 1. J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, W. J. Stewart, 1998 Low frequency plasmons in thin-wire structures // J. Phys.:Condens. Matter., 10 22 (June 1998), 47854809 , 0953-8984. 2. P. A. Belov, S. A. Tretyakov, A. J. Viitanen. Dispersion and Reflection Properties of Artificial Media Formed By Regular Lattices of Ideally Conducting Wires. // J. Electromagn. Waves Applic. 2002, 11531170, 0920-5071. 3. L. V. Panina, K. Mohri Magneto-impedance effect in amorphous wires // Appl.Phys.Lett, 1994, 11891191, 0003-6951. 4. P.A. Belov, Yan Zhao, Simon Tse, Transmission of images with subwavelength resolution to distances of several wavelengths in the microwave range // Phys. Rev. B, 77, 193108, 2008. 5. Yan Zhao, George Palikaras, Pavel A. Belov. Magnification of subwavelength field distributions using a tapered array of metallic wires with planar interfaces and an embedded dielectric phase compensator // New Journal of Physics 12 (2010) 103045. 6. Belov P.A., Simovski C.R., Ikonen P. Canalization of subwavelength images by electromagnetic crystals // Phys. Rev. B. 2005. V. 71. p. 193105 (1-4). 7. L. V. Kozhara, S. Yu. Polevoy, I.V. Popov, S. V. Nedukh. Spatial distribution of the electromagnetic field in the vicinity of tapered wire medium metamaterial // 8th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'13), June 23-28, 2013, p. 115-117. 8. Belov P.A., Marques R., Maslovski S.I. et al. Example of bianisotropic electromagnetic crystals : The spiral medium // Phys. Rev. B. – 2003. V. 67. – P. 113103.