

УДК 621.396.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ С МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ**А.О.Никитин, М.А.Хаванова, Р.В.Петров, Т.Уеда*, С.Томита******SIMULATION OF ANTENNA ARRAY WITH MAGNETOELECTRIC CONTROL****A.O.Nikitin, M.A.Khavanova, R.V.Petrov, T.Ueda*, S.Tomita*****Институт электронных и информационных систем НовГУ, hma41@mail.ru***Институт технологии Киото, Япония****Институт науки и технологии Нара, Япония*

Рассматриваются вопросы моделирования антенной решетки, для управления диаграммой направленности которой используется магнитоэлектрический элемент. В качестве модели использована двухэлементная фазированная решетка с размером отдельного излучателя $30 \times 25 \times 1$ мм. Моделировался излучающий микрополосковый щелевой элемент П-типа со встроенным в подложку ферритовым диском из иттрий-железистого граната. Получены фазо- и амплитудно-частотные характеристики элемента. Элемент показал хорошую управляемость характеристиками при моделировании магнитоэлектрического эффекта. При изменении подмагничивающего поля с 240 до 250 Э резонансная частота устройства изменялась на величину около 30 МГц. В результате моделирования установлено, что при наличии подмагничивающего поля величиной 240 Э и моделировании при расчётах магнитоэлектрического эффекта значительно изменяются форма и амплитудная характеристика диаграммы направленности фазированной двухэлементной решетки.

Ключевые слова: СВЧ антенны, магнитоэлектрический элемент, антенные решетки

This paper is devoted to the modeling of antenna array in which the magnetoelectric element is used to control the directional diagram. A two-element phased array with the size of the radiating element of $30 \times 25 \times 1$ mm was used as the model. We simulated the microstrip slot radiating element of П-type with a built-in ferrite disc of yttrium-iron garnet. The phase- and amplitude-frequency characteristics of the element were obtained. The element showed good controllability of characteristics when simulating magnetoelectric effect. The resonant frequency of the device was changed by about 30 MHz when changing bias field from 240 to 250 Oe. The simulation of two-element phased antenna array resulted in significant changes of its shape and directional diagram in the presence of bias field of 240 Oe and the simulation calculations of the magnetoelectric effect.

Keywords: microwave antennas, magnetoelectric element, antenna array

Вступление

Важным этапом на пути построения новых технических устройств является этап моделирования. Развитие методов моделирования антенн и их применение для оптимизации параметров разрабатываемых изделий — ключевой фактор ускоренного выполнения проектных работ. В то же время новые материалы, применяемые в современных

антенных системах, усложняют задачи моделирования и ставят жесткие требования к используемому программному обеспечению. В данной работе проводится исследование магнитоэлектрических (МЭ) материалов на предмет возможности использования их в качестве управляющего звена для фазированных решеток. МЭ материалы — это класс веществ, которые меняют свои магнитные свойства под действием приложенного электрического поля

[1], что может быть использовано для проектирования различных приборов, в том числе и в диапазоне СВЧ [2,3]. Для управления фазированными антенными решетками (ФАР) был предложен ряд СВЧ МЭ устройств [4], в том числе МЭ фазовращатели [5,6]. Реализации идеи управления ФАР с помощью МЭ элементов посвящены работы [7,8], где обсуждается МЭ управляющий элемент — резонатор — антенна, и работа [9], где показана практическая реализация МЭ ФАР. Таким образом, цель этой работы — найти пути оптимизации и улучшения характеристик МЭ ФАР, осуществить эффективный контроль диаграммы направленности (ДН) антенны — является и актуальной, и востребованной.

Алгоритм выполнения расчетов программой моделирования

Для моделирования была выбрана одна из программ, в которой реализован метод конечных элементов. Данный метод хорошо подходит для расчета трехмерных моделей с произвольной геометрией. Сущность метода заключается в следующем. На начальном этапе производится начальная генерация сетки. В результате чего весь объем модели адаптивно разбивается на конечные элементы (тетраэды). В узлах сетки вычисляется электромагнитное поле для заданной частоты, которое удовлетворяет уравнениям Максвелла и заданным граничным условиям. После рассчитывается обобщенная матрица рассеяния всей структуры. Далее для каждого конечного элемента осуществляется локальная оценка погрешности. Элементы сетки с относительно высокой погрешностью переразбиваются на более мелкие элементы (тетраэды). И заново рассчитывается обобщенная матрица рассеяния. Наконец, вычисляется параметр, характеризующий степень различия матриц рассеяния, рассчитанных для двух соседних итераций. Если величина этого параметра становится

меньше заданного значения, вычисления прекращаются. В противном случае они продолжают вплоть до достижения заданного максимального числа итераций.

Конструкция антенны для моделирования

В качестве модели для расчета была выбрана антенна, ранее рассмотренная в работе [9]. Это разновидность микрополосковой антенны с вырезанной на верхней пластине щелью, так называемая антенна П-типа. Щель служит эффективной неоднородностью для возбуждения в режиме резонанса круговой поляризации электромагнитного поля, что крайне важно для наилучшей работы ферритовых элементов конструкции. На рис.1 показана модель излучающего элемента П-типа с ферритовым диском из пленки иттрий-железистого граната (ИЖГ) на подложке галлий-гадолиниевого граната (далее — диск ИЖГ) и модель двухэлементной щелевой ФАР.

Размер антенны — 30×25 мм; материал подложки — FR5 (диэлектрическая проницаемость материала 5, $\text{tg} \delta \leq 0,0001$, толщина 1 мм); материал нижней стороны металлизации представляет собой идеальный проводник; материал верхней стороны металлизации — медь (толщина 35 мкм). Размеры щели: ширина — 0,2 мм; длина (от правого края пластины до центра отверстия под диск ИЖГ) — 10 мм; диаметр диска ИЖГ — 5 мм; толщина диска ИЖГ — 1 мм.

Для моделирования материала ИЖГ использовались следующие физические параметры: относительная диэлектрическая проницаемость — 15,3; тангенс диэлектрических потерь — $2 \cdot 10^{-4}$; намагниченность насыщения — 1780 Гс; коэффициент Ланде G — 2; ширина линии ферромагнитного резонанса — 100 Э (на частоте 8,3 ГГц); величина поля магнитного смещения модели ферритового диска пленки ИЖГ — 240 Э.

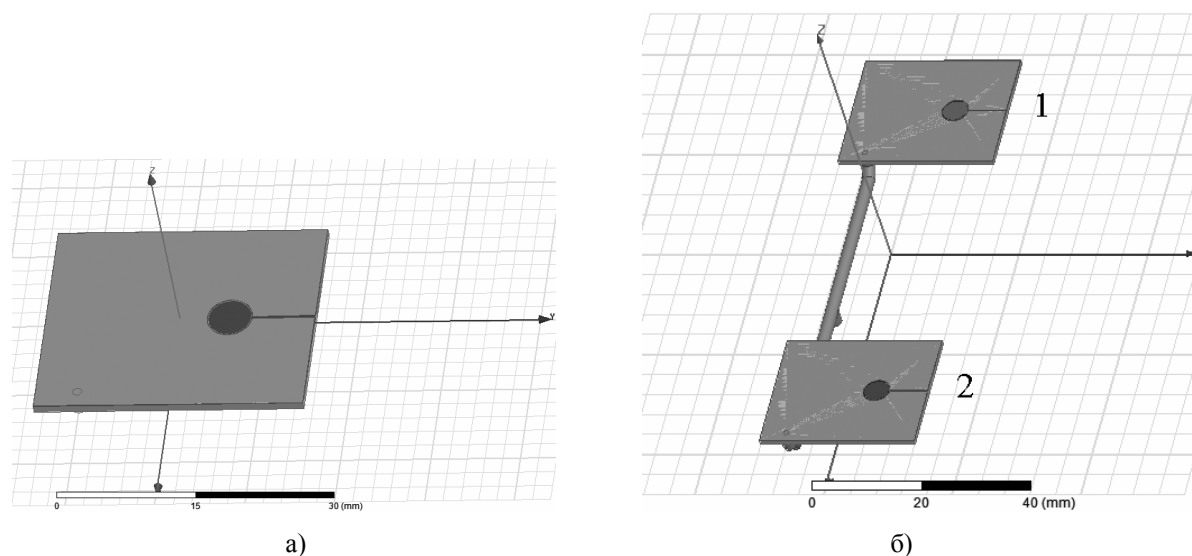


Рис.1. Конструкция антенны: а) модель излучающего элемента П-типа с ферритовым диском ИЖГ, б) модель двухэлементной щелевой ФАР

Частотные характеристики устройства

Для начала моделирования проверялось совпадение ранее полученных экспериментальных данных [7] с данными моделирования. На рис.2 приведена зависимость величины коэффициента отражения S_{11} от длины щели. Расчет показал хорошее совпадение результатов.

На рис.3 показана зависимость величины коэффициента S_{11} от величины поля магнитного смещения модели антенны с ферритовым диском ИЖГ. На практике величину магнитоэлектрического эффекта на СВЧ можно заменить на эффективный сдвиг линии ФМР под действием постоянного магнитного поля [2,3]. Таким образом, дальнейшее моделирование будет проведено эффективной заменой сдвига резонансной линии ФМР

под действием магнитоэлектрического эффекта на сдвиг под действием изменения подмагничивающего поля. Исследования показывают, что такое изменение наблюдается на практике в пределах 10-20 Э, что будет использовано в дальнейших расчетах.

Амплитудная характеристика устройства, представленная на рис.3а, показывает, что на резонансной частоте антенны около 2,1 ГГц изменение подмагничивающего поля от 230 до 260 Э позволяет эффективно изменять резонансную частоту излучателя, при этом меняется величина S_{11} . Также меняется фазовая характеристика устройства, что видно на рис.3б. Таким образом, изменение величины подмагничивающего поля приводит к изменению характеристик резонатора и антенной решетки в целом.

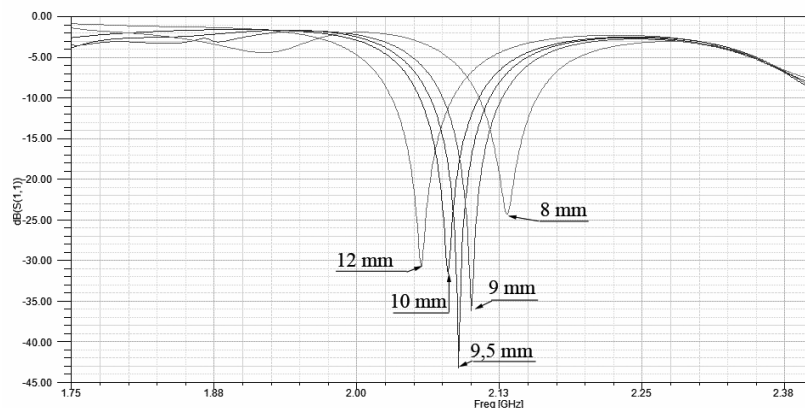
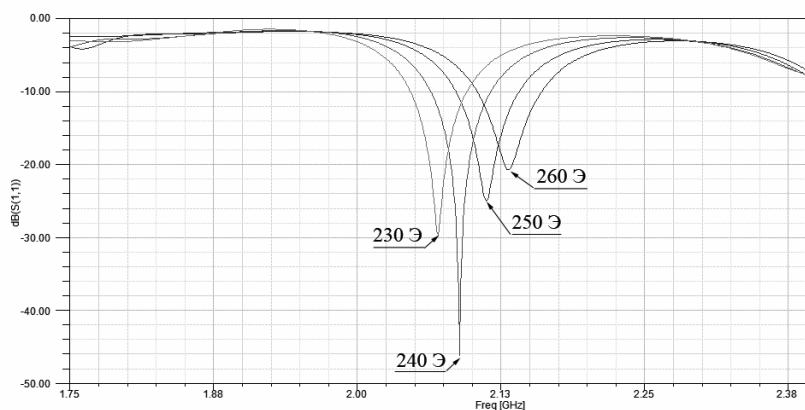
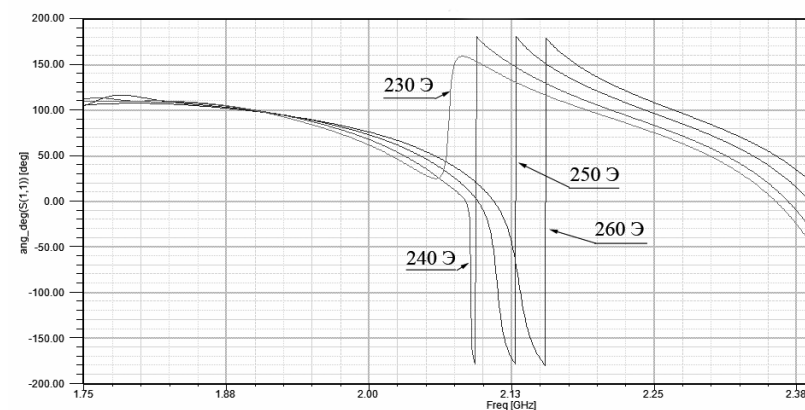


Рис.2. Зависимость величины коэффициента отражения S_{11} от длины щели



а)



б)

Рис.3. Зависимость величины коэффициента S_{11} от величины поля магнитного смещения модели с ферритовым диском ИЖГ: а) амплитудная характеристика, б) фазовая характеристика

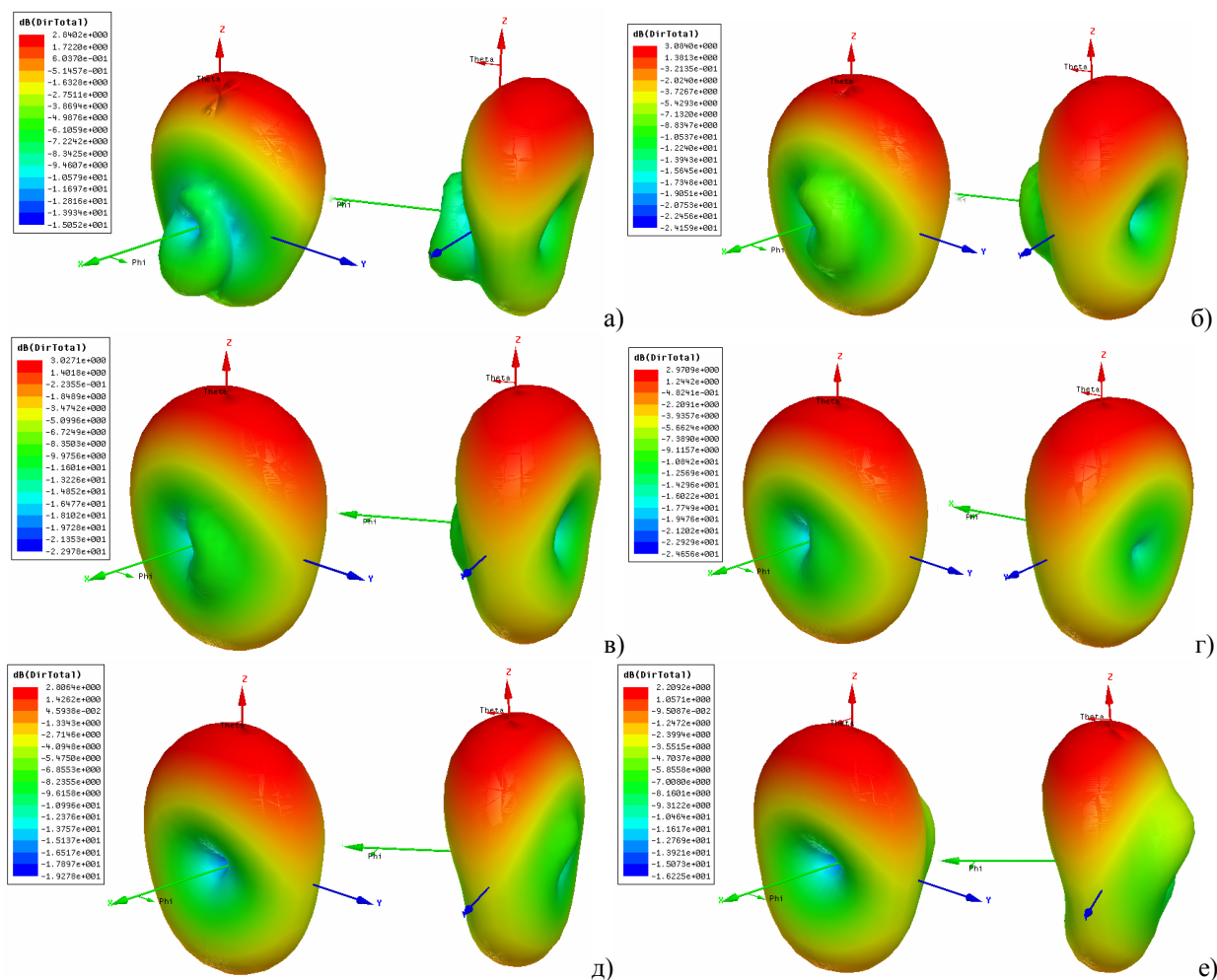


Рис.4. Диаграмма направленности двухэлементной ФАР в трехмерной плоскости при разных значениях полей магнитного смещения пленок ЖИГ в 1 и 2 излучающих элементах соответственно: а) 0 Э и 240 Э; б) 220 Э и 240 Э; в) 230 Э и 240 Э; г) 240 Э и 240 Э; д) 240 Э и 230 Э; е) 240 Э и 220 Э

Моделирование диаграммы направленности

В качестве модели для расчета была выбрана антенна, изображенная на рис.1б. Данные моделирования приведены на рис.4. Решетка состоит из двух одинаковых элементов. На каждый элемент раздельно подается магнитное смещение. Постоянное магнитное поле в 240 Э действует как подмагничивающее поле, а смещение в 10 Э симулирует приложенное к МЭ элементу электрическое поле величиной порядка 3 кВ/мм.

Два рисунка в паре — это одна и та же диаграмма с разных ракурсов. На рисунках однозначно наблюдается изменение как формы, так и амплитуды ДН. Таким образом, проведенное моделирование подтверждает ранее полученные экспериментальные характеристики и позволяет получить предварительные данные, необходимые для проектирования МЭ ФАР. Изменение поля на 10 Э дает сдвиг ДН порядка 5°.

Заключение

В статье рассматриваются вопросы моделирования антенной решетки для управления диаграммой направленности которой используется магнито-

электрический элемент. В качестве модели использована двухэлементная фазированная решетка с размером отдельного излучателя $30 \times 25 \times 1$ мм. Моделировался излучающий микрополосковый щелевой элемент П-типа со встроенным в подложку ферритовым диском из иттрий-железистого граната. Получены фазо- и амплитудно-частотные характеристики элемента. Элемент показал хорошую управляемость характеристиками при моделировании магнитоэлектрического эффекта. При изменении подмагничивающего поля с 240 до 250 Э резонансная частота устройства изменялась на величину около 30 МГц. В результате моделирования получено, что при наличии подмагничивающего поля величиной 240 Э и моделировании при расчетах магнитоэлектрического эффекта значительно изменяются форма и амплитудная характеристика диаграммы направленности фазированной двухэлементной решетки. В будущем будет проведено моделирование ФАР с мультиферроиковой подложкой, что позволит в дальнейшем изготовить технологичный вариант ФАР.

Работа выполнена в рамках исследовательского проекта РФФИ No. #15-57-50010.

References

1. Magnetoelectricity in Composites / Eds. M.Bichurin, D.Viehland. Singapore: Pan Stanford Publishing, 2012. 273 p.
2. Bichurin M.I. Magnetoelectrics in microwave range // *Ferroelectrics*. 1994. V.161. P.53.
3. Bichurin M.I., Petrov V.M. Composite magnetoelectrics: their microwave properties // *Ferroelectrics*. 1994. V.162. P.33.
4. Bichurin M.I., Petrov V.M., Petrov R.V., Kiliba Y. et al. Magnetoelectric microwave devices // *Ferroelectrics*. 2002. V.280. P.211-218.
5. Bichurin M.I., Petrov R.V. Magnetoelectric phasers for PAS // *Proc. of the 2 Intern. Conf. and Exhibition on Satellite Communication*. Moscow, 1996. P.236.
6. Bichurin M.I., Petrov R.V., Kiliba Yu.V. Magnetoelectric microwave phase shifters // *Ferroelectrics*. 199. V.204. P.311.
7. Петров, Р.В. Исследование магнитоэлектрического щелевого резонатора СВЧ-диапазона // *Инженерная физика*. 2012. №1. С.33-38.
8. Roman V. Petrov, Devata V. B. Murthy, Gollapudi Sreenivasulu and Gopalan Srinivasan. A slot antenna with magnetoelectric elements // *Microwave Opt. Technol. Lett.* 2013. Vol.55. №3. DOI 10.1002/mop.
9. Петров Р.В., Сринивасан Г. Проектирование магнитоэлектрической фазированной антенной решётки // *Вестник НовГУ. Сер.: Техн. науки*. 2009. №50. С.61-65.
10. Петров Р.В., Хаванова М.А. Расчет диаграммы направленности антенны с магнитоэлектрическим излучателем // *Вестник НовГУ*. 2012. №67. С.25-29.
1. Bichurin M., Viehland D., eds. Magnetoelectricity in Composites. Pan Stanford Publishing, Singapore, 2012. 273 p.
2. Bichurin M.I. Magnetoelectrics in microwave range. *Ferroelectrics*, 1994, vol. 161, no. 1-4, pp. 53-58.
3. Bichurin M.I., Petrov V.M. Composite magnetoelectrics: their microwave properties. *Ferroelectrics*, 1994, vol. 162, pp. 33-35.
4. Bichurin M.I., Petrov V.M., Petrov R.V., Kiliba Y. et al. Magnetoelectric microwave devices. *Ferroelectrics*, 2002, vol. 280, pp. 211-218.
5. Bichurin M.I., Petrov R.V. Magnetoelectric phasers for PAS. *Proc. of the 2nd Int. Conf. and Exhibition on Satellite Communication*. Moscow, 1996.
6. Bichurin M.I., Petrov R.V., Kiliba Yu.V. Magnetoelectric microwave phase shifters. *Ferroelectrics*, 1997, vol. 204, p. 311-319.
7. Petrov R.V. Issledovanie magnitoelektricheskogo shchelevogo rezonatora SVCh-diapazona [Research of microwave magnetoelectric slot resonator]. *Inzhenernaia fizika – Engineering Physics*, 2012, no. 1, pp. 33-38.
8. Roman V. Petrov, Devata V. B. Murthy, Gollapudi Sreenivasulu and Gopalan Srinivasan. A slot antenna with magnetoelectric elements. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2013, vol. 55, no. 3. doi: 10.1002/mop.
9. Petrov R.V., Srinivasan G. Proektirovanie magnitoelektricheskoi fazirovannoi antennoi reshetki [Designing magnetoelectric phased antenna array]. *Vestnik NovGU. Ser. Tekhnicheskie nauki – Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences*, 2009, no. 50, pp. 61-65.
10. Petrov R.V., Khavanova M.A. Raschet diagrammy napravlennosti antennoy s magnitoelektricheskim izluchatelem [The calculation of directivity pattern of antenna with magnetoelectric emitter]. *Vestnik NovGU (Spetsial'nyi vypusk / Sbornik) – Vestnik NovSU. Special Issue / Collected Series*, 2012, no. 67, pp. 25-29.