

УДК 621.396.67

Р.В.Петров, Г.Сринивасан*

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЁТКИ

Институт электронных и информационных систем НовГУ, Roman.Petrov@novsu.ru

** Оклендский университет, Рочестер, Мичиган, США*

In this paper the possibility of using magnetoelectric elements in phased antenna array is discussed. The measurement data of component behaviour and directional diagrams of magnetoelectric microwave phased antenna array are presented. Two types of radiators have been studied – a slot radiator (on a frequency of 2,4 GHz) and an elliptical radiator (on a frequency of 6 GHz). Using measurement results of the research phased antenna arrays were designed of corresponding frequencies.

Ключевые слова: магнитоэлектрическая фазированная антенная решетка, СВЧ диапазон, излучатели

Вступление

Эта работа посвящена изучению возможности применения в фазированных антенных решетках (ФАР) новых для функциональной электроники магнитоэлектрических (МЭ) элементов. Фазированная антенная решетка — это группа антенных излучателей, в которых относительная фазировка сигналов изменяется комплексно, так, что эффективное излучение антенны усиливается в каком-то одном, желаемом направлении и подавляется во всех остальных. Фазирование позволяет, например, формировать необходимую диаграмму на-

волнуют исследователей всего мира перспективы уменьшения управляющих воздействий на МЭ элемент, например, электрического поля.

Излучающие элементы

Теоретический подход к расчету и проектированию излучающих элементов с ферритами, используемых в антенных решетках, был представлен ранее в работе [5]. Для построения антенной решетки в нашей работе мы применили следующие конструкции антенных излучающих элементов (рис.1.).

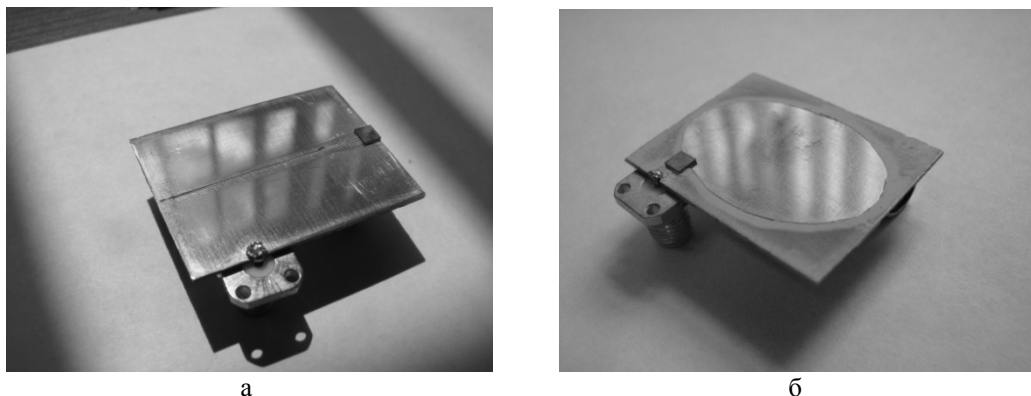


Рис.1. Антенные излучающие элементы: а — щелевой П-типа, б — эллиптический

правленности, управлять ее положением и формой. Управление диаграммой направленности используется в наземных и космических устройствах радиосвязи, радиолокации, радиоастрономии и т. д.

Магнитоэлектрический эффект проявляется в виде возникновения намагниченности под действием электрического поля и электрической поляризации под действием магнитного поля [1]. Магнитоэлектрический элемент управления — это устройство, конструкция которого обеспечивает управление фазой и амплитудой СВЧ волны посредством МЭ эффекта. Впервые перспективы создания ФАР с использованием магнитоэлектрических фазовращателей были описаны в статье [2]. Конструкции МЭ фазовращателей хорошо изучены и технологически освоены [3,4]. Последние годы отмечается неуклонный рост интереса к созданию устройств с использованием МЭ эффекта. Создание материалов с большим, даже гигантским МЭ коэффициентом — это наиболее актуальная тема научных исследований в настоящее время. Не меньше

Особенностью этих излучателей является то, что на определенной частоте и в определенной зоне на поверхности антенны создаются условия для возникновения электромагнитных колебаний с круговой циркуляцией поля. Подобные колебания эффективно взаимодействуют с ферритом. Магнитное поле, искусственно созданное нами при помощи магнитов, позволяет управлять частотой ферромагнитного резонанса. Таким образом, мы можем, изменяя магнитное поле, эффективно управлять характеристиками сконструированной антенны. С помощью управляемого ферритового или магнитоэлектрического компонента изменяется амплитуда и фаза излучаемой электромагнитной волны.

Щелевая антенна (рис.1а) имела следующие характеристики: резонансная частота 2,4 ГГц; размеры антенны 35×25×1 мм; длина щели 12 мм; коэффициент стоячей волны (КСВ) на резонансной частоте 1,002; $S_{11} = -60$ дБ; подмагничивающее поле фиксировалось на уровне 320 Э. При изменении управляющего напряжения на МЭ элементе от 0 до 200 В из-

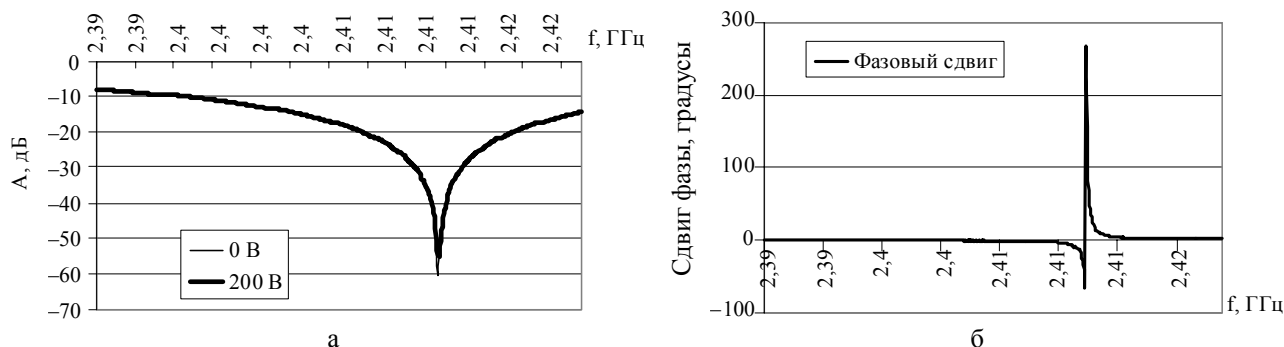


Рис.2. Изменение характеристик щелевой антенны: а — амплитуды, б — фазы

менялись характеристики антенны: S11 становился равным -56 дБ, а фаза отраженного сигнала изменялась в пределах 360° (рис.2.).

Для эллиптического элемента (рис.1б) были получены следующие характеристики: резонансная частота $3,98$ ГГц; размеры антенны $35 \times 25 \times 1$ мм; эллипс длиной 22 мм с эксцентриситетом $0,65$; KCB на резонансной частоте $1,003$; S11 = $-51,7$ дБ; подмагничивающее поле на уровне 650 Э. При изменении подмагничивающего поля на 50 Э изменялись характеристики антенны: S11 становился равным $-29,4$ дБ, а фаза отраженного сигнала изменялась в пределах 204° (рис.3). Измерения проводились при различных подмагничивающих полях: первое — при 650 Э, второе — при 798 Э.

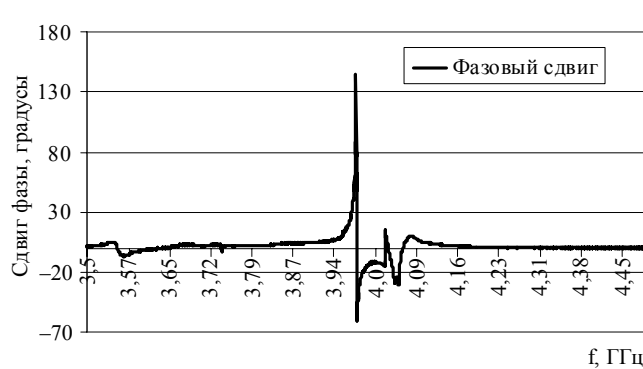
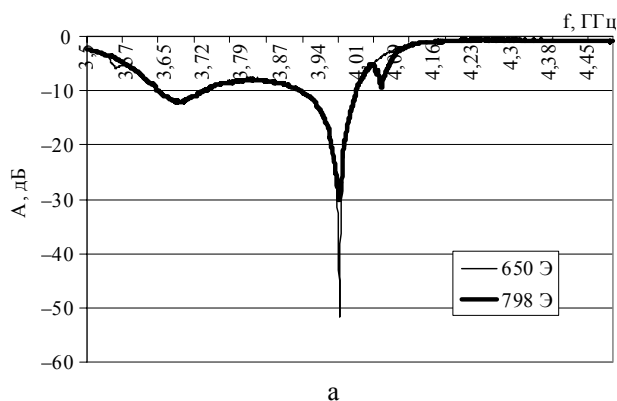


Рис.3. Изменение характеристик эллиптической антенны: а — амплитуды, б — фазы

Отметим особенности, присущие каждому из излучателей. Из приведенных характеристик антенн видно, что в случае со щелевой антенной происходит взаимодействие основного типа колебаний феррита с полем возбуждаемым в щели антенны. Изменения подмагничивающего поля приводят к изменению резонансной частоты и характеристик самой антенны. В случае же эллиптического резонатора такого эффекта не наблюдается, два резонанса — антенный и ферритовый — накладываются друг на друга. Ферритовый элемент в этом случае можно использовать как независимый фазовращатель на поверхности антенны. Характеристики и конструкция рассмотренных излучателей позволяют перейти к проектированию ФАР, использующих магнитную либо магнитоэлектрическую компоненты в конструкции.

Конструкция магнитоэлектрической фазированной антенной решетки

Фазированная антенная решетка обычно собирается из расположенных в одной плоскости и на одинаковом расстоянии друг от друга излучающих элементов, к которым подводятся равные по амплитуде и совпадающие по фазе сигналы микроволнового диапазона. Если сигналы излучаются в фазе со всех элементов решетки, то их амплитуды складываются в определенных точках пространства вдоль линии, перпендикулярной к плоскости решетки. Следовательно, излучаемый сигнал будет сильным, а сигнал, отраженный от объектов, лежащих на пути его распространения вдоль оси, перпендикулярной плоскости антенной решетки и в пределах малого угла в стороны от нее, будет иметь достаточную для его обнаружения интенсивность.

В качестве ферритовой компоненты использовалась пленка железо-итриевого граната толщиной $6,4$ мкм, нанесенная на подложку галлий-гадолиниевого граната толщиной 400 мкм с размерами 3×3 мм или 8×12 мм. МЭ элемент состоял из указанной выше ферритовой компоненты 3×3 мм и пьезоэлектрика PZT диаметром 3 мм, толщиной 200 мкм.

Разработанная нами ФАР представляет из себя линейную решетку, излучатели в которой расположены последовательно друг за другом (рис.4).

Рассматривались также варианты параллельного расположения излучателей, в котором крайний излучающий элемент имеет магнитоэлектрический элемент управления. Изучались диаграммы направ-

ленности для периодов решетки от $0,1$ до $1,1$ длины волны. Расстояние от антенной решетки до приемной антенны при измерениях выбиралось не менее 10 длин волн. В качестве генератора и измерителя сигналов использовался PNA Network Analyzer E8361A. Для предварительного деления сигнала использовались СВЧ делители PE 2031 и PE 2028. На все излучающие элементы ФАР СВЧ сигнал приходит одновременно. Затем на крайнем элементе изменяются фаза сигнала и коэффициент передачи антенны с помощью МЭ элемента управления, что приводит к изменению диаграммы направленности ФАР. Фазированная антенная решетка закреплена на вращающемся основании, что позволяет измерять диаграмму направленности с точностью до градуса.

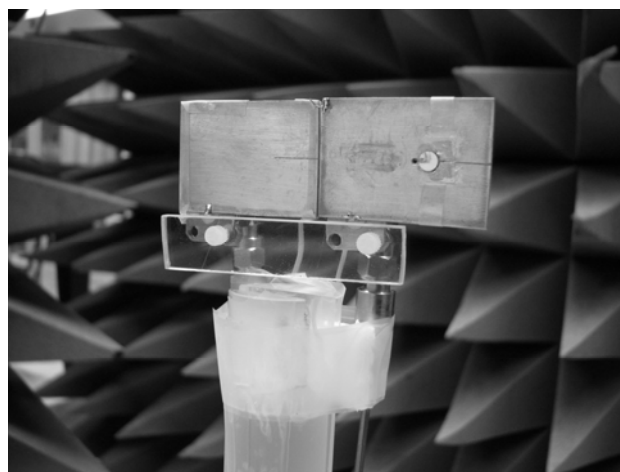


Рис.4. Двухэлементная щелевая ФАР с магнитоэлектрическим управляющим элементом

Управление МЭ элементом (рис.4) осуществлялось от регулируемого блока питания 0 — 400 В. На магнитоэлектрический элемент подавалось напряжение до 400 В, при этом антенна подключалась через блок развязки по постоянному току, чтобы предотвратить попадание высокого напряжения на СВЧ генератор. Для предварительного подмагничивания МЭ элемента использовалась винтовая система с постоянными магнитами. Также исследовались трехэлементная и четырехэлементная щелевые фазированные антенные решетки. МЭ щелевая фазированная антенная решетка, показанная на рис.1а, имела следующие характеристики: резонансная частота 2,4 ГГц; размеры одного элемента антенны $35 \times 25 \times 1$ мм; длина щели 12 мм; КСВ на резонансной частоте 1,002; $S_{11} = -53$ дБ; подмагничивающее поле на уровне 320 Э. При изменении подмагничивающего поля на 10 Э изменялись характеристики антенны: S_{11} становился равным -46 дБ, а фаза отраженного сигнала изменялась в пределах 175° .

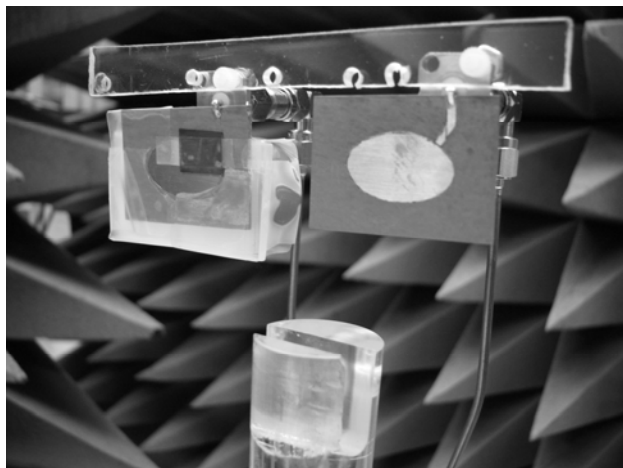


Рис.5. Двухэлементная эллиптическая ФАР с ферритовым управляющим элементом

Управление ферритовым элементом (рис.5) осуществлялось с помощью постоянного магнита с простой системой фиксации. Характеристики ФАР: резонансная частота 6 ГГц; размеры одного элемента антенны $35 \times 25 \times 1$ мм; эллипс длиной 22 мм с эксцентриситетом 0,65; КСВ на резонансной частоте равнялся 1,8; $S_{11} = -10,7$ дБ; подмагничивающее поле на уровне 1760 Э. При изменении подмагничивающего поля на 50 Э изменялись характеристики антенны: S_{11} становился равным -8,4 дБ, а фаза отраженного сигнала изменялась в пределах 11° .

Измерительный стенд

Для измерения параметров антенн использовались PNA Network Analyzer E8361A, электромагнит 5403, блок питания электромагнита Agilent 6673A, регулируемый блок питания Heathkit IP-32 0-600V, Гаусс/Тесламетр 5170. Схема измерения параметров излучателей, схема измерения параметров антенн и вид рабочего места представлены на рис.6-8 соответственно.

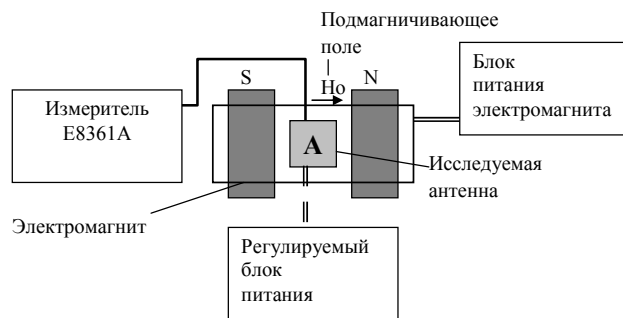


Рис.6. Схема установки для измерения параметров излучателей

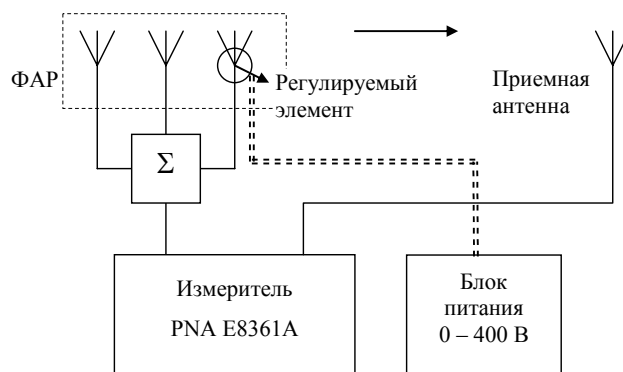


Рис.7. Схема измерения параметров антенн

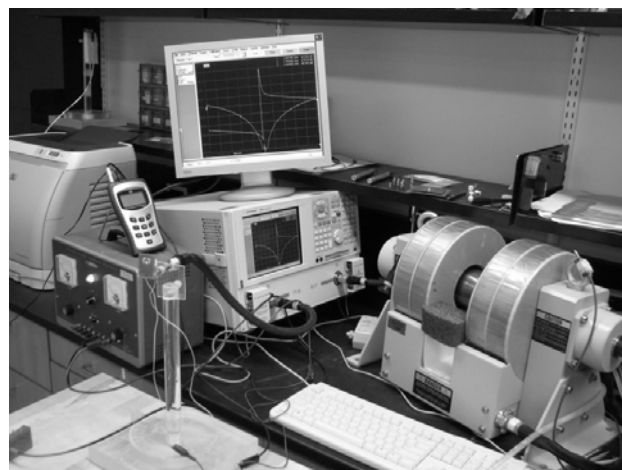


Рис.8. Общий вид рабочего места

Данные измерений

Мощность сигнала на выходе анализатора была установлена равной 1 мВт. Все значения амплитуды (A) на рис.9-10, выраженные в децибелах, даны относительно этого значения.

Двухэлементная щелевая МЭ ФАР имела диаграмму направленности, показанную на рис.9. Ее смещение достигало 12° .

Измерения, проведенные для трех- и четырехэлементной антенных решеток, содержащих один МЭ элемент, показали менее значительное изменение в диаграмме направленности, что объясняется меньшей долей вносимого МЭ элементом изменения в излучаемое поле.

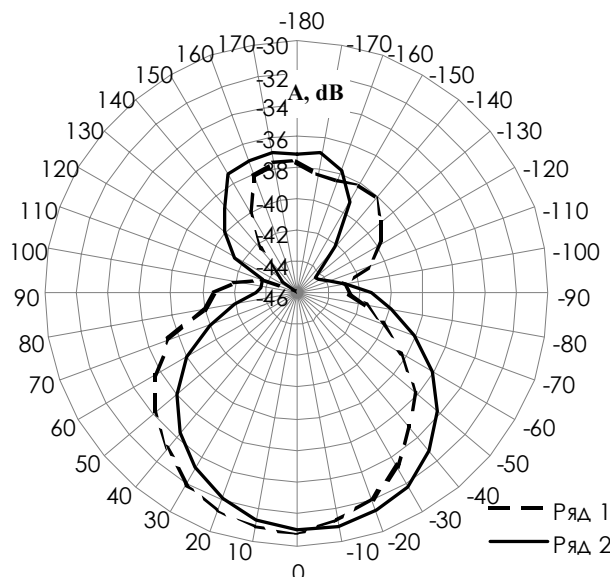


Рис.9. Диаграмма направленности двухэлементной щелевой ФАР с магнитоэлектрическим элементом

Двухэлементная эллиптическая ФАР с ферритовым элементом имела диаграмму направленности, показанную на рис.10. Смещение диаграммы направленности достигало 8° .

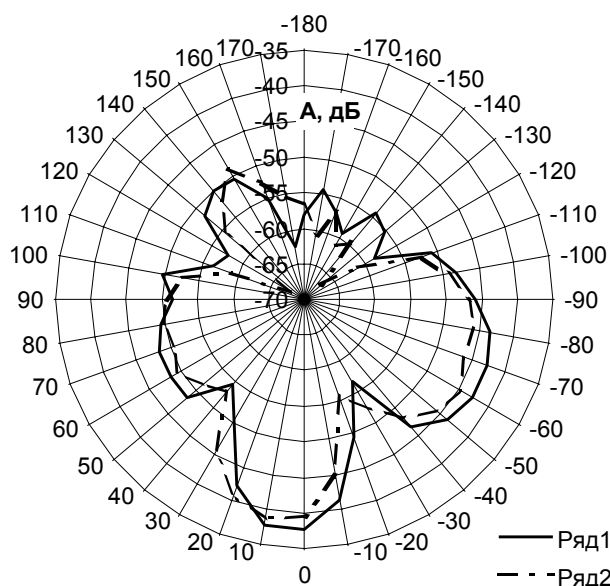


Рис.10. Диаграмма направленности двухэлементной эллиптической ФАР с ферритовым элементом

Расчетные данные

Согласно расчетным данным для двухэлементной ФАР достижимы углы перестройки диаграммы направленности до 12° , для трехэлементной — до 24° , для четырехэлементной — до 32° .

Заключение

Создана магнитоэлектрическая ФАР, имеющая управляемую диаграмму направленности. Рассмотрены два типа излучающих элементов и различные варианты построения ФАР на их основе. Сравнение излучающих элементов показало, что для щелевой антенны имеет место взаимодействие собственных типов колебаний ферритового резонатора с резонансом антенны, а для эллиптической антенны подобного взаимодействия нет, и два резонанса могут быть рассмотрены раздельно. Для щелевой П-типа МЭ ФАР поворот диаграммы направленности достигал 12° , а для эллиптической ферритовой ФАР — 8° . Магнитоэлектрическая ФАР — это новый перспективный тип антенн с управляемыми характеристиками диаграммы направленности. Он позволяет регулировать диаграмму направленности антенн с меньшей степенью инерционности, чем аналогичные с ферритовыми фазовращателями. В перспективе совершенствование технологии изготовления магнитоэлектрических элементов позволит перейти к низковольтному электронному способу управления без использования высоковольтных блоков питания.

1. Nan Ce-Wen, Bichurin M.I., Dong Shuxiang and Viehland D., Srinivasan G. // J. of Appl. Phys. 2008. V.103. P.031101.
2. Bichurin M.I., Petrov R.V. Magnetolectric Phasers For PAS // Proceedings of the 2nd International Conference and Exhibition on Satellite Communications (ICSC'96). Moscow, 1996. P.236-241.
3. Bichurin M.I., Petrov R.V., Kiliba Yu.V. // Ferroelectrics. 1997. V.241. P.97.
4. Татаренко А.С., Srinivasan G., Бичурин М.И. Электрически перестраиваемый СВЧ фазовращатель на основе феррит-пьезоэлектрических слоистых структур // 18th International Crimean Conference (CriMiCo 2008). Севастополь: Вебер, 2008. С.448-449.
5. Петров Р.В. // Вестник НовГУ. Сер.: Техн. науки. 2008. №46. С.24-27.