

## РАЗРАБОТКА МНОГОЛУЧЕВОЙ АНТЕННО-ФИДЕРНОЙ СИСТЕМЫ САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

*Тяпков Евгений Владимирович (staff@vniief.ru), Вертей Сергей Викторович,  
Мигачев Михаил Иванович, Терешин Олег Юрьевич*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Антенно-фидерное устройство, обеспечивающее излучение и прием радиоволн, является неотъемлемой частью любой радиотехнической системы. Одной из важнейших задач современной антенной техники, является построение многофункциональных пассивных и активных антенных систем, обеспечивающих высокоэффективную работу различных радиотехнических комплексов, например, радионавигации, радиоразведки и радиопротиводействия, связи с подвижными объектами, радиоуправления. Возможный путь реализации таких антенных систем состоит в использовании многолучевых антенн.

Цель, для которой разрабатывается данная антенная система, состоит в создании и обеспечении в заданных границах пространства высокого уровня энергии с эллиптической поляризацией поля.

В докладе рассматривается многолучевая антенно-фидерная система (МАФС), способная излучать 4 независимых луча (две пары пространственно-ортогональных лучей) с эллиптической поляризацией поля, что обеспечит равномерную по ширине диаграмму направленности во всем рабочем диапазоне частот посредством разделения первоначального сигнала на 4 равноамплитудных сигнала с заданным распределением фаз в диаграммообразующей схеме.

Рассчитаны элементы конструкции и основные электродинамические характеристики диаграммообразующей схемы и излучающей системы. Проведено моделирование данной антенно-фидерной системы.

**Ключевые слова:** МАФС, коническая рупорная антенна, диаграммообразующее устройство, матрица Батлера

## DEVELOPMENT OF A MULTI-BEAM ANTENNA-FEEDER SYSTEM OF SUPER-HIGH FREQUENCY WAVE BAND

*Tyapkov Evgeny Vladimirovich (staff@vniief.ru), Verthey Sergey Viktorovich,  
Migachev Mikhail Ivanovich, Tereshin Oleg Yurievich*

FSUE "RFNC-VNIIEF", Sarov Nizhny Novgorod region

Antenna-feeder device that provides radiation and reception of radio waves is an integral part of any radio engineering system. One of the most important tasks of modern antenna technology is the construction of multifunctional passive and active antenna systems that ensure highly efficient operation of various radio-TV complexes, for example, radio navigation, radio reconnaissance and radio counter measures, communication with mobile objects, radio control. A possible way for implementing such antenna systems is to use multi-beam antennas.

The purpose for which this multi-beam antenna-feeder system is being developed is to create and sustain a high energy level with elliptical field polarization within the given space boundaries.

The report examines a multi-beam antenna-feeder system capable of radiating 4 independent beams (two pairs of spatially orthogonal beams) with elliptical polarization of the field, which ensures a width-uniform directional pattern in the entire operating frequency range by dividing the initial signal into 4 equal-amplitude signals with a given distribution of phases in a beam synthesizer.

The design elements and the main electrodynamic characteristics of the beam synthesizer and of the radiating system are calculated. The simulation of this antenna-feeder system is carried out.

**Key words:** MAFC, conical horn antenna, beam-forming device, Butler matrix

## Введение

В настоящее время техника сверхвысоких частот (СВЧ) из области специальных применений вышла к массовому потребителю. Развитие вычислительной техники и телевизионного вещания, а также все возрастающие потребности общества в средствах приема, передачи и обработки информации привели к исключительно высоким темпам развития радиоэлектронных устройств, работающих на сверхвысоких частотах. Это происходит также благодаря постоянному прогрессу в области развития полупроводниковых технологий, радиофизики и электроники сверхвысоких частот. Любые системы, в том числе и системы связи, работающие на сверхвысоких частотах, используют новые поколения твердотельных приборов и устройств, на основе которых стали возможны: прием чрезвычайно слабых сигналов; микроминиатюризация аппаратуры; увеличение ее пропускной способности, длительности автономной работы; снижение ее цены и расходов, связанных с эксплуатацией. Разработка современной СВЧ аппаратуры требует от инженера умения решать комплексные задачи.

Одной из важнейших задач современной антенной техники, является построение многофункциональных пассивных и активных антенных систем [1], обеспечивающих высокоэффективную работу различных радиотехнических комплексов, например, радионавигации, радиоразведки и радиопротиводействия, связи с подвижными объектами, радиоуправления. Возможный путь реализации таких антенных систем состоит в использовании многолучевых антенн. Интерес к многолучевым антеннам определяется их способностью формировать в пространстве веер диаграмм направленности, каждой из которых соответствует определенный входной канал радиотехнической системы. Наиболее простой путь построения многофункциональных антенных систем заключается в рациональном использовании основных достоинств многолучевых и однолучевых устройств. Для создания антенных систем [2], позволяющих одновременно работать с несколькими объектами на некоторой площади целесообразно использовать многолучевые антенные системы.

В данной работе описан опыт разработки МАФС С-диапазона, выполненной на основе антенной системы, способной излучать 4 ортогонально независимых луча с эллиптической поляризацией поля.

Цель, для которой разрабатывается данная МАФС, состоит в создании и обеспечении в заданных границах пространства высокого значения коэффициента усиления.

## Состав многолучевой антенно-фидерной системы

МАФС представляет собой совокупность четырех излучателей и диаграммообразующей схемы, связанных между собой с помощью коаксиальных кабелей.

На рис. 1 представлена структурная схема МАФС. МАФС состоит из излучающей части 1, рис.1, которая может быть выполнена в виде решетки излучателей или раскрыва апертурной антенны; диаграммообразующей схемы (ДОС) 2, предназначенной для создания требуемых амплитудно-фазовых распределений поля излучающей части МАФС, и входов МАФС 3, представляющих собой поперечные сечения линий передачи с единственным распространяющимся типом волны.

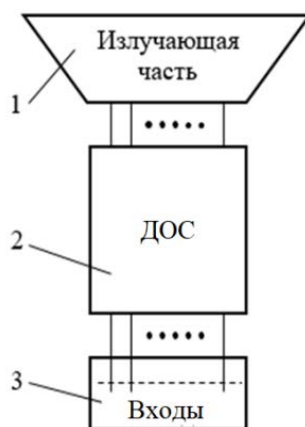


Рис. 1. Структурная схема МАФС:

- 1 – излучающая часть,
- 2 – диаграммообразующая схема;
- 3 – входы МАФС

С целью выбора антенной системы был проведен информационный поиск, в результате которого был найден ряд антенн [3], которые удовлетворяют требованиям технического задания. В число найденных типов антенн эллиптической поляризации входят:

- спиральные антенны [4];
- турникетная антенна [5];
- рупорные антенны.

Все перечисленные типы антенн создают однонаправленные диаграммы направленности (ДН) с максимумами в главном направлении. По ширине ДН и коэффициенту эллиптичности создаваемого поля все антенны удовлетворяют предъявляемым техническим требованиям. Однако, размеры турникетной и спиральных антенн в сантиметровом диапазоне частот будут малы, что усложняет их конструкторскую реализацию. Также турникетная и спиральные антенны обладают меньшей диапазонностью по частоте.

Коническая рупорная антенна имеет приемлемые поперечные и продольные габариты, а значит, обладает и большей прочностью конструкции. Кроме того, данная антенна обладает достаточной диапозонностью и наибольшей стабильностью характеристик в заданном диапазоне частот.

Для получения волн с эллиптической поляризацией используются фазирующие секции. Фазирующие секции служат для разложения линейно поляризованного поля на две ортогональные составляющие, расположенные в плоскости, перпендикулярной направлению распространению волны, и создания между ними требуемого фазового сдвига.

Хорошими диапазонными свойствами обладают фазирующие секции в виде отрезков круглых волноводов с диэлектрическими пластинами. Такая пластина влияет на фазовую скорость волны того типа, вектор  $\vec{E}$  которого параллелен поверхности пластины: фазовая скорость волны этого типа уменьшается.

Для формирования поля с вращающейся поляризацией, близкой к круговой, были использованы диэлектрические пластины из фторопласта, установленные под углом  $45^\circ$  к вектору  $\vec{E}$ .

В результате анализа рассмотренных типов антенн в качестве одиночного облучателя был выбран конический рупорный излучатель с диэлектрической вставкой из фторопласта.

Было проведено компьютерное моделирование выбранного одиночного излучателя (рис. 2).

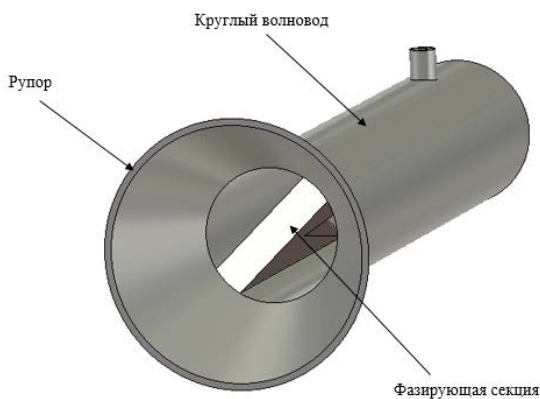


Рис. 2. Трехмерная модель рупорного излучателя

ДОС предназначена для формирования сигналов для отдельных элементов многолучевой антенны (МА). Задача разрабатываемой ДОС – разделить входной сигнал на четыре равноамплитудных сигнала с заданными фазами и сформировать четыре независимых луча (две пары пространственно-ортогональных лучей) в МА. С целью выбора ДОС, удовлетворяющей предъявляемым требованиям, был проведен информационный поиск.

Существуют два основных типа ДОС, активные и пассивные [6].

Главным недостатком активной ДОС является то, что ее сложность, необходимое пространство и стоимость растут линейно вместе с числом элементов. Для большого числа антенных лучей, ДОС ста-

новятся сложными, дорогостоящими и не реализуемыми. Основным преимуществом таких систем является гибкость в создании какой-либо конкретной направленности излучения.

Пассивная ДОС, в отличие от активной, имеет один порт для каждого отдельного луча. Это позволяет одновременно выполнять независимые операции в разных направлениях и появляется возможность одновременной обработки разных секторов пространства.

На практике, в основном, используются матрица Бласса и матрица Батлера [7]. Матрица Бласса более гибкая в отношении фазового распределения, чем матрица Батлера. Но большие потери в связи с наличием ограничивающих линий, ограничивают ее применение.

Матрица Батлера, в отличие от матрицы Бласса, обеспечивает полную передачу мощности от входа ДОС к антенной системе и проще с точки зрения конструкции.

В данной работе была выбрана ДОС на основе матрицы Батлера [8, 9].

На рис. 3 представлена модифицированная схема Батлера, удовлетворяющая заданным техническим требованиям.

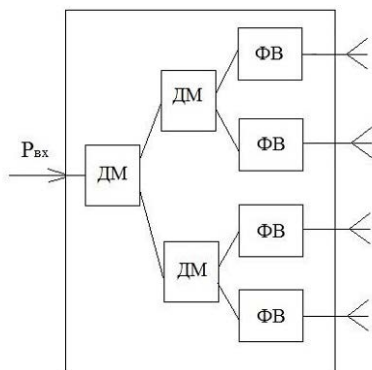


Рис. 3. Модифицированная схема Батлера

Данная схема может быть реализована при помощи волноводов, коаксиальных или микрополосковых линий.

ДОС на основе коаксиальных линий обладают достаточно большими габаритами, малой прочностью и сложны в изготовлении. ДОС на прямоугольных или круглых волноводах обладают большими габаритами и сложны в изготовлении.

Исходя из данных недостатков устройств на коаксиальных и волноводных линиях передачи, выбрана ДОС на основе микрополосковой линии (МПЛ), так как у нее более существенная степень интеграции, меньшие габариты и масса. Данный тип ДОС, как правило, состоит из направленных ответвителей, фазовращателей и соответствующих переходов.

В качестве направленных ответвителей использован кольцевой трехдецибелный делитель мощности, так как он обладает значительно меньшим уровнем потерь и слабой связью между плечами, по сравнению с ненаправленными и шлейфными делителями мощности.

Существует большое количество различных типов фазовращателей [10]. На практике, в основном, используют фазовращатели отражательного или проходного типа. Также большое распространение получили фазовращатели на ферритах. Основными их недостатками являются громоздкие габариты и невозможность реализации на микрополосковой линии на единой подложке.

В результате электродинамического моделирования была сформирована конечная модель ДОС (рис. 4).

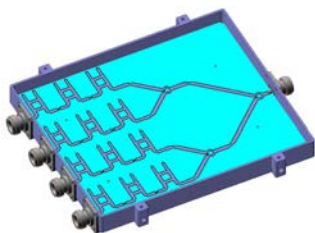


Рис. 4. Модель ДОС

## Результаты моделирования многолучевой антенно-фидерной системы

На основе антенной решетки (АР) [11], состоящей из четырех излучателей, и ДОС на основе модифицированной матрицы Батлера, была построена МАФС. МАФС строит в пространстве 4 независимых луча ДН. Амплитудное распределение на излучателях – равноамплитудное. Конструкция МАФС показана на рис. 5.

Параметры формируемых МАФС лучей на частоте  $f_0$  (см. таблицу).

Полученные в результате моделирования ДН МАФС на частотах  $f_0 - 250$  МГц,  $f_0$ ,  $f_0 + 250$  МГц представлены на рис. 6–8.

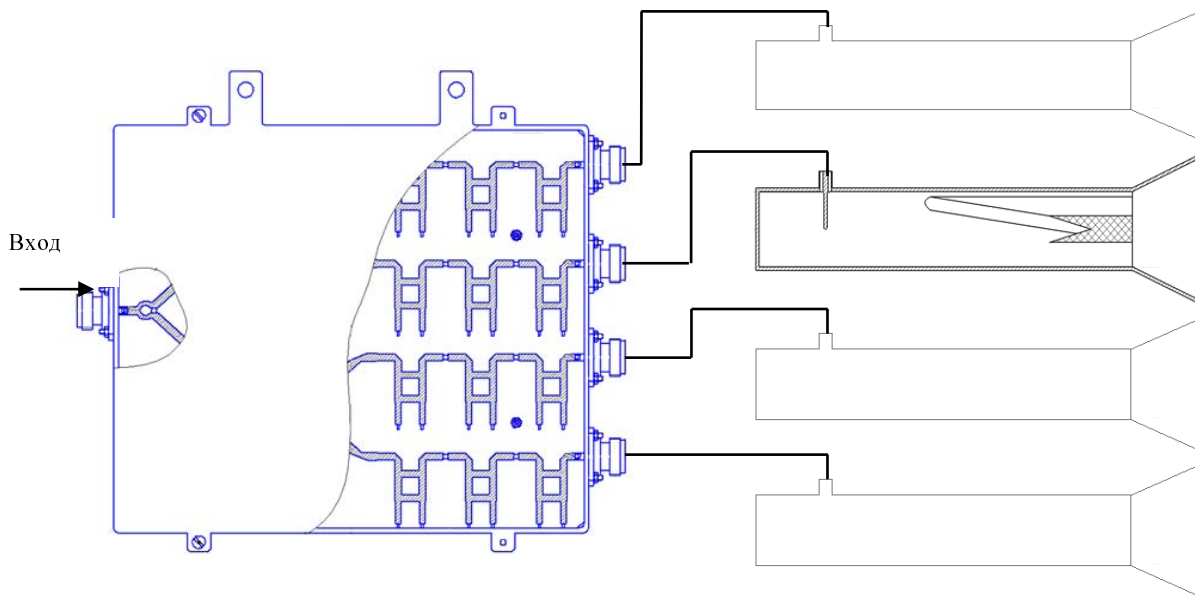
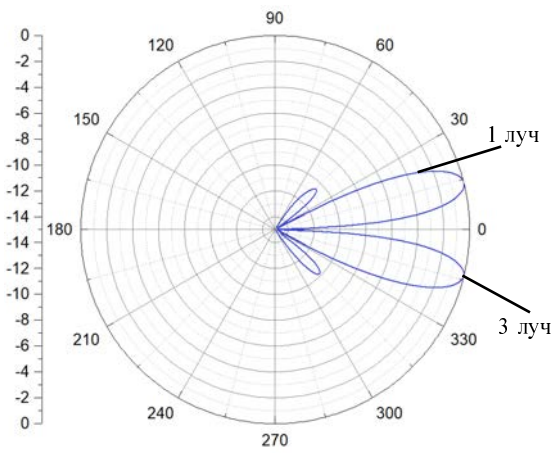


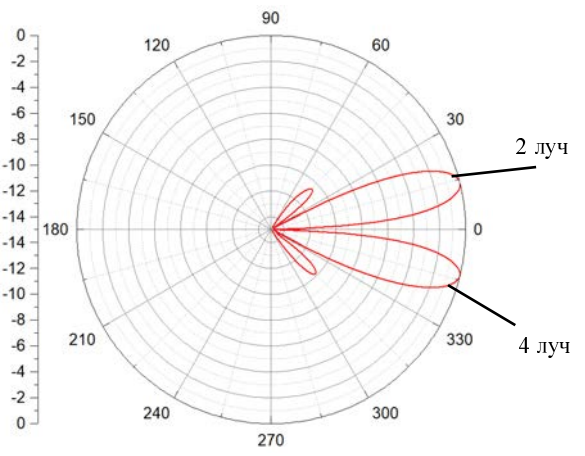
Рис. 5. Конструкция МАФС

Параметры формируемых МАФС лучей на частоте  $f_0$

Номер луча	Ширина луча по уровню половинной мощности	$KU_{max}$ , дБ	Отклонение луча	Уровень бокового лепестка, дБ	$K_s$
1	22°	10,8	12°	-10,1	0,74
2	21°	10,7	12°	-10,2	0,77
3	24°	11,5	12°	-10,8	0,75
4	24°	11,5	12°	-10,5	0,77

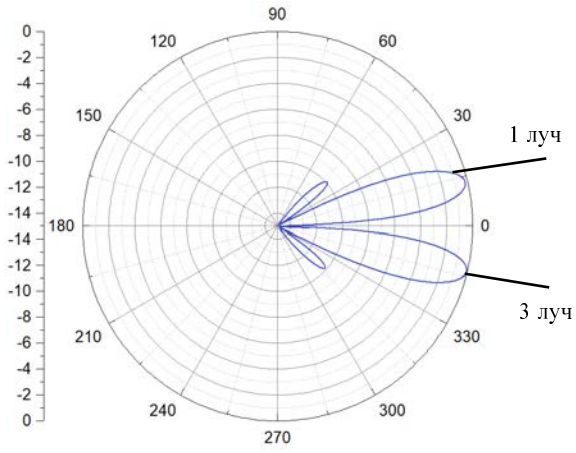


а

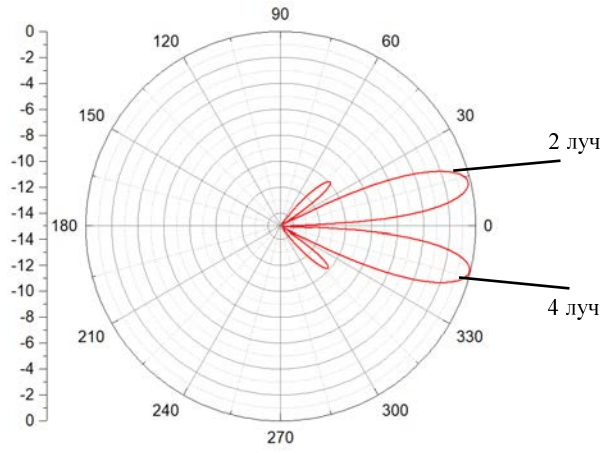


б

Рис. 8. Парциальная ДН для 2 пар ортогональных лучей на частоте  $f_0 - 250$  МГц: а – 1-я пара лучей 1,3; б – 2-я пара лучей 2,4

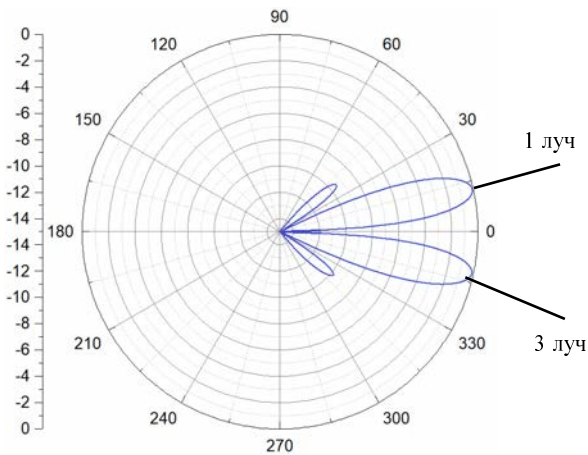


а

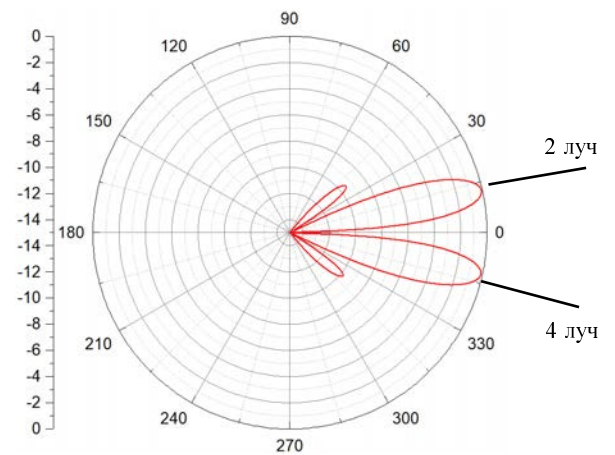


б

Рис. 9. Парциальная ДН для 2 пар ортогональных лучей на частоте  $f_0$ : а – 1-я пара лучей 1,3; б – 2-я пара лучей 2,4



а



б

Рис.10. Парциальная ДН для 2 пар ортогональных лучей на частоте  $f_0 + 250$  МГц: а – 1-я пара лучей 1,3; б – 2-я пара лучей 2,4

## Заключение

В результате выполненных исследований разработана МАФС, выполненная на основе антенной системы и ДОС.

Были получены следующие характеристики данной МАФС:

1) МАФС формирует по две пары пространственно ортогональных лучей;

2) угол наклона каждого из лучей  $12^\circ$ ;

3) коэффициент усиления в максимуме 10,8; 10,7; 11,5; 11,5 дБ для 1; 2; 3; 4 луча соответственно.

4) уровень первых боковых лепестков -10,1; -10,2; -10,8; -10,5 дБ для 1; 2; 3; 4 луча соответственно.

Полученные результаты показывают реализуемость данной многолучевой антенно-фидерной системы и соответствие ее характеристик предъявляемым требованиям.

Дальнейшие перспективы данных исследований могут заключаться в создании макета устройства и его экспериментальной отработки для подтверждения выбранных технических решений.

## Список литературы

1. Фельд Я. Н., Бененсон Л. С. Антенно-фидерные устройства. М.: Типолиитография ВВИА имени проф. Н. Е. Жуковского, 1959. С. 550.

2. Марков Г. Т. Антенны. М.: «Энергия» 1960. С. 528.

3. Неганов В. А., Клюев Д. С., Табаков Д. П. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование, конструктивная реализация, примеры применения устройств СВЧ. М.: Ленанд, 2017. С. 602.

4. Юрцев О. А., Рунов А. В., Казарин А. Н. Спиральные антенны. М.: Сов. Радио, 1974. С. 488.

5. Пат. 1305805, СССР, МПК Н01Q 21/26, Турникетная антенна/ Нагаев Ф. И., Дабкин Ю. А. // Открытия. Изобретения. 1987. № 4

6. Лаптев В. В. Системы управления лучом ФАР. Под ред. Долганова Н. А., Шишакова К. В. М.: ИжГТУ, 2009. С.160.

7. Фомин А. Н. Устройства СВЧ и антенны: учебник. Под ред. Филонова А. А. М.: Сиб. федер. ун-т, 2014. С. 492.

8. Следков В. А. Широкополосные матрицы Батлера диапазона 4–8 ГГц / Следков В. А., Обрезанова Л. А., Мануилов М. Б. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2009. № 6. С. 73–78.

9. Butler J., Lowe R., "Beam-Forming Matrix Simplifies Design of Electronically Scanned Antennas" // Electronic Design, April 12, 1961. Vol. 9. P. 170–173.

10. СВЧ устройства на полупроводниковых диодах. Проектирование и расчет. Под ред. Мальского И. В., Сестрорецкого Б. В. М.: Сов. радио, 1969. С. 217.

11. Hansen R. C. Phased Array Antennas. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009. 2nd Edition.