

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТА ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН

Приводятся результаты разработки интегрированного элемента проходной ФАР Ка-диапазона с пространственным возбуждением и широкоугольным электрическим сканированием луча. Элемент ФАР содержит последовательно соединенные приемный диэлектрический излучатель, волноводный ферритовый фарадеевский фазовращатель, невзаимный квадрупольный ферритовый поляризатор с магнитным экраном, элементами подстройки и апертурный волноводно-диэлектрический излучатель с поляризационной развязкой. Приемный излучатель возбуждается кругополяризованной волной, а апертурный излучатель излучает и принимает волну с линейной поляризацией поля. Массо-габаритные и электрические параметры элемента ФАР соответствуют лучшим образцам аналогичного назначения.

В теории и практике разработки элементной базы фазированных антенных решеток (ФАР) СВЧ- и КВЧ-диапазонов очевидным достижением считается создание и освоение серийного производства интегрированных элементов [1, 2]. Как правило, это конструктивно простые и высокотехнологичные устройства, нашедшие применение в многоэлементных ФАР с пространственным возбуждением [3, 4]. Каждый интегрированный элемент содержит приемный и апертурный волноводно-диэлектрические излучатели (ВДИ) и размещенный между ними волноводный ферритовый фарадеевский фазовращатель (ФВ). Антенные решетки приемных и апертурных излучателей принимают и излучают кругополяризованные волны. Однако в ряде практических применений некоторых ФАР [5], например в системах воздушного базирования на самолетах и вертолетах, существует потребность в излучении и приеме волн с линейной поляризацией поля. При сохранении достоинств волноводных ферритовых фарадеевских фазовращателей возникает необходимость преобразования кругополяризованных волн в линейно поляризованные волны [6]. Для этого используются невзаимные квадрупольные ферритовые поляризаторы [6]. Опыт их широкого практического применения накоплен при создании двухмодовых волноводных ферритовых ФВ [6–8].

Разработанный интегрированный элемент проходной ФАР построен на основе

серийно выпускаемого элемента ФАР Ка-диапазона частот [2], в который вписан невзаимный квадрупольный ферритовый поляризатор [9].

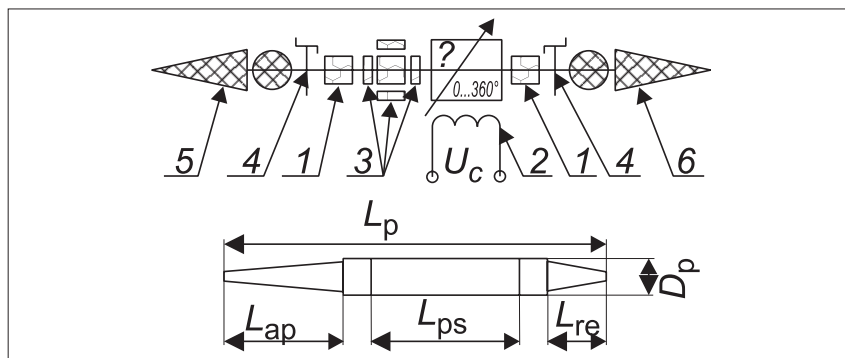
Схема и эскиз элемента ФАР показаны на рис. 1, где 1 — ферритовый стержень (ФС) квадратного сечения с токопроводящим покрытием боковой поверхности; 2 — обмотка намагничивания ФС; 3 — квадрупольный ферритовый преобразователь поляризации (КФПП); 4 — согласующие ступенчатые переходы от ФВ к апертурному (5) и приемному (6) волноводно-диэлектрическим излучателям; L_{ap} , L_{re} , L_p — длины апертурного и приемного излучателей и элемента ФАР соответственно; D_p — диаметр элемента ФАР.

На рис. 2 показано продольное сечение интегрированного элемента проходной ФАР в сборе, а на рис. 3 — его поперечное сечение в месте расположения КФПП (сечение А-А), а также поперечное сечение волноводного ферритового фазовращателя (сечение Б-Б).

Основные обозначения, приведенные на рис. 2 и 3: 8 — ферритовый стержень с токопроводящим покрытием боковой поверхности; 9, 10 — обмотка продольного намагничивания ФС; 11 — ферритовые скобы магнитопровода ФВ; 5 — постоянные магниты КФПП; 6 — магнитный экран; 7 — элементы настройки; 14 — корпус элемента ФАР, другие обозначения по [9].

При разработке проходного элемента ФАР требовалось решить две главные задачи: во-первых, вписать преобразователь поляризации в корпус серийно выпускаемого элемента ФАР [2], диаметр которого D_0 определен сектором сканирования луча; во-вторых, введением магнитного экрана обеспечить развязку соседних элементов ФАР по магнитным полям, создаваемым магнитными преобразователями поляризации.

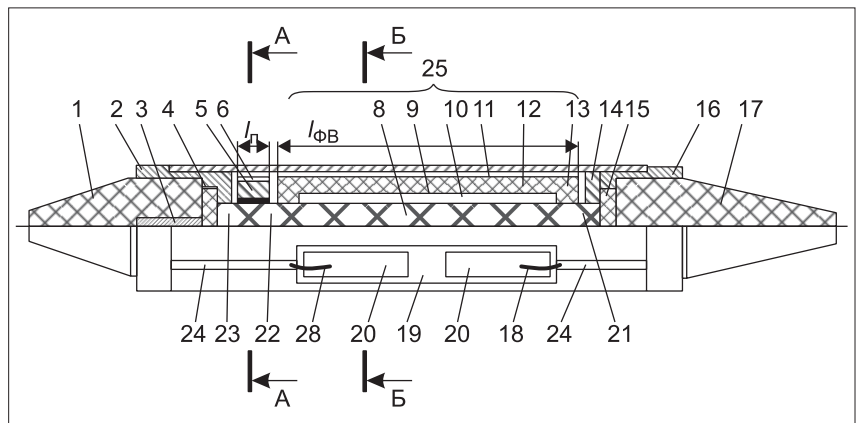
Проходной элемент ФАР работает следующим образом: в режиме передачи кругополяризованная электромагнитная волна, излучаемая облучателем



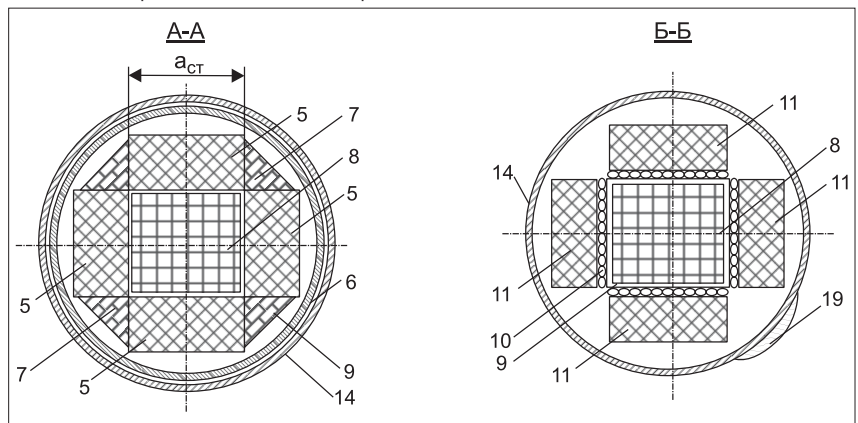
▲ Рис. 1. Схема и эскиз элемента проходной ФАР

ФАР, принимается приемным излучателем 17, проходит через волновод 16, трансформатор 15 и поступает на вход фазовращателя 25. Возбужденная в ферритовом стержне 8 кругополяризованная волна низшего типа квадратного волновода 9 при распространении вдоль продольного намагниченного ферритового стержня получает определенный регулируемый фазовый сдвиг $\Delta\phi$. Его величина зависит от длины волны, размеров поперечного сечения ферритового стержня 8 ($a_{ст} \times a_{ст}$, рис. 3), его активной длины $l_{фв}$ (рис. 2), параметров материала ферритовой среды и напряженности магнитного поля в ферритовом стержне 8, создаваемого обмоткой намагничивания 10. Вносимый регулируемый фазовый сдвиг может изменяться в заданных пределах, например $\Delta\phi = 0-360^\circ$, при изменении параметров управляющего импульса, например напряжения, подаваемого на обмотку намагничивания 10 от системы управления лучом, и длительности $\tau_{и}$ импульса намагничивания при вольт-секундном способе управления фазовращателем. С выхода фазовращателя кругополяризованная волна поступает на вход КФПП, выполненного на том же ферритовом стержне, что и фазовращатель. В КФПП на его длине $l_{н}$ происходит преобразование кругополяризованной волны в линейно поляризованную волну типа H_{01} квадратного волновода ФС 8. С выхода КФПП, через ступенчатый трансформатор 4, волна поступает на вход волновода 2, заполненного диэлектриком, и возбуждает в нем электромагнитную волну типа H_{11} с линейной, например вертикальной, поляризацией поля. Эта волна проходит через поляризационную развязку с поглощающей пластиной 3, установленной перпендикулярно вектору E проходящей волны типа H_{11} , возбуждает в диэлектрическом стержне 1 волну типа HE_{11} круглого диэлектрического волновода, и излучает в свободное пространство волну с вертикальной линейной поляризацией поля. При этом волна типа H_{11} круглого волновода с линейной ортогональной горизонтальной поляризацией поля, возникающая на выходе КФПП, вследствие возможного неполного преобразования кругополяризованной волны в линейно поляризованную волну поглощается пластиной 3, которая может быть выполнена из диэлектрического материала, например кварца или слюды, с нанесенным на нее слоем металла, поглощающего электромагнитные волны, в частности хрома.

В режиме приема линейно поляризованная волна, принятая диэлектрическим стержнем 1 через волновод 2 с поглощающей пластиной 3 поляриза-



▲ Рис. 2. Продольное сечение элемента проходной ФАР



▲ Рис. 3. Поперечные сечения элемента проходной ФАР

ционной развязки и трансформатор 4, поступает на вход квадратного волновода 9, образованного тонкой пленкой токопроводящего покрытия боковой поверхности ферритового стержня 8, и возбуждает в его ненамагниченном конце 22 перед КФПП линейно поляризованную волну типа H_{01} квадратного волновода 9. При прохождении через КФПП 5 линейно поляризованная волна на длине $l_{н}$, в соответствии с невязанными свойствами КФПП, преобразуется в кругополяризованную волну с противоположным направлением вращения по сравнению с волной, излучаемой облучателем в режиме передачи. С выхода КФПП 5 кругополяризованная волна поступает на вход фазовращателя 25, на его длине $l_{фв}$ получает такой же регулируемый фазовый сдвиг, как и волна, распространяющаяся в прямом направлении. С выхода фазовращателя кругополяризованная волна поступает через трансформатор 15 и волновод 16 на вход диэлектрического излучателя 17, который излучает в направлении облучателя ФАР кругополяризованную волну.

Представленный элемент проходной ФАР конструктивно прост и технологичен. Для его создания в условиях серийного производства нет необходимости разрабатывать новые материалы, сложные технологические приспособления и использовать дорогостоящие техно-

логические процессы. Для изготовления диэлектрических излучателей и согласующих диэлектрических вставок можно применить высокочастотные высокочастотные керамики с диэлектрическими проницаемостями $\epsilon_r = 5, 7, 10$, допускающие изготовление деталей литьем или механической обработкой [15]. Магниты КФПП могут быть изготовлены из ниодим-железа-бора, как, например, в [8] с максимальной магнитной индукцией $B_m = 1,2$ Тл и высокой стабильностью параметров в широком интервале температур. Магнитный экран КФПП выполнен из листового пермаллоя.

Проходной элемент ФАР представляет собой функционально завершенное устройство, содержащее в едином корпусе последовательно соединенные диэлектрический излучатель, принимающий от облучателя кругополяризованную волну, фазовращатель, КФПП, представляющий собой невзаимный магнитный квадрупольный преобразователь поляризации, с магнитным экраном и элементами подстройки, выполненный вместе с фазовращателем на одном ферритовом квадратном стержне с токопроводящим покрытием боковой поверхности, и диэлектрический излучатель с поляризационной развязкой, излучающий и принимающий линейно поляризованную волну. Поляризация этой

волны может быть как вертикальной, так и горизонтальной в зависимости от ориентации элемента в решетке или от полярности магнитов в КФПП.

Изготовленные образцы проходного элемента ФАР в КВЧ-диапазоне имеют вес не более 2 г, диаметр не более $0,55\lambda_0$, вносимые потери на 0,5 дБ выше по сравнению с базовым проходным элементом ФАР [2] и поляризационную развязку не менее 20 дБ.

ВЫВОДЫ

1. Предложен и разработан конструктивно простой высокотехнологичный интегрированный элемент проходной ФАР с пространственным возбуждением кругополяризованной волной облучателя, излучающий в пространство линейно поляризованную волну.
2. Элемент ФАР может быть использован при создании многоэлементных фазированных антенных решеток с широкоугольным электрическим сканированием луча с отклонением от нормали к поверхности раскрыва ФАР на угол до 60° по двум координатам [12]. Их применение возможно, например, в качестве бортовых антенн воздушного базирования, обеспечивающих безопасный полет вертолетов и облучение земной поверхности линейно поляризованной волной для повышения контрастности наблюдаемых объектов.
3. К элементам ФАР для этих комплексов предъявляются повышенные требования по прочности и стойкости

в условиях экстремальных климатических и механических воздействий. Разработанный элемент ФАР удовлетворяет указанным требованиям. Он не вносит ограничений на скорость перемещения носителя и выдерживает возникающие ударные и вибрационные нагрузки.

4. Массо-габаритные и электрические параметры элемента ФАР соответствуют лучшим образцам аналогичного назначения [6–8, 10, 11]. ●

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев Ю. Н., Жигарев В. В., Захарьев Л. Н., Кашин В. А., Корецкий В. М., Леманский А. А., Липатов А. В., Павельев Б. А., Феоктистов В. Г. Приемопередающий элемент фазированной антенной решетки. Патент № 2184410 РФ. Заявл. 26.06.2001. Оpubл. 27.06.2002.
2. Рошаль Л. Б., Фирсенков А. И., Крехтунов В. М., Шевцов О. Ю. Элемент фазированной антенной решетки. Патент № 2325741 РФ. Заявл. 06.10.2006. Оpubл. 27.05.2008.
3. Bounkin V. V., Lemansky A. A. Experience of development and industrial production of X-band passive phased antenna arrays. A. 3. Antenna design. Intentional Conference on Radar. Paris, 3–6 May, 1994.
4. Шевцов О. Ю., Артюшев А. В., Крехтунов В. М., Голубцов М. Е., Русов Ю. С. Особенности построения фазированных антенных решеток миллиметрового диапазона волн для РЛС зенитно-ракетного комплекса малой дальности//Известия РАН. 2010. № 3.
5. Канащенков А. И. Вертолетная радиолокация. Проблемы и решения//Фазотрон. М.: Макцентр-Издательство. 2007. 1–2 (10).

6. Boyd C. R. Comments on the design and manufacture of dual-mode reciprocal latching ferrite phase shifters//IEEE Trans. on MTT. 1974. Vol. MTT-22. No. 6.

7. Порохнюк А. В., Елизаров Ю. Н., Ефимова Н. Н., Пузаков А. Н., Треховицкий О. В. Двухмодовый ферритовый фазовращатель с магнитной памятью. Патент № 1459560 РФ. Заявл. 09.04.1987. Оpubл. 30.10.1994.

8. Федоров В. В., Милевский Н. П., Смирнова Е. А. Двухмодовый фазовращатель для ФАР миллиметрового диапазона волн//Антенны. 1999. № 1.

9. Васин А. А., Канащенков А. И., Крехтунов В. М., Пономарев Л. И., Смирнов А. С., Терехин О. В., Фирсенков А. И., Фирсенков А. А. Проходной элемент фазированной антенной решетки. Патент РФ № 187274 У1. Заявл. 17.09.2018. Оpubл. 28.02.2019.

10. Каталог ОАО «НИИ «Феррит-Домен». Апертурные быстродействующие фазовращатели. www.domn.ru/images/stories/prod/pdf/catalog_part5_05.pdf

11. Каталог фирмы Microwave Application Group. www.magsmx.com/pages/dual_mode.html

12. Русов Ю. С., Голубцов М. Е., Крехтунов В. М., Нефедов С. И. Модуль проходной фазированной антенной решетки. Патент № 2461930 РФ. Заявл. 30.12.2010. Оpubл. 20.09.2012.

13. Каталог ОАО «Завод «Магнетон». Фазовращатели. www.magneton.ru/cat.php?id=105#main_top

14. Каталог ОАО «Завод «Магнетон». СВЧ-ферриты и диэлектрики. www.magneton.ru/cat.php?id=32