

# Обобщение результатов разработки интегрированных элементов фазированных антенных решеток с ферритовыми фазовращателями КВЧ диапазона

А.И. Фирсенков<sup>1</sup>, А.Б. Гуськов<sup>1</sup>, Е.В. Комиссарова<sup>2</sup>, В.М. Крехтунов<sup>2</sup>, А.С. Смирнов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Завод Магнетон»

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана

**Аннотация:** представлено обобщение результатов разработки интегрированных элементов проходной и отражательной фазированных антенных решеток КВЧ диапазона с широкоугольным электрическим сканированием луча с его отклонением от нормали к раскрытию ФАР до 45...60° по двум координатам. Элементы ФАР построены на основе волноводных ферритовых фарадеевских фазовращателей, освоено их серийное производство. Приводятся результаты статистических исследований характеристик.

**Ключевые слова:** фазовращатель, элемент ФАР, фазированная антенная решетка, электрическое сканирование луча, КВЧ диапазон

## 1. Введение

К началу 70-х годов 20 века в СВЧ радиотехнике в мире были достигнуты большие успехи в разработке ферритовых СВЧ устройств, в исследовании волноводных антенных решеток с учетом взаимного влияния излучателей, систем возбуждения и систем управления фазовращателями [2, 3, 4].

Начало конкретных разработок фазированных антенных решеток (ФАР) СВЧ-диапазона для средств ПВО можно датировать 1976 годом [1], когда в СССР и США были начаты работы над комплексом С300-ПМУ и Patriot, соответственно. Общим для них было: назначение, использование волноводных ферритовых фазовращателей, пространственное возбуждение, моноимпульсная пеленгация, поэлементное фазирование, размеры раскрытия и др. Они отличались типом фазовращателя, поляризацией излучаемых и принимаемых волн, быстродействием фазовращателей, диапазоном и полосой рабочих частот.

Таким образом в СССР был накоплен большой опыт разработки, внедрения и серийного производства волноводных ферритовых фарадеевских фазовращателей, волноводно-диэлектрических излучателей и интегрированных элементов фазированных антенных решеток, предназначенных для работы в сантиметровом диапазоне волн. Пример успешного решения поставленной задачи описан в работе [2], где обобщен опыт разработки и серийного производства элементов большой ФАР комплекса С-300 ПМУ и описаны технологические операции, качество и точность выполнения которых существенно влияют на характеристики волноводных ферритовых фазовращателей и элемента ФАР в целом.

## 2. Разработка интегрированных элементов ФАР КВЧ-диапазона

В начале 2000-х годов возникла потребность в создании радиолокационных комплексов, работающих в КВЧ-диапазоне, а, следовательно, и создание ФАР по образу и подобию С300-ПМУ. Однако полный перенос конструкторских и технологических решений, развитых при создании высокотехнологичного элемента

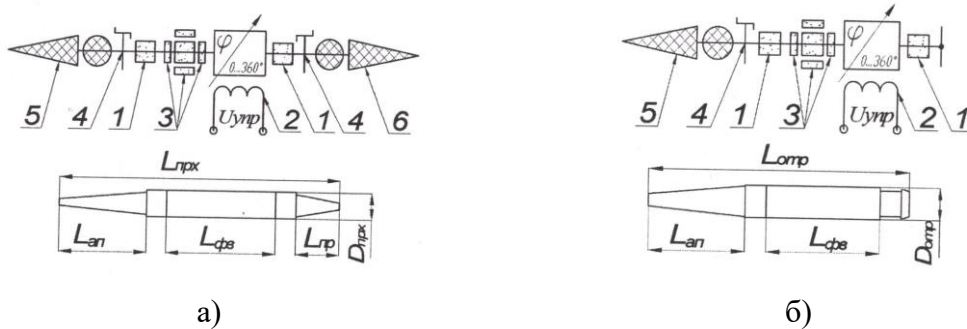
ФАР С300-ПМУ оказалась невозможной. В КВЧ-диапазоне в связи с уменьшением длины волны пропорционально уменьшаются размеры деталей элементов ФАР.

Создание элементной базы для проходных ФАР миллиметрового диапазона волн в том числе ферритовых фазовращателей (ФВ) и интегрированных элементов ФАР на их основе имеет ряд специфических особенностей. Прежде всего к ним относятся технологические аспекты, связанные с низкой механической прочностью деталей из феррита, ситаллов и других диэлектриков, требуемой высокой точностью их обработки, а также сложностью сборки элементов, трудностями ее автоматизации и сложностью размещения элементов ФАР в раскрыве антенной решетки, сложностью вывода проводов системы управления лучом (СУЛ) за пределы ФАР.

Проблема разработки интегрированного элемента проходной ФАР с ферритовым фарадеевским фазовращателем КВЧ диапазона обострилась в начале 2004 года, когда возникла потребность в многоэлементной проходной ФАР с пространственным возбуждением и широкоугольным сканированием луча в секторе углов  $2\theta_{ск}=90^\circ$  по двум координатам.

Проблема была успешно решена совместными усилиями сотрудников Конструкторского бюро приборостроения, г. Тула, кафедры «Радиоэлектронные системы и устройства», МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва и ОАО «Завод Магнетон, г. Санкт-Петербург.

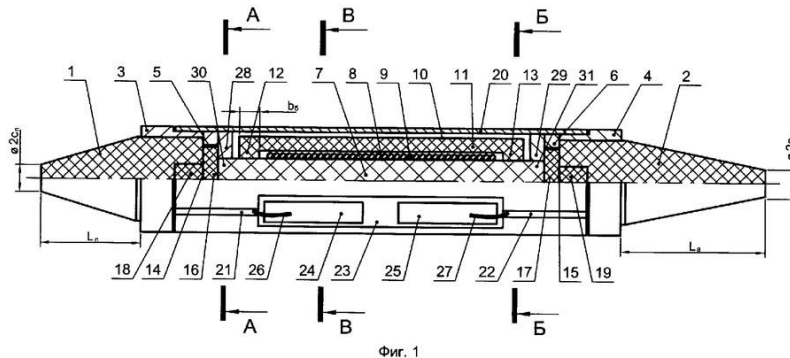
Схемы и эскизы элементов проходной и отражательной ФАР показаны на рисунках 1а и 1б, соответственно.



**Рисунок 1.** Схемы и эскизы элементов проходного (а) и отражательного (б) элементов ФАР.

На рисунке 1 обозначены: 1 – ферритовый стержень, 2 – обмотка продольного намагничивания, 3 – магнитопроводы, 4 – согласующие волноводные переходы, 2 и 6 – апертурный и приемный волноводно-диэлектрические излучатели.

На рисунке 2 показан эскиз интегрированного элемента ФАР и его продольное сечение. Обозначения позиций приняты по [ ].



**Рисунок 2.** Эскиз интегрированного элемента ФАР.

Элемент ФАР содержит входной и выходной диэлектрические излучатели и

ферритовый фазовращатель, состоящий из обмотки намагничивания, расположенной внутри магнитопровода и установленного внутри нее ферритового стержня с токопроводящим покрытием боковой поверхности, между торцами которого и торцами диэлектрических излучателей установлены согласующие диэлектрические вставки, размещенные вместе с цилиндрическими хвостовиками диэлектрических излучателей и ферритовым стержнем внутри волновода. Магнитопровод выполнен в виде П-образных скоб, каждая из которых содержит продольную пластину и два башмака, прилегающих к боковой поверхности ферритового стержня.

В конструкции элемента ФАР используются нормализованные материалы, в частности для изготовления стержней и скоб магнитопроводов используется литиевый феррит марки 1СЧ12, имеющий малые потери и высокую прямоугольность петли гистерезиса. Для изготовления излучателей и согласующих трансформаторов использованы специально разработанные высококачественные композитные диэлектрики с требуемой относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon=4\dots 10$ .

Для практической реализации элементов ФАР, эскиз которых представлен на рисунке 2, разработана конструкторско-технологическая документация и освоено их серийное производство. Основные параметры элементов ФАР приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Параметры интегрированного элемента проходной ФАР Ka-диапазона

Параметр	Значение
Диапазон частот	Ka
Поперечные размеры / длина фазовращателя, $\lambda$	0,51 / 2,3
Шаг фазированной антенной решетки $d_\lambda$ , $\lambda$	0.68
Максимальные вносимые потери, не более, дБ	1,5
Вносимый фазовый сдвиг, не менее, град	400
Среднеквадратическая погрешность установки фазового сдвига, не более, град	7
Время перемагничивания фазовращателя, не более, мкс	100
Энергия перемагничивания фазовращателя, не более, мкДж	100

На основе элементов проходной ФАР [8], пропускающего кругополяризованные волны, разработан элемент ФАР, излучающий и принимающий линейно поляризованные волны [10]. Для этого в элемент ФАР [8] при сохранении его поперечных размеров и вносимого ослабления встроен ферритовый невзаимный квадрупольный поляризатор с элементами настройки и магнитным экраном, ослабляющим взаимное влияние единичных элементов ФАР по магнитным полям.

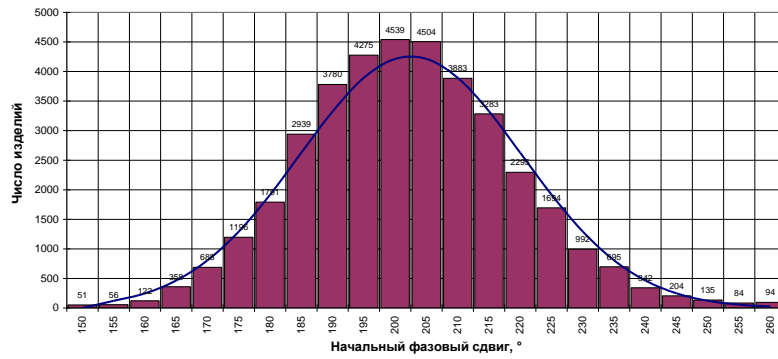
### 3. Разработка интегрированных элементов отражательных ФАР

Наряду с проходными ФАР в радиолокационной технике, например, в самолетных РЛС, находят применение и отражательные ФР с пространственным возбуждением. Хотя вследствие некоторого затенения раскрыва ФАР облучателем, элементами его крепления и трактом для отражательных ФАР характерны увеличения уровня боковых лепестков и снижение коэффициента усиления, они имеют такие преимущества перед проходными ФАР как простота сборки полотна ФАР и вывода проводов, соединяющих ФВ и СУЛ, возможность замены части элементов ФАР без разборки всего полотна и большой допустимый поперечный размер элементов ФАР.

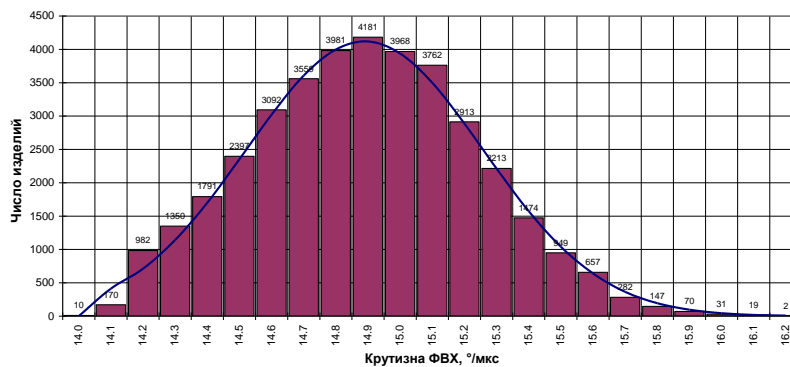
Экспериментальное исследование партии серийно изготовленных интегрированных отражательных элементов ФАР, работающих на кругополяризованных волнах, выполнено на измерительных стендах на базе автоматического измерителя КСВн и вносимого ослабления типа Agilent в полосе частот прямоугольного волновода сечением 7,2x3,4 мм<sup>2</sup>.

На рисунке 3 приведены статистические данные по параметрам серийно

выпущенных элементов ФАР общим числом более  $3 \cdot 10^4$  изделий.



а)



б)

**Рисунок 3.** Статистические данные по параметрам серийно выпущенных элементов ФАР: распределение элементов ФАР по НФС (а), распределение элементов ФАР по крутизне ФВХ (б).

На рисунке 3а приведено статистическое распределение элементов ФАР по намагнитченности ферритового стержня (НФС). Для сравнения сплошной линией показано нормальное распределение с аналогичными параметрами. Из рисунка 3а следует, что параметр распределен по нормальному закону со средним значением  $\Delta\varphi_n=200^\circ$  и стандартным отклонением  $17,76^\circ$ . На рисунке 3б приведено статистическое распределение элементов ФАР по крутизне фазовременной характеристики (ФВХ). Как и для НФС, распределение имеет нормальный характер со средним значением  $K_{\varphi_{ср}}=14,84$  град/мкс и стандартным отклонением  $0,37$  град/мкс. Отсюда можно сделать вывод, что влияние различных факторов на параметры фазовой характеристики элементов ФАР носит случайный характер.

Статистическое исследование КВЧ-потерь, вносимых интегрированными элементами отражательной ФАР показали, что среднее значение вносимых потерь составляет  $1,05$  дБ, а максимальное не превышает  $1,27$  дБ. При этом выход годных по КВЧ потерям элементов ФАР в процессе освоения серийного производства составил  $80\%$  и намечены пути увеличения числа годных по потерям изделий.

Наряду с описанными выше элементами отражательных ФАР Ka-диапазона, выполнены исследования по разработке аналогичных устройств W-диапазона частот в рабочей полосе волновода сечением  $2,4 \times 1,2$  мм<sup>2</sup>. Элемент ФАР построен по схеме, показанной на рисунке 2, а его эскиз показан на рисунке 3 (обозначение позиций по [12]).

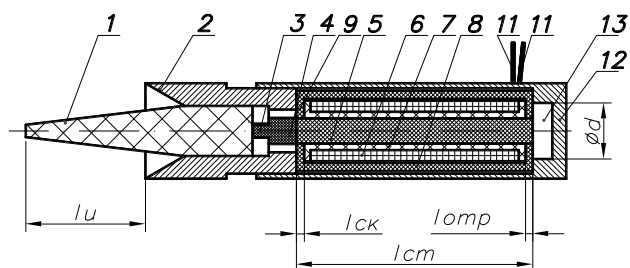


Рисунок 4. Элемент ФАР W-диапазона

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований в таблице 2 обобщены характеристики элементов ФАР отражательного типа, пригодных для практической реализации в коротковолновой части КВЧ диапазона, оценены поперечные размеры элементов отражательной ФАР, для которых определены вносимые потери и время перемагничивания. Для сравнения приводятся данные для фазовращателей, построенных на основе ферритовых стержней с металлизированной и неметаллизированной боковой поверхностью.

Таблица 2. Параметры интегрированного элемента отражательной ФАР W-диапазона

Параметр	Ферритовый стержень	
	металлизированный	неметаллизированный
Диапазон частот	W	
Поперечные размеры / длина фазовращателя, $\lambda$	0,72 / 3	1,1 / 2,3
Сектор сканирования луча, град	$\pm 27$	$\pm 15$
Максимальные вносимые потери, не более, дБ	2,2	3
Вносимый фазовый сдвиг, не менее, град	400	
Время перемагничивания фазовращателя, не более, мкс	50	10

### 3. Заключение

Разработаны конструктивно простые высокотехнологичные малогабаритные интегрированные элементы проходной и отражательной ФАР с электрическим сканированием луча с отклонением от нормали к раскрытию до  $45...60^\circ$  по двум координатам, освоено их серийное производство. Для партии элементов ФАР общим числом более  $3 \cdot 10^4$  изделий, осуществлен 100% контроль их основных характеристик: начальной фазы, крутизны фазовременной характеристики и вносимых потерь. Статистическая обработка результатов измерений свидетельствует о высоком проценте годных изделий по потерям порядка 80%, а малый разброс численных значений начальных фаз и крутизн фазовременных характеристик элементов ФАР дает основание не учитывать различия параметров элементов ФАР, что упрощает построение систем управления лучом.

Разработанные элементы ФАР могут быть использованы для построения разных размеров раскрытия антенны и секторов электрического сканирования луча.

#### Список литературы

1. Bounkin B.V., Lemansky A.A. Experience of development and industrial production of X-band passive phased antenna arrays // Intentional Conference on Radar. Paris. 3-6 May. 1994. A. 3. Antenna design. P. 20-24.
2. Хансен Р.С. Сканирующие антенные системы СВЧ / Пер. с англ. под ред. Г.Т. Маркова и А.Ф. Чаплина. В 3-х т. Т. 2. М.: Сов. радио, 1969. 496 с.
3. Амитей Н., Галиндо В., Ву Ч. Теория и анализ фазированных антенных решеток. М.: Мир, 1974. 457 с.
4. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки. М.: Техносфера, 2012. 560 с.

5. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток / Под ред. Д.И. Воскресенского. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2012. 744 с.
6. Патент № 2184410 РФ. Приемопередающий элемент фазированной антенной решетки 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. Заявл. 26.06.2001. Оpubл. 27.06.2002г. Бюл. № 18.
7. Шевцов О.Ю., Артющев 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. С. 61–69.
8. Патент № 2325741 РФ. Элемент фазированной антенной решетки. Рошаль Л.Б., Фирсенков А.И., Крехтунов В.М., Шевцов О.Ю. Заявл. 06.10.2006. Оpubл. 27.05.2008. Бюл. № 15.
9. Патент № 2461931 РФ. Элемент проходной фазированной антенной решетки. Голубцов М.Е., Русов Ю.С., Крехтунов В.М., Нефедов С.И., Фирсенков А.И. Заявл. 30.12.2010. Оpubл. 20.09.2012. Бюл. № 26.
10. Патент № 187274 РФ. Проходной элемент фазированной антенной решетки. Васин А.А., Канащенков А.И., Крехтунов В.М., Пономарев Л.И., Смирнов А.С., Терехин О.В., Фирсенков А.И., Фирсенков А.А.. Заявл. 17.09.2018. Оpubл. 28.02.2019. Бюл. № 7
11. Патент № 2439759 РФ. Элемент фазированной антенной решетки. Фирсенков А.И., Крехтунов В.М., Гуськов А.Б., Павлов Г.Д., Русов Ю.С. Заявл. 08.11.2010. Оpubл. 10.01.2012. Бюл. № 1.
12. Патент № 2474018 РФ. Элемент фазированной отражательной антенной решетки. Комиссарова Е.В., Крехтунов В.М. Заявл. 30.12.2010. Оpubл. 27.01.2013. Бюл. № 3.
13. Патент № 2470426 РФ. Элемент фазированной антенной решетки. Сковородников С.И., Гуськов А.Б., Павлов Г.Д., Фирсенков А.И. Заявл. 18.07.2011. Оpubл. 20.12.2012. Бюл. № 35.
14. Фирсенков А.И. Разработка и освоение серийного производства интегрированного элемента отражательной ФАР КВЧ-диапазона / А.И. Фирсенков и [др.] // Успехи современной радиоэлектроники. – 2019. - №2. – С. 54-70
15. СВЧ-ферриты и диэлектрики. Проспект. СПб.: ОАО «Завод Магнетон». 2001.
16. Сверхвысокочастотные приборы и элементы. Проспект. СПб.: ОАО «Завод Магнетон». 2001.
17. Microwaves component and Devices. Проспект на изделия, выпускаемые «НИИ «Домен». – С.П.: НИИ «Домен», 2001, 20 с.