

Исследование быстродействующих отражательных волноводных ферритовых фазовращателей КВЧ диапазона 77-30569/248297

11, ноябрь 2011

Комиссарова Е. В., Русов Ю. С., Будкин А. А., Крехтунов В. М.

УДК 621.372.852.222

НИИ Радиоэлектронной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана

mc_ken@list.ru

rusov.yu.s@gmail.com

На сегодняшний день в радиолокационных системах различного назначения широко используются антенные системы с электрическим сканированием луча, в частности, фазированные антенные решетки (ФАР). В большинстве случаев в качестве фазосдвигающих структур в таких антенных системах используются волноводные ферритовые фазовращатели (ВФФВ). Интенсивное освоение КВЧ диапазона ставит ряд задач, связанных с разработкой волноводных ферритовых фазовращателей, имеющих малые поперечные размеры и обладающих малыми вносимыми потерями, высоким быстродействием и малой энергией управления.

В настоящее время наибольшее практическое применение в ФАР передающих и приемно-передающих радиотехнических систем находят быстродействующие ВФФВ трех типов.

1. Фазовращатель на основе прямоугольного волновода с поперечно намагничиваемым ферритовым тороидом. Данный тип ВФФВ характеризуется предельно высоким быстродействием и малой энергией управления, однако его существенным недостатком является требование большой амплитуды импульсов тока, кроме того, данный ВФФВ является невзаимным устройством.

2. Взаимный фазовращатель типа Реджиа-Спенсера. Его конструкция основана на прямоугольном волноводе и включает в себя продольно намагничиваемый ферритовый стержень. Для этого типа ВФФВ характерна работа на волнах с линейной поляризацией электромагнитного поля, высокая активность, однако он относительно узкополосен и имеет невысокое быстродействие по сравнению с тороидальным фазовращателем.

3. Фазовращатель фарадеевского типа на основе волновода с квадратной либо круглой формой поперечного сечения, содержащего продольно намагничиваемый ферритовый стержень. ВФФВ работает на волнах с круговой поляризацией поля, по сравнению с тороидальным характеризуется меньшим быстродействием и более высокой энергией перемагничивания, однако этот тип фазовращателя используется наиболее широко.

Фарадеевские ВФФВ разработаны и серийно выпускаются как для СВЧ-диапазона [1], так и для низкочастотной [2] части КВЧ-диапазона. Однако конструктивные решения и технологические процессы, применяемые в этих фазовращателях, приводят к увеличению энергии, требуемой для перемагничивания ферритового стержня, и снижению быстродействия ВФФВ. Частичное устранение этих недостатков известными способами [4] приводит к усложнению конструкции, технологии изготовления и повышению стоимости устройств.

Решением актуальной проблемы повышения быстродействия и снижения энергопотребления ВФФВ является построение его на основе ферритового стержня, не имеющего токопроводящего покрытия боковой поверхности [5]. Одновременно с этими положительными факторами увеличивается активность фазовращателя и уменьшается его длина.

Схема построения отражательного волноводного ферритового фазовращателя, которая может быть практически реализована в Ка-диапазоне, приведена на рис. 1. ВФФВ включает в себя ферритовый стержень 1, внешний магнитопровод 2, обмотку намагничивания 3, размещенную на каркасе 4. Ферритовый стержень с системой намагничивания установлен вдоль оси волновода 5 ВФФВ. К одному торцу ферритового стержня примыкает ступенчатый волноводно-диэлектрический переход 6, согласующий ВФФВ с волноводом тракта 7 или с излучающим элементом ФАР. С другого торца ферритового стержня устанавливается короткозамыкатель, обеспечивающий отражение поверхностной волны, направляемой ферритовым стержнем, с минимальными потерями.

Особенностью конструкции фазовращателя является то, что система намагничивания ферритового стержня находится в области КВЧ-поля распространяющейся вдоль него поверхностной волны. В этом случае ожидается высокая активность и добротность ВФФВ по основному типу волны, а также высокое быстродействие и минимальная энергия переключения. Однако такое расположение фазированной секции приводит к возбуждению волн высших типов фазированной секции ввиду ее многоволновости. Уменьшение эффекта рассеяния волны основного типа на ферритовых скобах магнитопровода возможно за счет усложнения их конструкции, как

предложено в [6]. Подобная конфигурация позволяет снизить степень заполнения сечения волновода в области примыкания башмаков скоб к стержню и, следовательно, уменьшить число распространяющихся типов волн в этой области. Разнесение неоднородностей вдоль фазирующей секции позволяет компенсировать волны высших типов, возникающие при рассеянии волны основного типа.

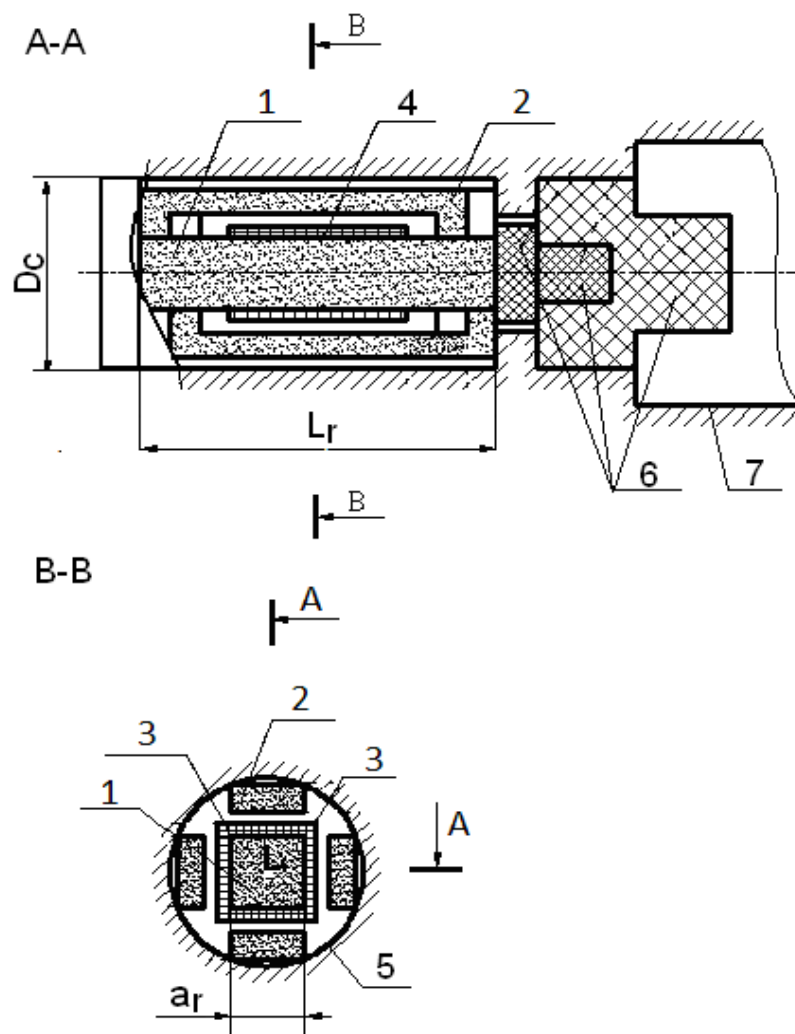


Рис. 1. Схема отражательного волноводного ферритового фазовращателя.

При разработке ВФФВ, построенного по схеме, показанной на рис. 1, решаются следующие задачи:

- расчет фазирующей части ВФФВ;
- расчет ступенчатых переходов, согласующих фазирующую часть ВФФВ с входным волноводом;
- расчет отражателя;
- расчет магнитной цепи системы намагничивания.

Анализ и оптимизация фазирующей части фазовращателя, ступенчатых переходов и отражателя могут выполняться с использованием вычислительных алгоритмов, разработанных на основе вариационных методов, например метода конечных элементов [7], реализованного в пакете прикладных программ [8]. При этом фазовращатель представляется в виде каскадного соединения поперечно неоднородных отрезков волновода.

С целью уменьшения потерь, вносимых фазирующей секцией ВФФВ необходимо минимизировать влияние обмотки намагничивания и магнитопроводов на распространение волны основного типа во внутриволноводной системе продольного намагничивания. Для этого поперечные размеры стержня выбираются таким образом, чтобы не менее 95 % энергии волны основного типа концентрировалось в пределах ферритового стержня [3].

Минимальная длина фазирующей части ФВ, необходимая для создания требуемого фазового сдвига $\varphi_{\text{макс}}$, определяется по найденным значениям относительной активности фазирующей структуры Δp по формуле

$$l_{\Phi_{\text{мин}}} = \frac{\varphi_{\text{макс}}}{2\pi} \cdot \frac{\lambda_0}{\Delta p}, \quad (1)$$

где l_{ϕ} - активная часть ферритового стержня, $\Delta p = p_1 - p_2$, p_1 и p_2 - коэффициенты замедления кругополяризованных волн с разными направлениями вращения.

На рис. 2 представлены зависимости Δp от относительного поперечного размера a_1/λ_0 квадратного ферритового стержня. Расчет выполнен для различных значений недиагональной компоненты тензора магнитной проницаемости $\overline{\mu}$ - $\mu_2 = 0,05; 0,1; 0,15$, при этом размер экрана вокруг ферритового стержня составляет $a = 0,75 \lambda_0$ (λ_0 - длина волны). Кружками на графиках обозначены точки возникновения волны высшего типа, ближайшего к рабочему типу волны $k-H_{10}$.

Из проведенного расчета следует, что активность фазирующей структуры с увеличением поперечного размера ферритового стержня a_1/λ_0 асимптотически стремится к активности безграничной однородной продольно намагниченной ферритовой среды. С другой стороны, следует минимизировать количество высших типов волн, возникающих при распространении волны в ВФФВ. Поэтому при разработке быстродействующего фазовращателя целесообразно применение ферритового стержня с размером поперечного сечения $a_1/\lambda_0 = (0,2...0,24)$ при значениях диэлектрической проницаемости феррита $\epsilon_{\phi} = 15..16$.

При расчете ступенчатого волноводно-диэлектрического перехода, соединяющего фазирующую секцию ВФФВ с волноводом тракта, выбирается переход-прототип, для которого определяется число ступеней, далее расчет проводится по известной методике [9].

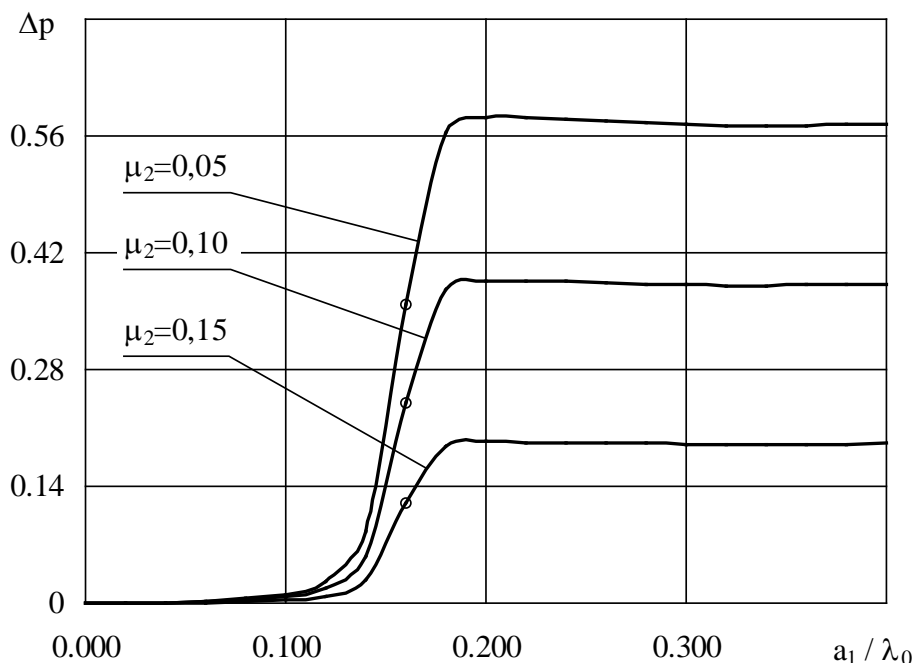


Рис. 2. Активность фазирующей части ВФФВ в зависимости от размера ферритового стержня в экране величиной $a = 0,75 \lambda_0$

На основании проведенных исследований сконструированы, изготовлены и экспериментально исследованы макеты отражательных ВФФВ Ка-диапазона. Внешний вид экспериментальных макетов показан на рис. 3.

В таблице обобщены результаты экспериментальных исследований отражательных волноводных ферритовых фарадеевских фазовращателей КВЧ диапазона, оценены габаритные размеры, быстродействие и энергия переключения ВФФВ.

Таблица.

Характеристика отражательного ВФФВ	Значение
Тип поляризации	круговая
Максимальный управляемый фазовый сдвиг, град.	620
Максимальные потери в 5 %-ой полосе рабочих частот, дБ, не более	1,5
Длительность полного цикла переключения, мкс, не более	30
Средняя энергия переключения, мкДж, не более	10
Габаритные размеры, мм ²	$0,72 \lambda_0 \times 3,74 \lambda_0$

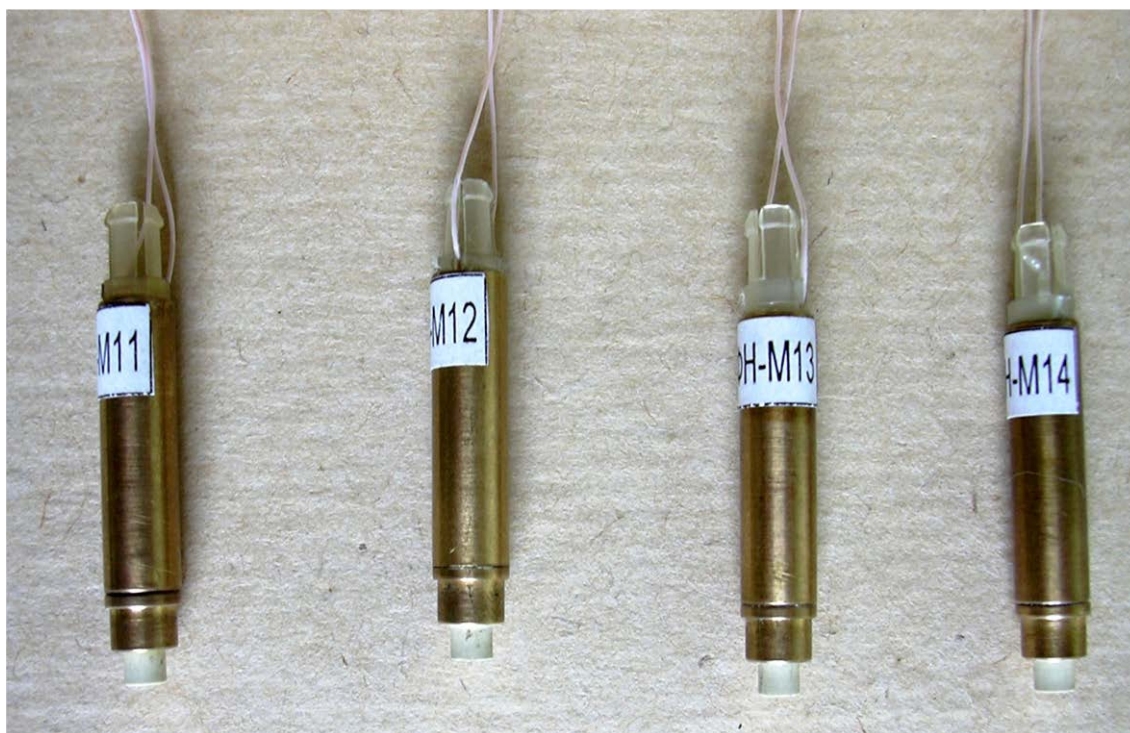


Рис. 3. Экспериментальные макеты отражательных ВФФВ Ka-диапазона.

Сравнительный анализ параметров ВФФВ позволяет сделать следующие выводы.

1. Фазовращатель, выполненный на основе неметаллизированного ферритового стержня характеризуется предельно высоким быстродействием и минимальной энергией переключения. Ввиду наличия внутриволноводной системы продольного намагничивания он является принципиально неодноволновым, имеет большие по сравнению с металлизированным ВФФВ поперечные размеры

2. В Ka-диапазоне реально построение отражательного волноводного ферритового фазовращателя на основе ферритового стержня без токопроводящего покрытия боковой поверхности диаметром $D_C \leq 0,72\lambda_0$, что позволяет устанавливать его в ФАР с сектором сканирования порядка $\pm 45^\circ$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 2. Патент России №2184410. 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.; ОАО «НПО «Алмаз» им. академика А.А. Расплетина». Оpubл. 27.06.2002 г. Бюл. №18.

2. Многоэлементная ФАР Ka-диапазона. / В.В.Денисенко, Ю.Б. Дубров, Ю.Б. Корчемкин, В.А. Макота, А.Н. Николаев, А.А. Толкачев, А.М. Шитиков, А.В. Шишлов, А.Г. Шутов // Сб. Антенны, вып. 1. (92), 2005 г.- С. 7-14.

3. C. R. Boyd Jr. A 60 GHz Dual-Mode Ferrite Phase Shifter. / 1982 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Dallas, TX, June 1982. – P. 741-743.
4. Bounkin B.V., Lemansky A.A., Experience of development and industrial production of X-band passive phased antenna array // International Conference on Radar (Paris, May 3-6, 1994) Paris. 1994. A.3. Antenna design. P. 20-24.
5. Крехтунов В.М., Андропов Е.В., Комиссарова Е.В. Волноводный ферритовый фазовращатель для ФАР на частоту 94 ГГц // Антенны. 2001. Вып. 8 (54). С. 28-33.
6. Крехтунов В.М., Соколов В.Б. А. с. 1688335 (СССР). Элемент фазированной антенной решетки. Опубл. в Б. И. № 40, 1991.
7. Никольский В.В. Вариационные методы для внутренних задач электродинамики. – М.: Наука, 1967. - 460 с.
8. Банков С.Е., Курушин А.А., Разевиг В.Д. Анализ и оптимизация трехмерных СВЧ-структур с помощью HFSS / Под ред. Банкова С.Е. М.: СОЛОН-Пресс, 2005. 216 с.
9. Крехтунов В.М., Щенин В.И. Электродинамическое моделирование ступенчатых переходов на круглых двухслойных волноводах. Автоматизированное проектирование устройств СВЧ. Сб. научных трудов, межвузовский. Под ред. В.В. Никольского. – М.: МИРЭА, 1989.- С. 149 – 155.

Ka-band quick-operating reflective waveguide ferrite phase shifters research

77-30569/248297

11, November 2011

Komissarova E.V., Rusov Yu.S., Budkin A.A., Krehtunov V.M.

Bauman Moscow State Technical University

mc_ken@list.ru

rusov.yu.s@gmail.com

The article presents results of a research of waveguide ferrite Faraday type phase shifters of a Ka-band. The phase shifter with magnetic memory, based on a square ferrite core which has no electrically conductive composition on the lateral face is characterized by enhanced performance and low power consumption. The phase shifter can be installed in phased-array antennas with beam scanning $\pm 45^\circ$. The authors performed an analysis and optimization of parameters of the phase shifter with the use of FEM electrodynamic models.

Reference

1. Afanas'ev Iu.N., Zhigarev V.V., Zakhar'ev L.N., Kashin V.A., Koretskii V.M., Lemanskii A.A., Lipatov A.V., Pavel'ev B.A., Feoktistov V.G., Patent № 2184410 Russia, 27.06.2002.
2. V.V. Denisenko, Iu.B. Dubrov, Iu.B. Korchemkin, V.A. Makota, A.N. Nikolaev, A.A. Tolkachev, A.M. Shitikov, A.V. Shishlov, A.G. Shutov, *Antenny* 92 (1) (2005) 7-14.
3. C. R. Boyd Jr., A 60 GHz Dual-Mode Ferrite Phase Shifter, IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Dallas, TX, June, 1982, pp. 741-743.
4. Bounkin B.V., Lemansky A.A., Experience of development and industrial production of X-band passive phased antenna array, in: Proc. of the International Conference on Radar, Paris, May 3-6, 1994, Paris, 1994, A.3, *Antennadesign*, pp. 20-24.
5. Krehtunov V.M., Andropov E.V., Komissarova E.V., *Antenny* 54 (8) (2001) 28-33.
6. Krehtunov V.M., Sokolov V.B., Author's certificate 1688335 USSR, 1991.
7. Nikol'skii V.V., Variational methods for internal problems of electrodynamics, Moscow, Nauka, 1967, 460 p.

8. Bankov S.E., Kurushin A.A., Razevig V.D., in: Bankov S.E. (Ed.), Analysis and optimization of three-dimensional MICROWAVE structures with the help of HFSS, Moscow, SOLON-Press, 2005, 216 p.
9. Krekhtunov V.M., Shchenin V.I., in: V.V. Nikol'skii (Ed.), in: Interuniversity collection of scientific works, Moscow, MIREA, 1989, pp. 149 – 155.