

Д. Ю. Кулик, Л. П. Мосьпан, А. О. Перов, Н. Г. Колмакова
 Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
 12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
 E-mail: 4dyk@mail.ru

**КОМПАКТНЫЕ ВРАЩАТЕЛИ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ
 НА ОСНОВЕ ДИАФРАГМ С ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ЩЕЛЯМИ**

Компактность конструктивных элементов антенно-фидерных трактов является обязательным требованием, предъявляемым при разработке современных радиолокационных комплексов гражданского или военного назначения. В работе исследованы предельные характеристики перспективных компактных вращателей плоскости поляризации электромагнитных волн, выполненных на основе структур, обладающих диэдральной симметрией. Диэдрально симметричные структуры образованы резонансными диафрагмами с прямоугольными щелями. Многопараметрическая оптимизация использована для достижения предельных характеристик устройств в различных частотных диапазонах. Определена область их применимости. Предложены конструкции, позволяющие вращать плоскость поляризации на углы 90 и 45°, при приемлемых значениях коэффициентов отражения в заданной полосе частот. Эти конструкции расширяют элементную базу приемо-передающей аппаратуры, предназначенную для обеспечения заданного фазового разделения радиосигналов, их фазовой коррекции или поляризационной компенсации. Ил. 6. Табл. 1. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: поляризатор, волновод, диафрагма, оптимизация.

Выбор поляризации электромагнитных волн в приемо-передающей аппаратуре связи и радиолокации зависит от конкретной решаемой задачи, поскольку каждый тип поляризации обладает определенными достоинствами и недостатками. Задачи реализации заданной поляризации радиосигналов успешно решают вращатели плоскости поляризации. Кроме того, они могут обеспечивать требуемое фазовое разделение радиосигналов, их фазовую коррекцию или поляризационную компенсацию, а также преобразование типа поляризации [1–2]. При этом общим требованием, предъявляемым к элементам радиосистем, является обеспечение требуемых выходных характеристик при максимальной компактности самих устройств.

Одним из удачных примеров реализации поляризатора волноводного типа является диэдральная ячейка, предложенная и исследованная в работах [3–5]. Конструкция диэдральной ячейки представлена на рис. 1. Простейшая ячейка представляет собой пару диафрагм (*Iris0* и *Iris1*) с прямоугольными щелями, установленную в волноводе квадратного сечения. Каждая диафрагма обладает собственной вращательной симметрией, причем по отношению друг к другу диафрагмы являются комплементарными, то есть вторая получается путем зеркального отражения первой и поворота ее на 90°. В работе [5] была показана принципиальная возможность вращения плоскости поляризации на 90° подобной ячейкой, выполненной на двухщелевых диафрагмах. При этом приемлемый коэффициент отражения обеспечивался в полосе частот шириной 7%. Принципиальная возможность вращения плоскости поляризации на произвольный угол ячейкой, выполненной на четырехщелевых диафрагмах (рис. 1), была показана в работах [3, 4].

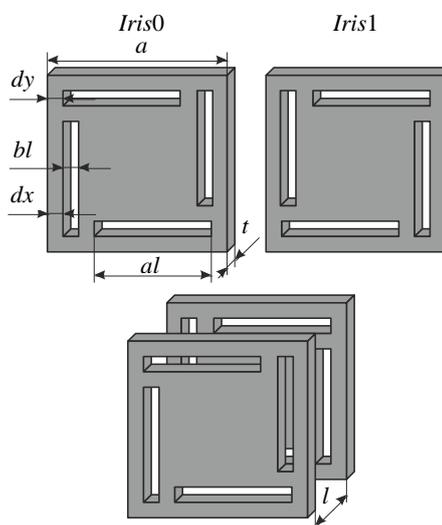


Рис. 1. Ячейка вращателя плоскости поляризации и образующие ее конструктивные элементы (*Iris0* и *Iris1*)

Вместе с тем, задача получения такими ячейками предельных характеристик требует дополнительного исследования. Решению этой задачи посвящена данная работа. Поскольку само устройство характеризуется большим количеством геометрических параметров, исследовать зависимость характеристик от каждого из них, построив массу сечений многомерного пространства, не представляется возможным. Поэтому используются алгоритмы многомерной оптимизации [6, 7], варьируемыми параметрами которых являются размеры конструкции, а именно ширина и высота щелей диафрагм, их смещения по вертикали и горизонтали, а также расстояние между комплементарными диафрагмами. В каждом конкретном примере ожидаемым результатом является обеспечение заданного угла поворота плоскости поляризации при минимальном коэффициенте

отражения в указанной полосе частот. В свою очередь, обобщение полученных расчетных данных позволяет установить пределы применимости выбранной конфигурации в зависимости от выбранного частотного диапазона.

1. Метод решения задачи. Для расчета характеристик вращателей поляризации на диафрагмах с прямоугольными щелями, обладающих диэдральной (D_4) симметрией, был ис-

пользован обобщенный метод частичных областей [8, 9].

В оптимизационных процедурах использовались как градиентные алгоритмы, так и метод роя частиц, позволяющий с большей вероятностью находить глобальные экстремумы целевой функции в указанной полосе частот.

Во всех случаях использовалась целевая функция вида:

$$f = \min \sum_{i=0}^{i_{\max}} ((w_{IL}(\alpha_{cp} IL_{cp} - \alpha_{xp} IL_{xp}) S_{IL}^{-1})^2 + (w_{RL} S_{RL} RL^{-1})^2), \quad (1)$$

где $IL_{cp} = -20L \lg(S_{00}^{10})$ – уровень кополяризованной компоненты поля, дБ; $IL_{xp} = -20L \lg(S_{10}^{10})$ – уровень кросс-поляризованной компоненты поля, дБ; $RL = -20L \lg(S_{00}^{00})$ – коэффициент отражения падающей волны, дБ; α_{cp} и α_{xp} – коэффициенты, соотношение которых задает требуемый угол поворота плоскости поляризации; S_{IL} и S_{RL} – требуемые по заданию уровни вносимых и обратных потерь; w_{IL} и w_{RL} – весовые коэффициенты, определяющие компромисс между величиной коэффициента отражения и степенью поворота плоскости поляризации. Величина i_{\max} определяет количество фиксированных частот, расположенных равномерно в требуемой заданием полосе, на которых проводятся вычисления.

Физические ограничения на варьируемые параметры определялись формулой

$$a1 + b1 + dx + dy + \delta < a, \quad (2)$$

где δ определяет допустимый технологический зазор между щелями диафрагмы.

Исследованная ячейка была реализована на диафрагмах толщиной 0,05 мм, установленных в волноводе квадратного сечения 23×23 мм. Одномоновым (с точностью до вырождения по поляризации) для него является диапазон частот 6,52...13,04 ГГц, рабочим же диапазоном принято считать диапазон 8...12 ГГц.

Для расчета вращателей плоскости поляризации использовался параметр точности f_{cut} , равный 100 ГГц, что соответствует 374 модам, учитываемым в базисе квадратного волновода при реализации численного алгоритма, который обеспечивает точность расчета частот резонансных пиков 0,01 ГГц (1 %).

2. Результаты численного моделирования. Двухдиафрагменная ячейка. Оптимизация конструкции ячейки, представленной на рис. 1, производилась следующим образом. На начальном этапе для низкочастотной части рабочего

диапазона формулировалось входное задание на синтез ячейки. В частности, требуемый угол поворота плоскости поляризации должен был составлять 90°, что соответствовало $\alpha_{cp} = 0$ в целевой функции. Задавалась ширина диапазона сканирования 0,5 ГГц (~5 %) для частотной выборки. По достижении оптимизационной процедурой заданных требований диапазон сканирования итерационно смещался на 0,5 ГГц в область высоких частот, входное задание на синтез ячейки изменялось соответствующим образом, и процедура оптимизации повторялась. Итерационный процесс завершался, когда совпадали высокочастотные границы диапазона сканирования и рабочего диапазона.

Примеры полученных характеристик для нижней, средней и верхней частей рабочего диапазона представлены на рис. 2, где $abs(S_{00}^{00})$ представляет коэффициент отражения падающей волны, $abs(S_{10}^{10})$ – коэффициент прохождения кополяризованной, а $abs(S_{10}^{00})$ – коэффициент прохождения кросс-поляризованной компоненты электромагнитного поля соответственно.

На правой оси отложена зависимость угла поворота плоскости поляризации от частоты. Серой полосой обозначены границы частотного диапазона, для которого проводилась оптимизация. Из этого рисунка видно, что спроектированное устройство обладает достаточно низким коэффициентом отражения и частотной дисперсией угла поворота плоскости поляризации порядка 10°. Такая величина частотной дисперсии характерна для всего сканируемого диапазона частот, за исключением низкочастотной части рабочего диапазона, где невозможно получить фильтроподобную характеристику устройства из-за ограничений, накладываемых геометрией (2).

Обобщенные результаты частотного сканирования в диапазоне 9,75...12 ГГц представлены в таблице.

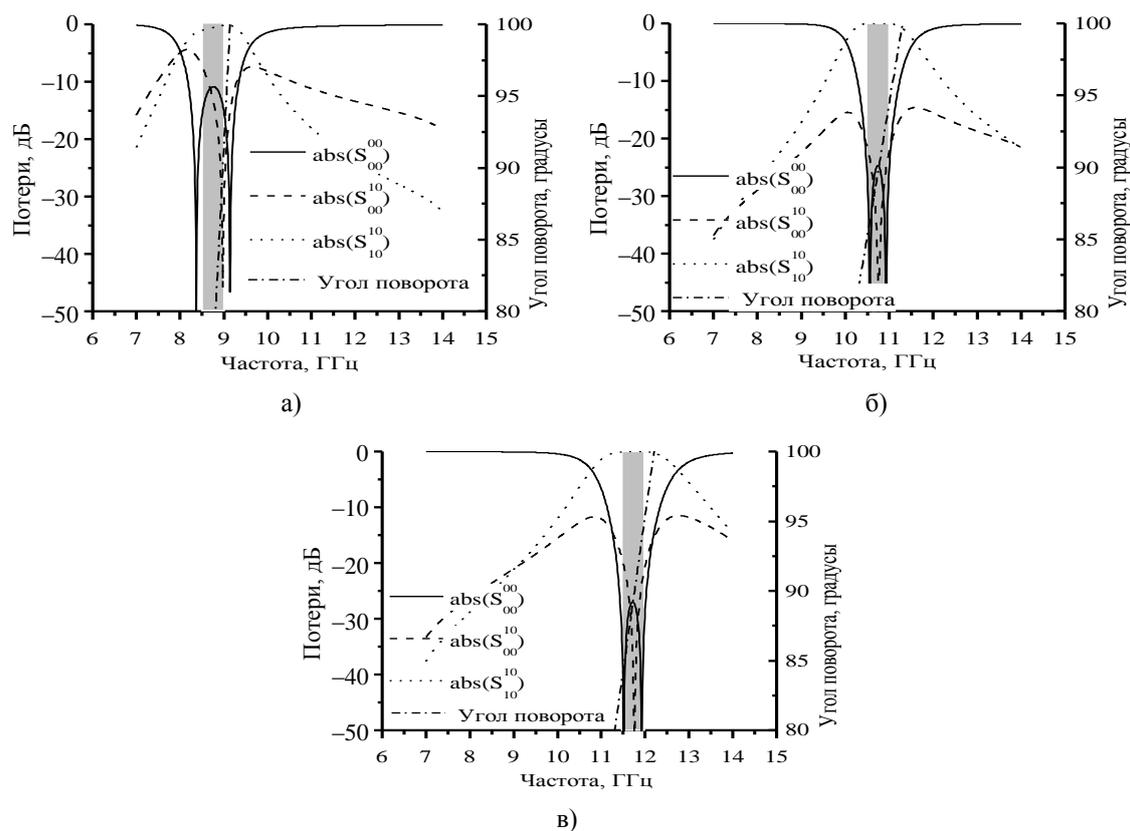


Рис. 2. Характеристики двухдиафрагменного вращателя плоскости поляризации на 90°, оптимизированного для полосы частот: а) 8,5...9,0 ГГц; б) 10,5...11,0 ГГц; в) 11,5...12,0 ГГц

Параметры двухдиафрагменной конструкции вращателя плоскости поляризации на 90° для различных диапазонов частот

Частота f_c , ГГц	Геометрические размеры, мм					Потери RL , дБ
	$a1$	$b1$	dx	dy	l	
8,75	17,9875	1,42746	0,278664	0,0562588	2,69664	-11,6401
9,25	16,2577	1,52512	0,0830025	0,0270732	4,74181	-11,9007
9,75	14,5643	0,977339	0,49074	1,54405	5,09518	-19,2579
10,25	13,4907	1,45226	0,998144	1,32482	6,44907	-18,9168
10,75	12,9045	2,99792	0,00142298	1,56733	6,8252	-24,6906
11,25	12,2441	3,02065	0,737628	1,94193	6,72576	-25,5307
11,75	11,9917	3,25219	1,17474	2,3098	6,06225	-26,997
12,25	10,4927	4,33432	0,388346	3,08521	6,98164	-25,0631
12,75	10,4927	4,7496	0,790836	3,23932	6,44676	-22,8119
13,25	9,97716	2,96981	2,3317	4,12021	6,1324	-21,175

Из таблицы видны следующие закономерности: при увеличении значения центральной частоты f_c полосы пропускания размер $a1$ уменьшается, размеры f_c и dy – увеличиваются, l остается приблизительно постоянным, а значение dx осциллирует в районе малых величин. Уровень пульсаций в полосе пропускания при этом падает. При смещении в область высоких частот и соответствующем увеличении центральной частоты f_c уровень высших волн начинает

существенно повышаться, что приводит к ухудшению характеристик устройства. В точке возникновения волны $H_{21}(H_{12})$ с частотой отсечки, равной 14,58 ГГц, поляризационные характеристики полностью разрушаются, поскольку эта волна является определяющей при формировании поляризационного эффекта.

Многомерная оптимизация была также применена для синтеза вращателя плоскости поляризации на угол 45°. При этом в функции оп-

тимизации использовалось условие $\alpha_{cp} + \alpha_{xp} = 1$. Типичные характеристики вращателя поляризации, оптимизированного в полосе частот 10,25...10,75 ГГц, представлены на рис. 3, обозначения на котором соответствуют рис. 2. Размеры ячейки $a_1 = 13,463$ мм, $b_1 = 1,4989$ мм, $dx = 0,2017$ мм, $dy = 0,0046$ мм, $l = 11,3093$ мм.

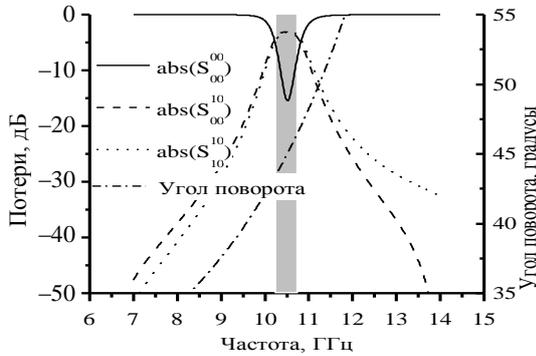


Рис. 3. Характеристики двухдиафрагменного вращателя плоскости поляризации на 45° , оптимизированного для полосы 10,25...10,75 ГГц

Анализ данных многомерной оптимизации показал, что обеспечить вращение плоскости поляризации на угол 45° в полосе частот не удастся. Типичная ячейка из пары диафрагм не обеспечивает полосовую характеристику чебышевского типа даже в верхней части частотного диапазона. Высокий уровень отражения достигается только в узкой окрестности центральной частоты и, следовательно, необходимо увеличивать число элементов поляризационной ячейки.

3. Четырехдиафрагменная ячейка. В целях улучшения характеристик устройства была исследована конструкция с большим числом диафрагм. Чтобы сохранить D_4 -симметрию, число диафрагм должно быть четным, поэтому их количество было выбрано равным четырем. Простейшую конструкцию такого типа можно получить, соединяя последовательно два одинаковых двухдиафрагменных устройства (рис. 1), расположив их на расстоянии l_1 . При этом каждая пара диафрагм является комплементарной: одинаковые размеры и смещения имеют первая и третья, вторая и четвертая диафрагмы соответственно. Однако для увеличения числа оптимизируемых параметров была рассмотрена другая последовательность диафрагм: одинаковые размеры и смещения имели пара внешних и пара внутренних диафрагм (рис. 4). При этом D_4 -симметрия конструкции сохранялась.

В качестве первого примера была исследована конструкция вращателя плоскости поляризации на 90° . Характеристики четырехдиафрагменной ячейки, оптимизированной для полосы

частот 10,25...10,75 ГГц, представлены на рис. 5. Размеры ячейки: $a_{10} = 13,4907$ мм, $b_{10} = 2,9979$ мм, $dx_0 = 0,7338$ мм, $dy_0 = 0,8074$ мм, $l_0 = 7,3268$ мм, $a_{11} = 13,4907$ мм, $b_{11} = 2,9979$ мм, $dx_1 = 0,7338$ мм, $dy_1 = 0,8074$ мм, $l_1 = 8,2596$ мм.

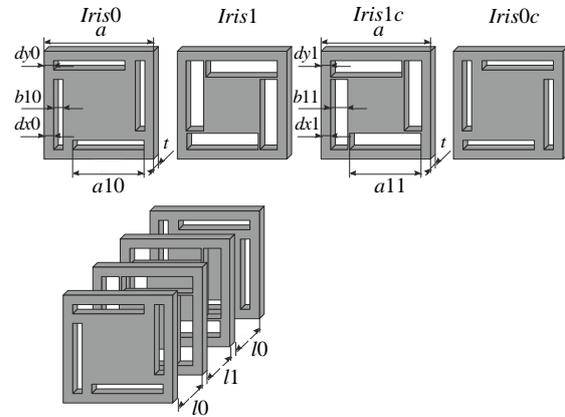


Рис. 4. Четырехдиафрагменная ячейка вращателя плоскости поляризации

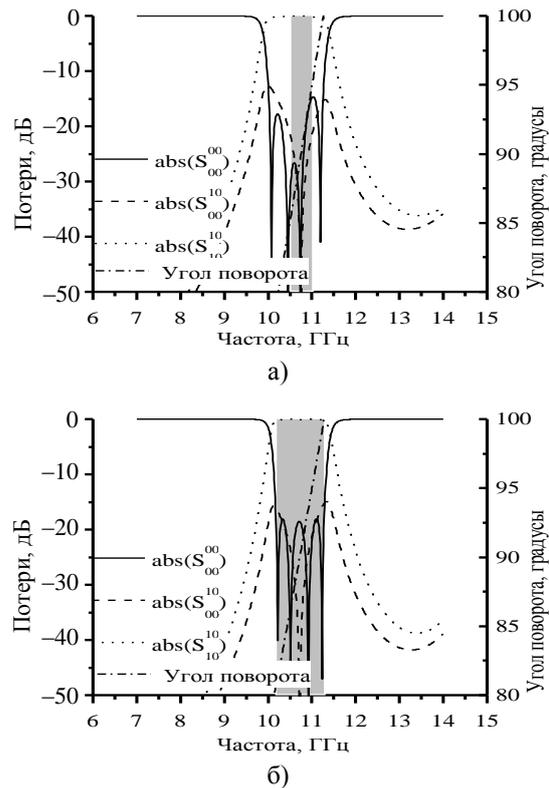


Рис. 5. Характеристики четырехдиафрагменного вращателя плоскости поляризации на 90° , оптимизированного для полосы частот: а) 10,25...10,75 ГГц; б) 10,25...11,35 ГГц

Видно, что по сравнению с двухдиафрагменной конструкцией на характеристике появились два дополнительных нуля записания, однако уровень отражения падающего поля в полосе пропускания и частотная дисперсия фактически

не изменились, поскольку из-за ограничений геометрии не удалось разместить эти дополнительные нули между парой основных нулей. При этом, как оказалось, конфигурации внутренней и внешней диафрагм практически совпали (отличие в шестом знаке для dx и dy).

Используя более широкую полосу частот для оптимизации (10,25...11,35 ГГц), удалось выровнять уровень пульсаций в полосе и получить почти фильтровую характеристику (рис. 5, б) с приемлемым значением коэффициента отражения (обратные потери порядка -17 дБ). Частотная дисперсия угла поворота плоскости поляризации при этом увеличилась пропорционально увеличению полосы и достигла 20° . С точностью до сотых долей миллиметра сохранилось и равенство размеров внутренних и внешних диафрагм. Размеры ячейки $a_{10} = 14,1504$ мм, $b_{10} = 1,4989$ мм, $dx_0 = 2,2078$ мм, $dy_0 = 0,1584$ мм, $l_0 = 7,0074$ мм, $a_{11} = 14,1658$ мм, $b_{11} = 1,4989$ мм, $dx_1 = 2,2363$ мм, $dy_1 = 0,14978$ мм, $l_1 = 8,4692$ мм.

И наконец, была проведена оптимизация четырехдиафрагменного вращателя поляризации на 45° . Типичная характеристика такого вращателя представлена на рис. 6.

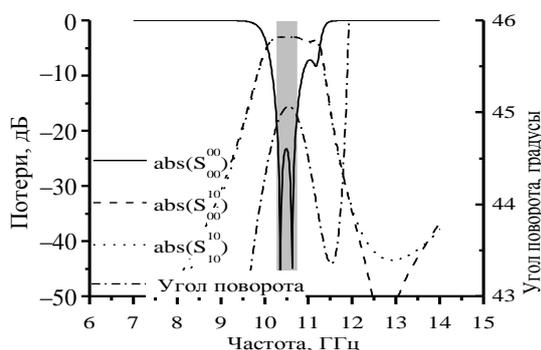


Рис. 6. Характеристики четырехдиафрагменного вращателя плоскости поляризации на 45° , оптимизированного для полосы частот 10,25...10,75 ГГц

Как видно из рисунка, в рабочей полосе волновода имеются три, а не четыре резонансных минимума, при этом два из них находятся в заданном диапазоне, обеспечивая малый коэффициент отражения. Третий резонансный минимум нарушает обычную монотонность зависимости угла поворота плоскости поляризации от частоты, формируя точку перегиба и локальный экстремум на заданном значении угла поворота. Благодаря этому мы имеем очень низкую частотную дисперсию в полосе, составляющую меньше чем $0,5^\circ$, что на порядок лучше, чем у вращателей на 90° . При сравнении с двухдиафрагменной конструкцией (рис. 4) видно, что в данном случае достигается и существенно меньший коэффициент отражения падающего поля. Размеры ячейки

$a_{10} = 13,6131$ мм, $b_{10} = 2,7805$ мм, $dx_0 = 0,0002$ мм, $dy_0 = 0,1379$ мм, $l_0 = 7,982$ мм, $a_{11} = 13,6755$ мм, $b_{11} = 4,0182$ мм, $dx_1 = 0,6201$ мм, $dy_1 = 2,8668$ мм, $l_1 = 7,2585$ мм.

Выводы. Результаты применения многомерной оптимизации к синтезу поляризационных ячеек на многощелевых диафрагмах с одинаковыми прямоугольными апертурами можно обобщить следующим образом. Вращатели плоскости поляризации электромагнитных волн на основе двух комплементарных диафрагм с резонансными прямоугольными щелями, обладающие D_4 -симметрией, характеризуются компактными размерами и позволяют обеспечить угол поворота 90° лишь в одной частотной точке. В 5%-полосе частотная дисперсия угла поворота достигает 2° на 1 % частоты. Приемлемые коэффициенты отражения достигаются только в средней и высокочастотной частях рабочего диапазона.

Подобные конструкции вращателей, с углом поворота 45° , к сожалению, обладают слишком высоким коэффициентом отражения в полосе, что ограничивает их практическую применимость.

Увеличение количества диафрагм для вращателя плоскости поляризации на 90° не позволяет существенно улучшить характеристики конструкции, за исключением возможности расширения полосы до 10 %. В этом случае удается получить фильтроподобную характеристику коэффициента отражения, правда, с относительно высоким уровнем пульсаций. В целом, увеличение количества диафрагм в этом случае не представляется целесообразным.

При конструировании вращателей с углом поворота 45° наблюдается иная картина. Двухдиафрагменная конструкция не обеспечивает высокий коэффициент отражения в полосе, тогда как четырехдиафрагменная позволяет проектировать устройства с хорошим коэффициентом отражения и чрезвычайно низкой частотной дисперсией ($0,1^\circ$ на 1 % частоты). При достаточно малой длине (~ 23 мм) такой вращатель может, например, использоваться в сочетании с гребенчатым фазосдвигателем для проектирования компактных преобразователей линейной поляризации в круговую.

Библиографический список

1. Ragan G. L. Microwave Transmission Circuits / G. L. Ragan (Ed.). – N. Y.: Dover. – 1965 – 740 p.
2. Cornbleet S. Microwave Optics: The Optics of Microwave Antenna Design / S. Cornbleet. – L.: UK: Academic Press, 1977. – 433 p.
3. Kirilenko A. A. Ultra-compact 90° twist based on a pair of two closely placed flat chiral irises / A. A. Kirilenko, N. G. Kolmakova, S. A. Prikolotin // Radioelectronics and Communications Systems. – 2012. – 55, N 4. – P. 175–177.

4. *The simple example of polarization plane rotation by the fringing fields interaction* / N. Kolmakova, S. Prikolotin, A. Kirilenko, A. Perov // Proc. 43rd European Microwave Conf. (EuMC-2013). – Nuremberg, 2013. – P. 936–938.
5. *Natural oscillations providing 90° polarization plane rotation by planar chiral double-slot irises* / A. A. Kirilenko, N. G. Kolmakova, A. O. Perov et al. // Radioelectronics and Communications Systems. – 2014. – 57, N 12. – P. 521–530.
6. *Swanson D. Microwave filter design by synthesis and optimization* / D. Swanson // IEEE Microwave Magazine. – 2007. – 8, N 2. – P. 55–69.
7. *Rahmat-Samii and Y. Electromagnetic Optimization by Genetic Algorithms* / Y. Rahmat-Samii, E. Michielssen. – N. Y.: Wiley-Interscience, 1999. – 512 p.
8. *Приколотин С. А. Метод частичных областей с учетом особенностей во внутренних задачах с произвольными кусочно-координатными границами. Часть 1. Спектры собственных волн ортогонных волноводов* / С. А. Приколотин, А. А. Кириленко // Радиофизика и электрон. – 2010. – 1(15), № 1. – С. 17–29.
9. *Метод частичных областей с учетом особенностей во внутренних задачах с произвольными кусочно-координатными границами. Часть 2. Плоско-поперечные соединения и «in-line» объекты* / С. А. Стешенко, С. А. Приколотин, А. А. Кириленко и др. // Радиофизика и электрон. – 2013. – 4(18), № 1. – С. 15–25.

Рукопись поступила 11.06.2015.

D. Yu. Kulik, L. P. Mospan,
A. O. Perov, N. G. Kolmakova

COMPACT POLARIZATION ROTATORS BASED ON THE DIAPHRAGMS WITH RECTANGULAR APERTURES

The requirement of being compact is obvious for the designs of modern communication systems of civil and military purposes. The ultimate performances of perspective compact polarization rotators are examined in the paper. The rotators are formed by the dihedral symmetry structures. The dihedral struc-

tures are based on the multi-aperture diaphragms with the rectangular slots. Multi-parameter optimization is used to achieve the ultimate performances in different frequency ranges. The limits for the rotators' application area are established. The designs, providing polarization plane rotation for arbitrary rotation angle at the acceptable values of the reflection coefficient over the frequency band are proposed. The designs make the elemental base of the receiving and the transmitting equipment broader and they are intended to provide given phase separations of the radio signals, to perform required phase correction or polarization compensation.

Key words: polarizer, waveguide, diaphragm, optimization.

Д. Ю. Кулик, Л. П. Мосьпан,
А. О. Перов, Н. Г. Колмакова

КОМПАКТНІ ОБЕРТАЧІ ПЛОЩИНИ ПОЛЯРИЗАЦІЇ НА БАЗІ ДІАФРАГМ ІЗ ПРЯМОКУТНИМИ ЩІЛИНАМИ

Компактність конструктивних елементів антенно-фідерних трактів є обов'язковою вимогою для розробки сучасних радіолокаційних комплексів цивільного або військового призначення. У роботі досліджено граничні характеристики перспективних компактних обертачів площини поляризації електромагнітних хвиль, що є виконаними на базі структур із дієдральною симетрією. Дієдрально симетричні структури сформовані резонансними діафрагмами із прямокутними щілинами. Багатопараметричну оптимізацію застосовано, щоб отримати граничні характеристики пристроїв у різноманітних частотних діапазонах. Визначено галузь їх застосування. Запропоновано конструкції, які забезпечують обертання площини поляризації на 45 та 90° за прийнятних значень коефіцієнтів відбиття в заданій смузі частот. Ці конструкції поширюють елементну базу приймально-передавальної апаратури, яку призначено для забезпечення заданого фазового розподілу радіосигналів, їх фазової корекції або поляризаційної компенсації.

Ключові слова: поляризатор, хвилевід, діафрагма, оптимізація.