

**А.О. Касьянов**

**ПРИМЕНЕНИЕ ПЕЧАТНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК  
ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН  
МИКРОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА**

*Статья посвящена рассмотрению возможности применения микрополосковых дифракционных решеток (МПДР), как устройств поляризационной селекции и трансформации. Ключевым компонентом таких устройств являются многоэлементные печатные решетки, в том числе и так называемые реконфигурируемые электродинамические структуры (ЭДС). Разработка и проектирование микроволновых компонентов в виде поляризационно-чувствительных многоэлементных МПДР требует создания адекватных математических моделей таких ЭДС, базирующихся на электродинамических методах. Исследование с помощью электродинамических моделей многоэлементных микрополосковых дифракционных решеток проходного и отражательного типа для создания на их основе пространственных поляризационных фильтров, трансформаторов и манипуляторов поляризации электромагнитных волн (ЭМВ) в микроволновом диапазоне является весьма актуальной задачей современного антенностроения. На основе разработанной САПР-ориентированной математической модели электродинамического уровня созданы поверхностно-распределенные пространственные поляризаторы в виде многоэлементных плоских микрополосковых дифракционных решеток. Определены параметры плоских МПДР перспективных для применения в качестве СВЧ-компонентов современных радиотехнических комплексов (РТК) различного назначения. Выработаны рекомендации по применению микроволновых компонентов РТК, выполненных на основе МПДР, в антенных обтекателях, вспомогательных и фазокорректирующих рефлекторах зеркальных антенн, свернутых линзовых антеннах и при создании радиолокационных покрытий.*

*Дифракционная решетка; печатный элемент; микроволновый диапазон; поляризация; твист-рефлектор; фазовая коррекция; цифровое радиоэлектронное покрытие; поляризационный фильтр; бинарный модуль.*

**A.O. Kasyanov**

**PRINTED LATTICES APPLICATION TO ELECTROMAGNETIC WAVES  
POLARIZATION CONTROL AT MICROWAVES**

*The paper is devoted to consideration of variants of solution to some problems of diffraction for printed arrays with anisotropic inhomogeneities. The rotation of the plane of polarization is realized by means of a twist-reflector. On the basis of computational and full-scale experiments it was shown that twist reflectors based on microstrip reflective type antenna arrays (RAA) can be quite broadband. The obvious advantage of such twist-reflectors is simplicity of the technology of their manufacture, small thickness and weight. In addition, in twist-reflectors based on printed RAA, it is possible to constructively realize the necessary phase distributions of the field on their surfaces. Thus, it becomes possible to use such twist-reflectors to create phase-correcting twist-reflectors. It is shown that introduction of impedance loads in the construction of the re-radiating elements of the printed RAA opens additional possibilities for controlling the field scattered by it. Thus, twist reflectors with improved characteristics can be realized on the basis of microstrip-pin RAA. The results of numerical studies based on the author algorithms and computational programs are presented. Besides, spatial polarizing filters and a controllable twist-reflectors based on microstrip RAA are considered. If microstrip elements of a twist-reflector contain controllable loads, then qualitatively new type of the microwave device is formed. This device enables to control polarization of the scattered field. Such devices can be named by polarizing modulators or manipulators. By means of printed RAA with elements of complex topology the spatial polarizers, which can transform electromagnetic waves with linear polarization in waves with rotating polarization and, in particular, in waves with circular polarization, are realized.*

*Grating; printed element; microwave range; polarization; twist-reflector, phase correction, digital radar cover, polarization filter, binary module.*

**Введение.** В состав антенных систем современных радиотехнических комплексов СВЧ-диапазона входят устройства первичной обработки сигналов, производимой на несущей частоте [1]. В качестве устройств первичной обработки сигналов выступают различного рода селектирующие устройства, а именно: частотные, угловые и поляризационные фильтры, а также устройства управления поляризацией излучаемого или принимаемого поля. Эти устройства располагаются либо в фидерном тракте, либо помещаются непосредственно в излучающую систему антенны, образуя многофункциональный обтекатель [2–4]. Известно, что печатные дифракционные решетки, обладают не только частотно-угловой чувствительностью, но также могут обладать поляризационной избирательностью [5]. При этом одной из наиболее перспективных областей применения таких решеток являются интеллектуальные покрытия [6], выполняемые на основе реконфигурируемых электродинамических структур [7]. Разработка таких структур требуют создания высококачественных математических моделей решеток, базирующихся на электродинамических методах.

**1. Отражательные антенные решетки и ФАР проходного типа в печатном исполнении.** Широкое внедрение ФАР в практику тормозится их чрезвычайно высокой стоимостью и сложностью. Радиоэлектронные комплексы, построенные с применением многоэлементных ФАР, как правило, представляют собой уникальные по сложности и стоимости сооружения. Отказываться же от применения ФАР по указанным причинам неразумно. Гораздо более целесообразным представляется другой путь, связанный с решением проблемы создания конструктивно более простых и по возможности дешевых ФАР. Этим требованиям удовлетворяют весьма технологичные микрополосковые антенные решетки (АР), элементы которых имеют значительно более низкую стоимость. Еще одним направлением снижения стоимости решеток является возможность использования при построении ФАР более экономичных распределительных систем. Поэтому особое место среди АР упрощенной конструкции занимают *отражательные антенные решетки (ОАР)*. Степень упрощения в них велика, поскольку входные и выходные зажимы в решетке совмещены, стоимость ОАР значительно ниже обычных антенных решеток так называемого *проходного типа*. Кроме того, они могут применяться, не только как АР, т.е. устройства, позволяющие формировать требуемое пространственное распределение излучаемой мощности, но и для создания многочисленных устройств пространственной, частотной и поляризационной селекции и трансформации.

В монографиях автора [19, 44], а также в данной работе рассматриваются многоэлементные микрополосковые ФАР проходного и отражательного типа, а также СВЧ- и КВЧ-устройства пространственной, частотной и поляризационной селекции и трансформации (рис. 1) и возможные области применения таких электродинамических структур.

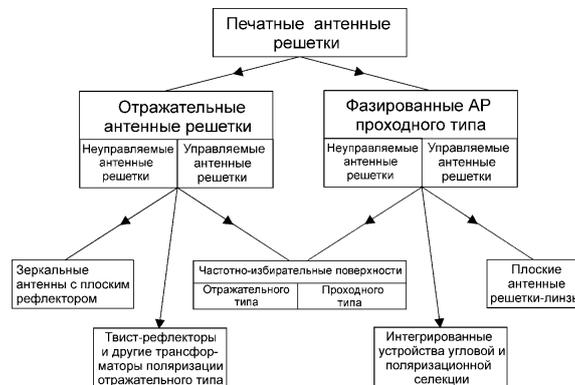


Рис. 1. Устройства на основе многоэлементных печатных антенных решеток

*Цель работы* – исследование с помощью электродинамических моделей многоэлементных микрополосковых дифракционных решеток проходного и отражательного типа для создания на их основе пространственных поляризационных фильтров, трансформаторов и манипуляторов поляризации электромагнитных волн в СВЧ-диапазоне (рис. 2), а также анализ результатов численного исследования на предмет возможного применения их, например, при создании метаматериалов [8] и киральных электродинамических структур [9].

## 2. Применение результатов математического моделирования к созданию поляризационно-чувствительных микрополосковых дифракционных решеток.

**2.1. Твист-рефлекторы.** Как правило, твист-рефлектор представляет собой отражательную антенную решетку (ОАР) [10]. Твист-рефлекторы находят применение в свернутых линзовых антеннах (ЛА). По сравнению с обычными ЛА свернутые антенны имеют меньшую благодаря введению в их состав твист-рефлекторов [11]. Кроме того, твист-рефлекторы применяют в зеркальных антеннах с механическим сканированием, где быстрое сканирование достигается движением легкого поляризатора [12].

Самыми очевидными конструктивными реализациями твист-рефлекторов являются, либо гребенчатая структура четвертьволновой ( $\lambda/4$ ) глубины, либо частопериодическая решетка проводящих лент, нанесенных на диэлектрическую подложку толщиной  $\lambda/4$ , опирающаяся на сплошной проводящий экран. Помимо данного технического решения, как показано в табл. 1, наиболее популярными конструкциями печатных твист-рефлекторов являются:

- ◆ дифракционная решетка (ДР), составленная из прямоугольных МПЭ, расположенных в узлах сетки с прямоугольной формой единичной ячейки (ЕЯ), схематическое изображение ЕЯ которой приведено в колонке 2 строки 1 табл. 1 [11, 12];
- ◆ частопериодическая ДР, составленная из микрополосковых (печатных) вибраторов (МПВ), расположенных в узлах густой сетки с ЕЯ прямоугольной формы, схематическое изображение которой приведено в колонке 1 строки 1 табл. 1 [11, 13];
- ◆ ДР на основе печатных элементов (ПЭ), имеющих форму ленточных проводников (ЛП), каждый из которых изогнут в виде меандра, схематическое изображение ЕЯ которой приведено в колонке 3 строки 1 табл. 1 [13].

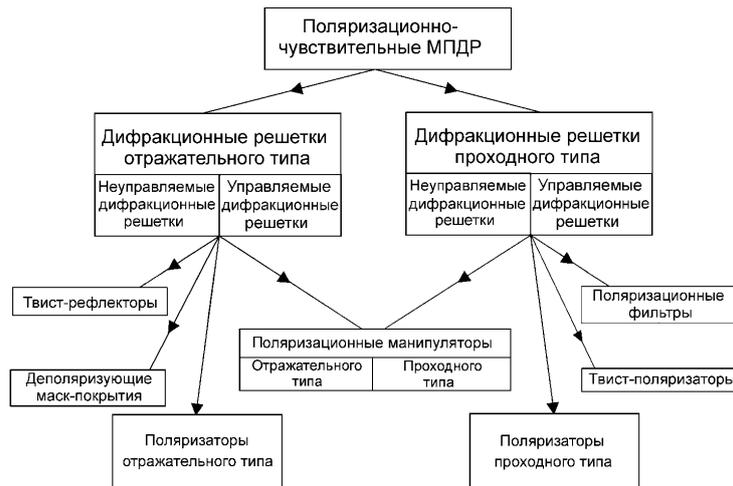


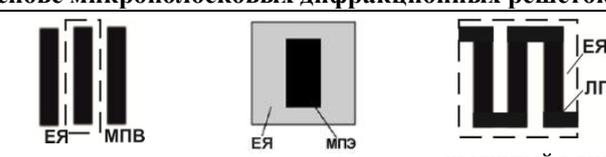
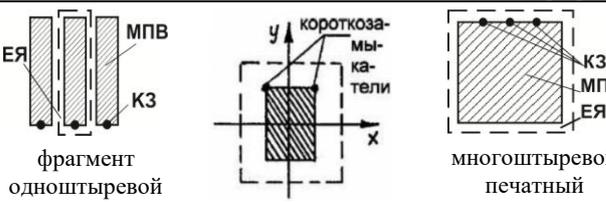
Рис. 2. Устройства поляризационной селекции и трансформации на основе МПДР

Как видно из табл. 1, также известны варианты конструктивной реализации твист-рефлекторов на основе совмещенных дифракционных решеток, в частности:

- ◆ совмещенная ДР печатных элементов, составленная из отдельных малоэлементных подрешеток ПЭ, в частности, печатных вибраторов, различающихся как шириной печатного проводника, так и шириной зазора, схематическое изображение ЕЯ которой приведено в колонках 1 и 2 строки 2 табл. 1 [12];
- ◆ совмещенная ДР, в состав подрешетки которой входит несколько одинаковых МПВ с периодичностью, отличной от периодичности размещения подрешеток ДР в целом [12].

Таблица 1

**Типы печатных переизлучателей в твист-рефлекторах на основе микрополосковых дифракционных решеток**

№ п/п	Наименование переизлучателя	Топология микрополоскового переизлучателя решетки
<b>Твист-рефлекторы на основе микрополосковых дифракционных решеток</b>		
1.	Печатные вибраторы, пластинчатые и меандровые переизлучатели (ЕЯ – единичная ячейка)	 <p>густая сетка из печатных вибраторов [5]      пластинчатый ПЭ прямоугольной формы [13]      изогнутый в виде меандра ленточный ПЭ [12]</p>
2.	Совмещенные решетки из печатных переизлучателей (МПВ – микрополосковый вибратор)	 <p>решетка из МПВ переменной ширины [12]      решетка МПЭ с переменным зазором [12]      каскадное включение решеток ортогональных МПВ [12]</p>
3.	Микрополосково-штыревые переизлучатели	 <p>фрагмент одноштыревой решетки МПВ [14]      двухштыревой МПЭ [14]      многоштыревой печатный переизлучатель [14]</p>

Особое место среди представленных в табл. 1 конструкций неуправляемых твист-рефлекторов в печатном исполнении занимает частотно-селективный твист-рефлектор, схематическое изображение которого приведено в колонке 3 строки 3 табл. 1. На резонансной частоте  $f_0$  данная дифракционная решетка представляет собой твист-рефлектор, а на частотах  $f \neq f_0$  ДР перестает быть отражательной, так как частично пропускает падающие на неё волны, поскольку вместо сплошного проводящего экрана в ней применяется частотно-избирательная поверхность (ЧИП) [15]. Такую электродинамическую структуру (ЭДС) можно рассматривать

как результат каскадного включения двух ДР, поскольку она содержит две решетки из МПВ, нанесенных на противоположных сторонах четвертьволнового диэлектрического слоя. При этом МПВ каждой из решеток ортогонально ориентированы друг относительно друга [12].

Введение штырей в состав ПЭ отражательных решеток открывает дополнительные возможности по трансформации поляризации возбуждающих их волн [11, 14, 16]. При корректном выборе их параметров твист-рефлекторы на основе микрополосково-штыревых отражательных решеток могут быть сделаны весьма широкополосными. В табл. 1 представлены:

- одноштыревые отражательные решетки (ОР), в которых к каждому МПВ подключается один проводящий штырь. Схематическое изображение фрагмента такой решетки приведено в колонке 1 строки 3 табл. 1. Для неуправляемых ЭДС каждый из штырей, являясь короткозамыкателем (КЗ), шунтирует соответствующий МПВ на сплошной проводящий экран, примыкающий к теневой стороне диэлектрической подложки, на освещенной стороне которой нанесена вибраторная решетка. При этом КЗ подключается середине узкой грани МПВ. Такие решетки являются частопериодическими. Твист-рефлекторы, выполненные на основе подобных решеток, являются широкодиапазонными. При этом с их помощью легко удается реализовать твист-эффект при отражении волн в полосе частот превышающей октаву [5].

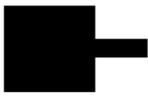
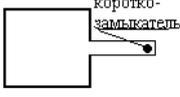
♦ двухштыревые ОР, в таких решетках к каждому прямоугольному МПЭ подключается два КЗ. Схематическое изображение ЕЯ такой решетки приведено в колонке 2 строки 3 табл. 1. Короткозамыкатели подключаются к двум смежным вершинам прямоугольного МПЭ, шунтируя на проводящий экран более узкую грань МПЭ. Такие твист-рефлекторы являются наиболее широкополосными из всех описанных выше [17];

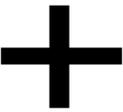
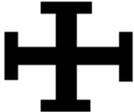
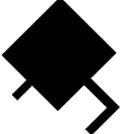
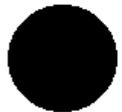
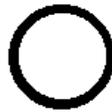
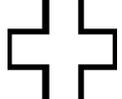
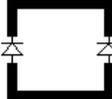
♦ многоштыревые печатные переизлучатели позволяют создавать ЭДС со свойствами приближающимися к ОР комбинированных элементов [18]. Схематическое изображение фрагмента такой решетки приведено в колонке 3 строки 3 табл. 1. Твист-рефлекторы, создаваемые на основе подобных ЭДС, по своим свойствам подобны гребенчатым структурам с Г-образно-изогнутыми канавками [19].

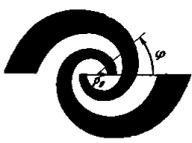
**2.2. Зеркальные антенны с плоскими рефлекторами на основе микрополосковых отражательных антенных решеток.** В плоских зеркальных антеннах ОАР выполняет роль фазокорректирующего рефлектора, преобразующего сферический фазовый фронт волны облучателя в плоский. При этом конструктивный синтез ОАР сводится к оптимальному подбору типа и размеров элементов ОАР, обеспечивающему при отражении необходимую фазовую задержку. Синтез должен учитывать и ряд дополнительных требований, связанных с пределами управления фазой отраженного поля, частотной стабильностью и т.п. Наиболее популярные конструкции элементов ОАР приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Наиболее популярные типы микрополосковых излучателей в антенных решетках**

№ п/п	Наименование излучателя	Топология микрополоскового излучателя		
1	Излучатель с реактивным шлейфом	 разомкнутый [20]	 короткозамкнутый [21]	 с «внутренним» питанием [22]

2	Печатные вибраторы и пластинчатые печатные излучатели	 печатный вибратор [20]	 антенна «бабочка» [23]	 пластинчатый МПИ [24]
3	Излучатели для работы на ортогональных поляризациях	 крестообразный [25]	 иерусалимский крест [26]	 мальтийский крест [27]
4	Печатные излучатели для работы на круговой поляризации	 пластинчатый с ортогональными шлейфами [23]	 дисковый МПЭ [28]	 кольцевой элемент [29]
5	Излучатели в виде печатных рамок	 прямоугольная рамка [30]	 крестообразная рамка [25]	 2 полуарочных МПЭ [31]
6	Совмещенные печатные излучатели	 пластинчато-рамочный [32]	 диско-кольцевой [33]	 один L – два L/2 МПВ [34]
7	Микрополосково-штыревые и комбинированные излучатели	 многоштыревой с разомкнутым шлейфом [35]	 комбинация продол. с поперечным МПЭ [21]	 комбинированный микрополосково-штыревой [36]
8	Геометрические фракталоподобные элементы	 треугол. Серпинского [37]	 салфетка Серп. [37]	 квадрат Минковского [37]
9	Щелевые излучатели и элементы апертурного типа	 [38]	 [38]	 [39]

10	Спиральные излучатели	 <p>компактная 2-заходная спираль Архимеда [40]</p>	 <p>двухзаходная спираль Архимеда [41]</p>	 <p>логарифмическая печатная спираль [41]</p>
----	-----------------------	--	--	--

При создании печатных ОАР наибольшее распространение получили варианты их конструктивной реализации, в которых микрополосковые элементы снабжаются шлейфами на основе печатных линий передачи и, когда размеры или углы поворота вокруг собственных осей элементов варьируются в зависимости от их местоположения на переизлучающем полотне отражательной решетки так, чтобы ОАР обеспечивала требуемую фокусировку поля облучателя. Возможность фокусировки может достигаться также и в микрополосковых ОАР с неэквидистантным расположением элементов.

Для реализации необходимой фазовой задержки при отражении от печатной решетки требуется изменять топологию и размеры полосковых элементов и определять при этом фазу коэффициента отражения на согласованной поляризации. Рассмотрим возможность применения в качестве плоского фокусирующего рефлектора нескольких видов отражательных решеток, составленных из элементов относительно несложной геометрии. Для наиболее простых типов излучателей – полосковых вибраторов, в том числе и крестообразных, (строки 2 и 3 табл. 2) результаты расчетов и экспериментов по определению зависимости фазовой задержки от длины вибратора свидетельствуют о возможности использования печатных полосковых вибраторных решеток для построения плоского фокусирующего рефлектора. В этом случае требуемое для фазовой коррекции изменение фазы коэффициента отражения происходит лишь в окрестности частоты резонанса данной ДР. При этом повышенная крутизна фазовой характеристики приводит к неустойчивому решению и сужению частотного диапазона работы такого рефлектора. Для решетки, составленной из квадратных полосковых элементов приведены диапазон изменения фазовой задержки в зависимости от относительного их размера достаточно велик. Выбором толщины подложки можно обеспечить довольно протяженный участок характеристики, близкий к линейному с пониженной крутизной, что соответствует уменьшенному значению добротности полоскового резонатора решетки.

Добиваясь понижения крутизны характеристики выбором толщины подложки, можно обеспечить компромисс между значением крутизны и диапазоном возможных изменений фазы коэффициента отражения.

Также представляет интерес исследование возможности регулировать вид фазовой характеристики за счет дополнительного усложнения топологии полоскового элемента решетки, направленного на введение вспомогательных частотно-зависимых элементов, изменяющих резонансные и частотные свойства решетки. Таким вспомогательным элементом может служить шлейф, подключенный к полосковому элементу. Подключение подобного разомкнутого на конце шлейфа к полосковому переизлучателю прямоугольной или квадратной формы (строка 1 табл. 2) придает фазовой характеристике элемента решетки фазокорректирующего рефлектора желаемый вид. Кроме того, такие излучатели практически не изменяют уровень кроссполяризации. Они могут быть рекомендованы для построения фокусирующих рефлекторов, работающих на линейной поляризации.

При построении фазокорректирующих рефлекторов достаточно эффективным оказывается также подход, основанный на повышении степени взаимной связи между излучателями решетки и ее регулировании. Возможность коррекции частотной зависимости фазы коэффициента отражения при уменьшении расстояния между излучателями полосковой щелевой решетки показана автором в работе [28], где показано, что микрополоско-щелевой излучатель может быть рекомендован к применению в качестве элемента плоского фокусирующего рефлектора.

Используя понятие об эквивалентном линейном излучателе, можно считать, что регулировка значения фазовой задержки коэффициента отражения за счет выбора характерного размера полоскового элемента может выполняться при использовании элементов любой формы. Однако следует иметь в виду, что при этом эквивалентное амплитудно-фазовое распределение существенным образом зависит от формы элемента. Поэтому, несмотря на общие признаки в характере поведения фазовых зависимостей, пределы регулирования и значение крутизны определяются конкретным выбором формы элемента решетки. Например, в [28] рассмотрена конструкция плоского рефлектора в виде решетки печатных колец. Подбором размеров элементов в таких решетках можно с успехом управлять значением фазы коэффициента отражения. Симметрия элементов решетки позволяет использовать ее для фазовой коррекции поля не только линейной, но и круговой поляризации.

Работа на круговой поляризации (строка 4 табл. 2) открывает дополнительные возможности по фокусировке поля облучателя с помощью так называемых спирафазных излучателей. В этом случае необходимую фазовую коррекцию можно получить за счет поворотов элементов ОАР на разные углы. При этом угол разворота отдельного излучателя АР определяется той фазовой задержкой, которую должен внести этот элемент в отраженное поле. Примеры конструктивной реализации зеркальных антенн с плоскими рефлекторами в виде спирафазных печатных ОАР рассмотрены автором в монографии [42].

Спирэфазные излучатели могут с успехом применяться не только в зеркальных, но и в линзовых антеннах-решетках. Перспективными представляются разработки линз на основе полосковых спирафазных излучателей [43]. В качестве последних удастся применять широкополосные излучатели, полосковый элемент которых имеет форму спирали Архимеда (строка 10 табл. 2). Из таких излучателей формируется как коллекторная решетка, так и излучающая. Требуемая фазовая задержка для каждого элемента излучающей АР обеспечивается поворотом на соответствующий угол передающего элемента по отношению к приемному.

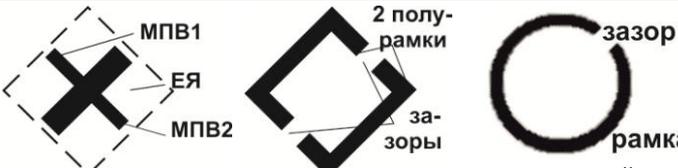
**2.3. Фазокорректирующие твист-рефлекторы (ФКТР).** В основу принципа построения фазокорректирующего твист-рефлектора (ФКТР) положена возможность реализации с помощью плоской печатной дифракционной решетки или перфорированного проводящего экрана, не только функции перевода при отражении поляризации падающей волны на ортогональную, но и одновременной фазовой коррекции падающей волны [44–46]. Некоторые из наиболее распространенных типов МПЭ и щелевых элементов ФКТР приведены в табл. 3. Следует заметить, что помимо, приведенных в табл. 3, широкое распространение получили решетки МПЭ и щелевые экраны с элементами простой геометрической формы, в частности, прямоугольной, как показано в колонке 2 строки 1 табл. 1. Данное техническое решение является достаточно удобным при отыскании требуемой топологии ФКТР, но только с точки зрения простоты численного моделирования. В то же время ФКТР, выполненные на основе ДР из прямоугольных печатных и щелевых элементов, оказываются весьма узкополосными, а следовательно, уступают в технологичности изготовления, представленным в табл. 3.

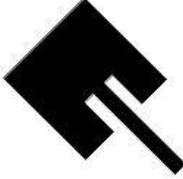
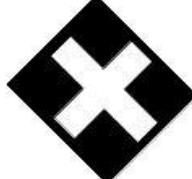
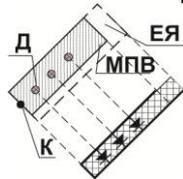
В качестве примера рассмотрим некоторые из приведенных в табл. 3 топологий ПЭ отражательных решеток, выступающих в качестве ФКТР. Например, в работе автора [47] описана свернутая ЗА, в которой каждый МПЭ её плоского рефлектора представляет собой пластинчатый переизлучатель прямоугольной формы. В прямоугольных пластинах выполнены прорезы (как показано на рисунке, приведенном в колонке 1 строки 3 табл. 3). Как видно из данного рисунка, к короткозамкнутым торцам прорезей, выполненных в каждом из пластинчатых МПЭ, подключены шлейфы, представляющие собой разомкнутые отрезки МПЛ. С одной стороны, подбирая глубину прореза и длину шлейфа, можно регулировать фазу отраженного поля. С другой стороны, ориентируя МПЭ относительно плоскости поляризации падающей волны так, как показано на рисунке, можно при отражении повернуть на угол  $90^\circ$  плоскость поляризации падающей на ОАР волны. Таким образом, данная ОАР представляет собой ФКТР для свернутой ДЗА [46].

В работе [46] описана свернутая МПОАР, в качестве печатных переизлучающих элементов ФКТР которой выступают квадратные МПЭ со шлейфами. Топологии таких элементов показаны на рисунках, изображенных в строке 2 табл. 3. Например, на рисунке, приведенном в колонке 2 строки 2, показано, что каждый квадратный МПЭ печатной решетки повернут на угол  $45^\circ$  относительно плоскости поляризации возбуждающей ФКТР волны. Для реализации эффектов поворота плоскости поляризации и фокусировки при отражении к каждому квадратному МПЭ присоединены два разомкнутых шлейфа. При этом шлейфы подключаются к смежным граням квадратного МПЭ.

Таблица 3

**Типы печатных переизлучателей в фазокорректирующих твист-рефлекторах, выполненных на основе микрополосковых дифракционных решеток**

№ п/п	Наименование переизлучателя	Топология микрополоскового переизлучателя решетки
<b>Фазокорректирующие твист-рефлекторы на основе многоэлементных МПДР</b>		
1.	Переизлучатели в виде скрещенных печатных вибраторов, рамочных и кольцевых ПЭ с разрывами печатных проводников	
2.	Переизлучатели с разомкнутыми реактивными шлейфами	

3.	Пластинчатые переизлучатели с настроечными шлейфами и прорезями, а также щелевые простой формы	 <p>пластинчатый МПЭ с «внутренним» питанием [46]</p>	 <p>крестообразные щелевые элементы [12]</p>	 <p>кольцевой щелевой элемент с разрывом [46]</p>
4.	Щелевые переизлучатели сложной формы и сканирующие вибраторные (К – короткозамыкатель; Д – СВЧ-диод; МПВ – печатный вибратор)	 <p>апертурный элемент 1 [46]</p>	 <p>апертурный элемент 2: 1 – с настроечной прорезью; 2 – шлейфом [12]</p>	 <p>единичная ячейка сканирующего ФКТР на основе МПВ с УЭ [46]</p>

Ещё одной разновидностью микрополосковых переизлучателей ФКТР, применяемых в свернутых ОАР ММВ-диапазона, являются МПЭ в виде незамкнутых печатных колец, топологии которых показаны на рисунке, изображенном в колонке 3 строки 1 табл. 3. Подбирая параметры кольцевых элементов, соответствующие различным фазовым задержкам, реализуемым такими отражательными фазовращателями, а также ориентируя зазоры в них под углом  $45^\circ$  к плоскости поляризации, можно добиться, не только корректировки фазового распределения на плоскости ОАР, но и такого преобразования поляризации поля отраженной волны, когда полосковая решетка одновременно выполняет функции как фазокорректирующего рефлектора, так и твист-рефлектора.

На рисунке, изображенном в колонке 3 строки 4 табл. 3, схематически показана ЕЯ сканирующего фазокорректирующего твист-рефлектора, выполненная в виде микрополосково-штыревой ОАР. Для обеспечения электронного сканирования лучом ДН такой ДР в её состав необходимо вводить штыри с управляемым поверхностным импедансом, моделирующих управляемые СВЧ-приборы, например, *p-i-n* – диоды. В работе автора [48], показано, что переключение диодов позволяет дискретно управлять фазой коэффициента отражения такой решетки. Как следует из изложенного выше, при соответствующем подборе размеров МПВ и ЕЯ решетки, а также мест включения *p-i-n* – диодов, с помощью данной ДР можно не только управлять фазой, но и поляризацией отраженной волны. Таким образом, расчетным путем показана возможность построения ФКТР с электронным сканированием на основе описанной в [48] управляемой МПДР.

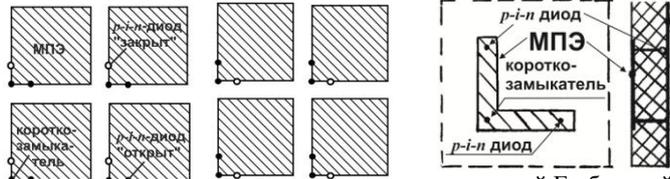
**2.4. Полосковые отражательные решетки с управляемыми элементами.** Примером конструктивной реализации печатной отражательной решетки с управляемой поляризацией поля является, описанный в работе [49] поляризационный манипулятор, представляющий собой планарную периодическую структуру, составленную из МПЭ с подключенными к ним управляющими

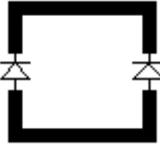
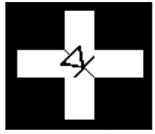
элементами СВЧ. Как показано в работе автора [49], для введения управляющих элементов (УЭ) в состав решетки, составленной из проводящих лент, требуется усложнять топологию ленточных проводников, вводя в неё дополнительные печатные шлейфы. При этом эти шлейфы являются разомкнутыми и включаются поперек ленточной решетки, образуя периодические решетки, каждая из которых ориентирована в направлении установки ленточных проводников. По существу, такая дифракционная решетка представляет собой решетку лент переменной ширины. Модуляция ширины ленточных проводников является периодической и реализуется посредством поперечных лентам разомкнутых шлейфов. При помещении такой решетки лент модулированной ширины над проводящим экраном при соответствующем подборе параметров удастся построить твист-рефлектор, а включением УЭ (переключательных СВЧ-диодов) в узкие места зазоров между лентами можно добиться управляемости такого твист-рефлектора. Таким образом, как показано в работе автора [49], создается поляризационный манипулятор (ПМ).

В работах автора [5, 7, 10, 49] приведены характеристики рассеяния ПМ, топология которого показана на рисунке, изображенном в колонке 2 строки 3 табл. 4.

Таблица 4

**Типы печатных переизлучателей в отражательных решетках с управляемой поляризацией поля**

№ п/п	Наименование переизлучателя	Топология микрополоскового переизлучателя решетки
<b>Управляемые твист-рефлекторы на основе печатных дифракционных решеток</b>		
1.	Модули цифровых управляемых деполаризующих радиолокационных покрытий (ЭДС – электродинамическое состояние)	 <p>модуль бинарного упр. покрытия в ЭДС «0» [50]</p> <p>то же в ЭДС «1»:</p> <p>● - диод открыт; ○ - диод закрыт [50]</p> <p>изогнутый Г-образный МПВ с КЗ и двумя <i>p-i-n</i>-диодами [50]</p>
2.	Решетки реконфигурируемых МПВ и пластинчатых МПЭ (К – короткозамыкатель, Д – СВЧ-диод)	 <p>решетка типа «шахматная доска» с диодами [5]</p> <p>управляемая дифр. решетка МПВ [14]</p> <p>сканирующий ФКТР на основе ДР, составленной из печатных вибраторов с <i>p-i-n</i> - диодами [16]</p>

3.	Печатные переизлучатели в виде реконфигурируемых печатных колец, рамок и щелей	 <p>кольцевой печатный элемент с 2-мя УЭ [13]</p>	 <p>поляризационный манипулятор рамочного типа [49]</p>	 <p>проводящий экран с переключаемыми крестообразными щелями [5]</p>
----	--	--	--	---

Помимо данного варианта конструктивной реализации ПМ в виде реконфигурируемых печатных рамок (колонка 2 строки 3 табл. 4), в публикациях автора, ссылки на которые указаны в табл. 4, приведены схематические изображения вариантов конструктивной реализации ПМ на основе пластинчатых (колонка 1 строки 2 табл. 4), вибраторных (колонка 2 строки 2 табл. 4), кольцевых (колонка 1 строки 3 табл. 4) и апертурных элементов (перфорирование крестообразными щелями проводящего экрана), как показано на рисунке, приведенном в колонке 3 строки 3 табл. 4.

Вторым примером конструктивной реализации печатной отражательной решетки с управляемой поляризацией поля являются микроволновые компоненты деполаризующих радиолокационных покрытий. Так в работе автора [50] описан класс управляемых отражательных решеток на основе анизотропных бинарных структур с цифровым управлением. Принцип работы таких решеток основан на комплексном использовании явлений деполаризации, интерференции и дифракции отраженных ими волн. Введение в состав МДР управляемых элементов (СВЧ-диодов) позволяет цифровым образом управлять электродинамическими характеристиками (ЭДХ) таких структур. Для достижения цифрового управления все элементы решетки разбиваются на группы (модули). При этом каждый модуль может находиться, как минимум, в двух электродинамических состояниях (ЭДС), определяемых тем, в каком состоянии пребывают управляемые элементы модуля – в открытом или закрытом. При этом под бинарностью каждого модуля понимается его способность находиться в одном из двух ЭДС. Состояние модулей контролируется процессором компьютера. Количество возможных состояний цифровой МДР пропорционально количеству модулей и числу допустимых состояний каждого модуля. Понятно, что такая цифровая ЭДС обладает множеством радиолокационных образов, управление которыми позволяет создавать, например, “интеллектуальные” покрытия (ИП) [6], способные адаптироваться к радиолокационной обстановке. Для цифрового управления характеристиками рассеяния такой отражательной решетки в конструкцию каждого МПЭ вводится несколько управляемых нагрузок (СВЧ-диодов), как показано в табл. 4. В зависимости от функционального назначения СВЧ-диоды могут играть роль, либо фазовращателей, либо коммутационных элементов. В случае, когда в качестве подложки такой печатной решетки выступает кристаллический полупроводник, диоды станут неотъемлемой её частью, а ЭДС будет представлять собой неразборную (твердотельную) конструкцию. В табл. 4 приведено схематическое изображение некоторых из возможных вариантов построения таких модулей в виде МПДР с управляемыми элементами (УЭ). В частности, в колонках 1 и 2 строки 1 табл. 4 показаны варианты ориентации «зашунтированной» грани МПЭ модуля ИП, где указано, что двум комбинациям включения УЭ, входящих в состав таких модулей, ставятся в соответствие бинарные состояния ИП. Таким образом, изменяя проводимость диодов, можно управлять ЭДС модуля управляемой ДР. В работе [50] показано, что технические решения, представленные в строке 1 табл. 4, позволяют выработать рекомендации по конструктивному синтезу адаптивных малоотражающих покрытий с цифровым управлением характеристиками рассеяния путем изменения ЭД состояний их модулей, построенных на основе бинарных микро-

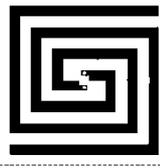
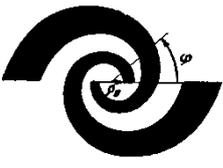
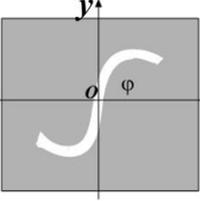
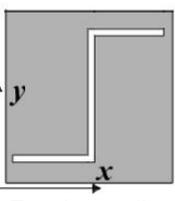
полосково-штыревых подрешеток. Среди представленных в строке 1 табл. 4 вариантов конструктивной реализации модулей бинарных покрытий особое место занимает вариант, топология которого изображена в колонке 3 строки 1 табл. 4, поскольку при объединении его в единый конструктив с вариантами, представленными в колонках 1 и 2 строки 1 табл. 4, позволяет получить совмещенную решетку бинарного модуля, обладающего расширенным функционалом по сравнению с рассмотренными выше вариантами построения таких бинарных модулей ИП.

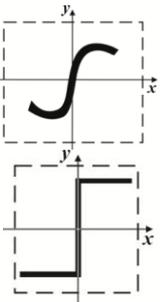
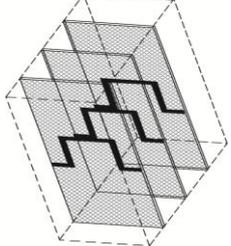
И, наконец, ещё одним примером конструктивной реализации печатной отражательной решетки с управляемой поляризацией поля является построение сканирующего ФКТР на основе вибраторной решетки отражательного типа, к каждому элементу которой подключаются *p-i-n*-диоды, шунтирующие его на сплошной проводящий экран, примыкающий к теневой стороне подложки, как показано на рисунке, приведенном в колонке 3 строки 2 табл. 4.

**2.5. Поляризаторы проходного и отражательного типа.** В табл. 5 представлены топологии печатных и апертурных элементов ОАР [51], которые удобно использовать для преобразования поляризации поля падающей на отражательную решетку волны линейной поляризации во вращающуюся и наоборот. В строке 1 табл. 5 представлены топологии печатных спиральных элементов дифракционных решеток, являющих одним из наиболее распространенных вариантов конструктивной реализации таких пространственных поляризаторов, как проходного, так и отражательного типа. При этом следует заметить, что среди представленных в табл. 5 вариантов особый интерес представляет решетка из спиральных элементов, каждый из которых представляет собой двухзаходную квадратную спираль Архимеда (колонка 1 строки 1 табл. 5).

Таблица 5

**Типы печатных элементов пространственных поляризаторов проходного и отражательного типа на основе печатных и щелевых дифракционных решеток**

№ п/п	Наименование переизлучателя	Топология микрополоскового переизлучателя решетки		
1	Спиральные переизлучатели	 <p>компактная 2-заходная спираль Архимеда [5]</p>	 <p>двухзаходная спираль Архимеда [19]</p>	 <p>логарифмическая печатная спираль [52]</p>
2	Щелевые переизлучатели сложной формы	 <p>S – образный щелевой переизлучатель ДР [53]</p>	 <p>Z – образный щелевой переизлучатель ДР [53]</p>	 <p>щелевой элемент «two-finger hand» (TFH). TFH – терминология из [9]</p>

3	Печатные переизлучатели сложной формы		 <p>ПЭ сопряженные щелевым элементам строки 2</p>	 <p>меандровый поляризатор [54]</p>
---	---------------------------------------	---	--	--

Среди топологий печатных и щелевых элементов поляризаторов проходного и отражательного типа, показанных на рисунках, помещенных в строках 2 и 3 табл. 5, следует выделить многоступенчатые печатные поляризаторы проходного типа на основе меандровых линий передачи (колонка 3 строки 3 табл. 5) [54], нашедшие широкое распространение на СВЧ при создании АО с преобразованием поля линейной поляризации в поле вращающейся поляризации (обычно круговой) и наоборот.

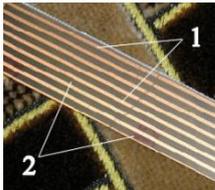
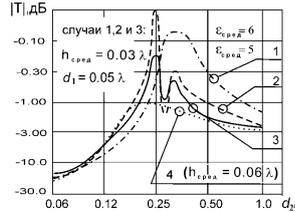
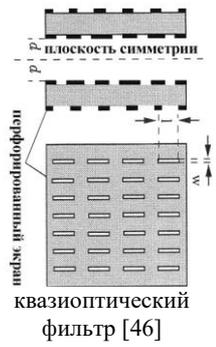
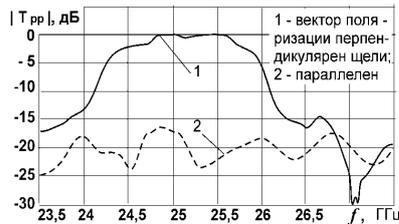
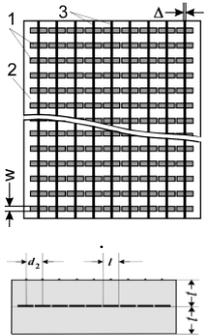
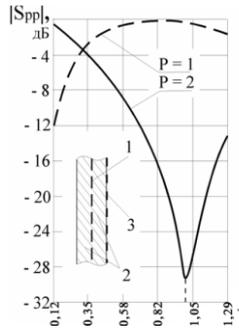
Реализовать не только твист-поляризаторы, но и дифракционные структуры, преобразующие вид поляризации поля (линейно поляризованное поле в поле круговой поляризации и наоборот) можно с помощью решеток печатных и апертурных элементов сложной топологии (S- и Z-образных, а также TFH-элементов, показанных на рисунках, помещенных в строке 2 и колонках 1 и 2 строки 3 табл. 5).

**2.6. Поляризационные фильтры.** Для защиты антенн различных радиоэлектронных средств, в процессе эксплуатации подвергающихся неблагоприятному воздействию окружающей среды, используются радиопрозрачные антенные обтекатели [4]. Включение в состав таких обтекателей дифракционных решеток позволяет не только решать задачи обеспечения герметичности, но и одновременно обеспечивать поляризационную селекцию и трансформацию. Примеры применения таких обтекателей при создании антенн судовых радионавигационных станций [55, 56] и свернутых зеркальных (ЗА) и линзовых (ЛА) антенн рассмотрены в работах автора [11, 13, 44-46]. С целью обобщения накопленного опыта создания подобных антенных обтекателей (АО) некоторые варианты их конструктивной реализации удобно представить в виде табл. 6.

Высокая радиопрозрачность является важнейшей эксплуатационной характеристикой антенного обтекателя. Повышенной радиопрозрачностью обладают, предложенные автором в [55], обтекатели выполненные на основе двухстороннего фольгированного диэлектрического слоя, например, стеклотекстолита, как показано на снимке, помещенном в строке 1 табл. 6. На обеих сторонах стеклотекстолитовой подложки толщиной  $h$  вытравливаются две печатные решетки взаимно ортогональных лент. В плане эти решетки образуют сетку с прямоугольной формой ЕЯ. При этом одна из решеток (частопериодическая) выполняет функции поляризационного селектора, а вторая (просветляющая) позволяет повысить радиопрозрачность АО, как видно из графиков, обозначенных цифрами 1 и 2, показанных на рисунке, помещенном в строке 1 табл. 6.

Таблица 6

**Типы поляризационных фильтров на основе печатных решеток и перфорированных экранов**

№ п/п	Наименование переизлучателя	Топологии печатных/щелевых элементов дифракционных решеток – поляризационных фильтров и их характеристики рассеяния
1.	Металлодиэлектрические ЭДС на основе решеток проводящих лент	 <p>Снимок фрагмента обтекателя – поляризац. фильтра, где: 1 – ленточные медные проводники; 2 – диэлектрический слой, разделяющий решетки лент [56]</p>  <p>ЧХ коэф. прохождения волн сквозь обтекатель – ПФ [57]</p>
2.	Перфорированные экраны в составе многослойных металлодиэлектрических ЭДС	 <p>квазиоптический фильтр [46]</p>  <p>Расчетные ЧХ фильтров на основе 4 перфорированных экранов, попарно нанесенных на обеих сторонах каждой из двух фторопластовых подложек толщиной примерно 3,2 мм, [9]</p>
3	Вибраторные решетки и решетки лент в составе многослойных металлодиэлектрических ЭДС	 <p>частотно-избирательный ПФ на основе ДР лент и вибратора.</p>  <p>Частотные характеристики элементов ПМР четырехслойного ПФ, состоящего из: 1 - вибраторной печатной ДР, выполняющей функции поляризационного селектора; 2 - два диэлектрических слоя; 3 - «просветляющая решетка» - решетка лент ортогонально ориентированных по отношению к микрополосковым вибраторам поляризационного селектора [58, 59]</p>

С точки зрения необходимости обеспечения требуемых условий эксплуатации предпочтение следует отдавать конструкциям, в которых решетки металлических лент укрываются защитным слоем из стеклоткани. Таким усложненным конструкциям соответствуют графики, обозначенные цифрами 3 (для случая одностороннего нанесения стеклоткани) и 4 (для случая двухстороннего нанесения стеклоткани).

Еще одним вариантом конструктивной реализации ПФ в виде металлодиэлектрической ЭДС является квазиоптический фильтр, выступающий в качестве вспомогательного плоского рефлектора свернутой ЗА, схематическое изображение которого показано на рисунке, помещенном в строке 2 табл. 6. Как видно из рисунка, ПФ построен на основе многослойной планарной решетки, выполненной в виде перфорированных экранов, разделенных диэлектрическими слоями. Расчетная ЧХ такого квазиоптического фильтра показана на рисунке, помещенном в строке 2 табл. 6. По сравнению с обычным сеточным ПФ такой квазиоптический фильтр обеспечивает лучшее подавление боковых лепестков ДН свернутой ЗА, причем в наибольшей степени оно проявляется для боковых лепестков диаграммы направленности ЗА, не входящих в сектор прозрачности углового фильтра [4]. Однако, из-за потерь в многослойной диэлектрической подложке, коэффициент усиления антенны с вспомогательным рефлектором в виде квазиоптического фильтра несколько ниже, чем в ЗА, в качестве ПФ которой выступает частопериодическая решетка лент.

Преодолеть недостатки описанных выше вариантов конструктивной реализации ПФ удастся в конструктиве, выполненном в виде многослойной структуры, состоящей из диэлектрических слоев и решеток МПЭ. В этом случае полосковая ДР и печатный ПФ оказываются совмещенными в единой конструкции, представляющей собой решетку микрополосковых вибраторов (МПВ) с поляризационно-селективным полупрозрачным экраном, как показано на рисунке, помещенном в строке 3 табл. 6. Там же приведены состав и основные результаты конструктивного синтеза поляризационно-избирательного вспомогательного плоского рефлектора свернутой ЗА. Как видно из графиков, представленных на рисунке, помещенном в строке 3 табл. 6, такая структура на частоте  $f_0$  обеспечивает высокий уровень отражения волн облучателя ( $|S_{11}| = -0,11$  дБ) и высокую прозрачность для волн отраженных от основного зеркала свернутой ЗА ( $|S_{22}| = -29,2$  дБ).

**Выводы.** С помощью разработанных электродинамических моделей исследованы многоэлементные микрополосковые дифракционные решетки проходного и отражательного типа для создания на их основе пространственных поляризационных фильтров, трансформаторов и манипуляторов поляризации волн в микроволновом диапазоне. Проведен анализ результатов численного исследования на предмет возможного применения. Так в части АО для судовых радионавигационных комплексов показана целесообразность применения многослойных решеток, позволяющих добиться высокой радиопрозрачности на рабочей линейной поляризации в сочетании фильтрацией волн кросс-поляризации за счет объединения частопериодической решетки поляризационного селектора с «просветляющей» решеткой проводящих лент.

Показана возможность эффективного использования разработанной математической модели периодической решетки МПЭ при проектировании твист-поляризаторов. Благодаря достаточной универсальности модели удалось исследовать твист-поляризаторы не только в виде однослойных решеток с МПЭ простой формы, но и в виде совмещенных и многослойных решеток. Применение последних позволяет строить твист-поляризаторы, не только улучшенными диапазонными характеристиками, но и создавать многофункциональные устройства. При этом введение управляемых нагрузок ( $p-i-n$ -диодов) в состав единичной ячейки печатной ДР позволяет, не только расширить полосу рабочих частот тонкослойных МДР-поляризаторов для ДЗА с поворотом плоскости поляризации, но и построить сканирующий ФКТР.

В результате проведенного численного исследования характеристик рассеяния (ХР) управляемых твист-рефлекторов на основе реконфигурируемых микрополосковых решеток (МПП) установлена взаимосвязь между конструктивными параметрами МПП и ХР, создаваемых на их основе твист-рефлекторов. Численно выявлен эффект аномального рассеяния волн МПП твист-рефлектора при наклонном падении на неё возбуждающей волны. Показана возможность построения цифрового управляемого радиоэлектронного покрытия с пространственно-временной адресацией, составленного из реконфигурируемых СВЧ-модулей, выполненных на основе печатных отражательных решеток, каждый из элементов которых снабжен управляемыми нагрузками.

Показано, что использование микрополосковых отражательных антенных решеток с печатными элементами, имеющими сложную топологию, открывает дополнительные возможности по поляризационной фильтрации и трансформации поляризации полей, отраженных от и/или прошедших сквозь такие решетки волн. В частности, показано, что с помощью решеток печатных и апертурных элементов сложной топологии (TFH, S- и Z-образных, а также спиральных) реализуются не только твист-поляризаторы, но и дифракционные структуры, преобразующие вид поляризации поля (линейно поляризованное поле в поле круговой поляризации и наоборот).

Таким образом, в статье показано, что по целому ряду функциональных назначений полосковые ОАР могут составить набор базовых элементов для создания компонентов интеллектуальных покрытий, предназначенных для работы в микроволновом диапазоне.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лобов Г.Д. Устройства первичной обработки микроволновых сигналов: Физические принципы. Анализ и синтез. Применения. – М.: Изд-во МЭИ, 1990. – 255 с.
2. Касьянов А.О., Обуховец В.А. Расчет и экспериментальное исследование многофункционального обтекателя судовой антенны // Радиотехника. – 2004. – № 4. – С. 51-56.
3. Касьянов А.О. Частотно-избирательный обтекатель на основе металлodieлектрических дифракционных решеток и перфорированных экранов // Антенны. – 2021. – № 3. – С. 39-49.
4. Касьянов А.О. Антенный обтекатель с угловой фильтрацией на основе металлodieлектрических дифракционных решеток // Радиотехника. – 2021. – Т. 85, № 7. – С. 70-79.
5. Касьянов А.О., Обуховец В.А. Пространственные поляризационные фильтры, преобразователи и манипуляторы на основе микрополосковых дифракционных решеток // Антенны. – 2011. – № 7. – С. 43-51.
6. Касьянов А.О., Обуховец В.А. Интеллектуальные радиоэлектронные покрытия. Современное состояние и проблемы. Обзор // Антенны. – 2001. – № 4 (50). – С. 4-11.
7. Касьянов А.О., Обуховец В.А. Отражательные антенные решетки как микроволновые компоненты интеллектуальных покрытий // Антенны. – 2001. – № 4 (50). – С. 12-16.
8. Братчиков А.Н. СВЧ-устройства, излучатели и ФАР на основе новых метаматериалов и структур // Антенны. – 2009. – № 1 (140). – С. 1-71.
9. Zouhdi S., Couepon G.E., Fourier-Lamer A. Scattering from a periodic array of thin planar chiral structures – calculation and measurements // IEEE Transactions on antennas and propagation. – June 1999. – Vol. 47, No. 6. – P. 1061-1065.
10. Обуховец В.А., Касьянов А.О. Микрополосковые отражательные антенные решетки. Методы проектирования и численное моделирование. – М.: Радиотехника. 2006. – 240 с.
11. Касьянов А.О., Касьянова А.Н. Применение печатных отражательных решеток для создания микроволновых линз с улучшенными характеристиками // Антенны. – 2018. – № 8. – С. 17-23.
12. Касьянов А.О. Твист-поляризаторы на основе микрополосковых дифракционных решеток // Антенны. – 2002. – Вып. 5 (60). – С. 34-39.

13. *Касьянов А.О., Саплин П.П.* Свернутая линзовая антенна ММВ-диапазона на основе широкополосных микрополосковых ОАР // Научно-технический сборник «Общие вопросы радиоэлектроники». – Ростов-на-Дону: Изд-во ФГУП «РНИИРС», 2012. – С. 13-18.
14. *Касьянов А.О., Обуховец В.А.* Управление токами в микрополосковой антенной решетке с нагруженными элементами // Радиотехника. – 1995. – № 12. – С. 32-36.
15. *Касьянов А.О.* Частотно-избирательные поверхности. Методы проектирования и области применения: монография. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – 150 с.
16. *Касьянов А.О., Обуховец В.А., Заковоротный С.И.* Расширение функций плоского фазо-корректирующего рефлектора при включении импедансных нагрузок // Радиотехника. – 2006. – № 2. – С. 60-64.
17. *Kasyanov A.O.* Modeling of the Microstrip-Stubs Reflectarrays with the Digital Control of Scattering Characteristics at Microwaves // Proc. of the 28th ESA Antenna Workshop on Space Antenna Systems and Technologies, 31 May – 3 June 2005, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands. – P. 467-474.
18. *Касьянов А.О., Обуховец В.А., Китайский М.С.* Математическая модель микрополосковой отражательной антенной решетки комбинированных излучателей // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2009. – Т. 14, № 5. – С. 56-65.
19. *Касьянов А.О. и др.* Разработка и применение композитных материалов с требуемыми свойствами: монография / под ред. М.Ю. Звездиной. – Новосибирск: Изд. АНС «СибАК», 2016. – 198 с.
20. *Касьянов А.О., Мушников В.В., Обуховец В.А.* Характеристики направленности конечных многоэлементных плоских микрополосковых отражательных антенных решеток // Радиотехника. – 2008. – № 11. – С. 64-72.
21. *Касьянов А.О., Обуховец В.А., Загоревский В.И.* Численное моделирование микрополосковой фазированной антенной решетки // Научно-технический журнал НТОРЭС А.С. Попова «Радиотехника». – 2002. – № 12. – С. 57-64.
22. *Касьянов А.О.* Двухзеркальная антенна Кассегрена на основе решеток печатных элементов // Антенны. – 2003. – Вып. 6 (73). – С. 17-22.
23. *Касьянов А.О., Обуховец В.А.* Частотно-избирательные поверхности. Основные области применения // Антенны. – 2005. – Вып. 9 (100). – С. 4-12.
24. *Касьянов А.О., Обуховец В.А.* Электродинамическое моделирование и конструктивный синтез планарных частотно-избирательных поверхностей // Антенны. – 2008. – № 11. – С. 24-32.
25. *Обуховец В.А., Касьянов А.О., Загоревский В.И.* Анализ частотно-селективных структур с элементами сложной формы // 11<sup>th</sup> International Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2001), 10-14 Sept. Sevastopol, Crimea, Ukraine, 2001. – P. 368-370.
26. *Хитров Ю.А.* Коммутируемая микрополосковая антенна // Научно-технический журнал НТОРЭС А.С. Попова «Радиотехника». – 1992. – № 3. – С. 62-65.
27. *Guo Y.J., Barton S.K.* Phase Correcting Zonal Reflector Incorporating Rings // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1995. – Vol. AP-43, No. 4. – P. 350-355.
28. *Обуховец В.А.* Проблемы конструктивного синтеза отражательных антенных решеток // Антенны. – 1997. – Вып. 2 (39). – С. 17-24.
29. *Касьянов А.О., Обуховец В.А.* Частотно-избирательные поверхности и поляризационные модуляторы на основе микрополосковых дифракционных решеток // Матер. 8-й международной крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», 14-17 сентября 1998, Севастополь. Т. 2. – С. 451-453.
30. *Касьянов А.О.* Характеристики рассеяния микрополосковых отражательных антенных решеток с импедансными включениями // Антенны. – 2002. – Вып. 4 (59). – С. 23-28.
31. *Касьянов А.О., Обуховец В.А., Загоревский В.И., Мельников С.Ю.* Комплекс программ по проектированию отражательных антенных решеток // Программные продукты и системы. – 2002. – Вып. 1. – С. 9-12.
32. *Касьянов А.О.* Численное исследование частотно-избирательных поверхностей с фрактальными элементами // Антенны. – 2005. – Вып. 9 (100). – С. 13-19.
33. *Касьянов А.О., Обуховец В.А.* Результаты численного моделирования микрополосково-штыревой отражательной антенной решетки // Антенны. – 2003. – Вып. 6 (73). – С. 4-9.
34. *Касьянов А.О., Китайский М.С.* Результаты численного исследования плоской ретенной решетки печатных комбинированных элементов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 1 (102). – С. 204-208.

35. Касьянов А.О. Численное исследование частотно-избирательных поверхностей с фрактальными элементами // Антенны. – 2005. – № 9. – С. 13-19.
36. Касьянов А.О. Волноводное моделирование частотно-селективных структур на основе микрополосковых дифракционных решеток // Межведомственный сборник научных статей «Рассеяние электромагнитных волн». – 2003. – Вып. 12. – С. 121-127.
37. Касьянов А.О. Численное исследование металлodieлектрических частотно-избирательных решеток с печатными и апертурными элементами // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2010. – Т. 15, № 5. – С. 47-55.
38. Kasyanov A.O. The radiating properties of spiraphase reflector based on microstrip array // Proceeding of International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'99), Sevastopol, 1999. – P. 328-330.
39. Касьянов А.О. Анализ микрополосковой фазированной антенной решетки // Наукові Вісті. – 2001. – № 4 (18). – С. 25-33.
40. Kump D.G., Himdi M., Rudberg A. Design of an unequally spaced reflectarray // IEEE Antennas and wireless propagation letters. – 2000. – Vol. 2.
41. Касьянов А.О., Обуховец В.А. Рассеяние волн периодической решеткой с пассивными нагрузками // Сб. "Рассеяние электромагнитных волн". – Таганрог: ТРТИ, 1987. – Вып. 6. – С. 19-25.
42. Касьянов А.О. Апертурные антенны в печатном исполнении. Методы проектирования и области применения. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2021. – 203 с.
43. Касьянов А.О., Обуховец В.А. Конструктивный синтез зеркальной антенны с рефлектором в виде плоской решетки печатных излучателей // Антенны. – 1999. – Вып. 2 (43). – С. 10-17.
44. Касьянов А.О. Двухзеркальная антенна Кассегрена на основе решеток печатных элементов. // Антенны. – 2003. – Вып. 6 (73). – С. 17-22.
45. Касьянов А.О. Конструктивный синтез печатного фазокорректирующего твист-рефлектора с улучшенными характеристиками. // Радиотехника. – 2011. – № 9. – С. 30-38.
46. Касьянов А.О., Саплин П.П., Суматохин К.В. Разработка высокотехнологичной свернутой зеркальной антенны на основе дифракционных решеток печатных элементов // Антенны. – 2012. – Вып. 9 (184). – С. 90-96.
47. Касьянов А.О. Апертурные антенны в печатном исполнении. Методы проектирования и области применения. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2021. – 203 с.
48. Rubin V.J., Bertoni H.L. Reflection from a periodically perforated plane using a subsectional current approximation // IEEE Trans. – 1983. – Vol. AP-31, No. 6. – P. 829-836.
49. Касьянов А.О., Обуховец В.А., Суматохин К.В. Управляемые твист-рефлекторы на основе реконфигурируемых микрополосковых решеток // Антенны. – 2013. – Вып. 10 (197). – С. 29-36.
50. Касьянов А.О., Суматохин К.В., Ильин И.В. Реконфигурируемый микроволновый модуль цифрового управляемого радиоэлектронного покрытия с пространственно-временной адресацией на основе микрополосковой отражательной антенной решетки // Успехи современной радиоэлектроники. – 2013. – № 8. – С. 101-109.
51. Касьянов А.О. Численное исследование металлodieлектрических частотно-избирательных решеток с печатными и апертурными элементами // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2010. – Т. 15, № 5. – С. 47-55.
52. Обуховец В.А., Касьянов А.О. Потенциальные возможности и области применения полосковых решеток // Антенны. – 2011. – № 6 (169). – С. 3-15.
53. Kasyanov A.O. The polarizing properties of periodic printed reflectarrays from the elements of the complicated shape // Proceedings ESA WPP-185 24-th ESTEC Antenna Workshop on Innovative Periodic Antennas: Photonic Bandgap, Fractal and Frequency Selective Structures, 30 May - 1 June 2001, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands.
54. Чулков В.И. Математическое моделирование многослойных поляризаторов на меандровых линиях // Радиотехника. – 1994. – № 9. – С. 71-75.
55. Касьянов А.О., Обуховец В.А. Расчет и экспериментальное исследование многофункционального обтекателя судовой антенны // Научно-технический журнал НТОРЭС им. А.С. Попова «Радиотехника». – 2004. – № 4. – С. 51-56.
56. Касьянов А.О., Обуховец В.А. Разработка микрополосковых отражательных антенных решеток для фокусировки и поляризационной фильтрации на СВЧ // Успехи современной радиоэлектроники. – 2006. – № 4. – С. 27-33.
57. Обуховец В.А., Касьянов А.О., Загоровский В.И. Электродинамический анализ многослойных микрополосковых отражательных антенных решеток // Антенны. – 2002. – Вып. 4 (59). – С. 4-11.

REFERENCES

1. *Lobov G.D.* Ustroystva pervichnoy obrabotki mikrovolnovykh signalov: Fizicheskie printsipy. Analiz i sintez. Primeneniya [Devices for primary processing of microwave signals: Physical principles. Analysis and synthesis. Applications]. Moscow: Izd-vo MEI, 1990, 255 p.
2. *Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A.* Raschet i eksperimental'noe issledovanie mnogofunktsional'nogo obtekatel'ya sudovoy anteny [Calculation and experimental study of a multifunctional fairing of a ship antenna], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2004, No. 4, pp. 51-56.
3. *Kas'yanov A.O.* Chastotno-izbiratel'nyy antennoy obtekatel' na osnove metallodielektricheskikh difraktsionnykh reshetok i perforirovannykh ekranov [Frequency-selective antenna fairing based on metal-dielectric diffraction gratings and perforated screens], *Antenny* [Antennas], 2021, No. 3, pp. 39-49.
4. *Kas'yanov A.O.* Antennoy obtekatel' s uglovoy fil'tratsiey na osnove metallodielektricheskikh difraktsionnykh reshetok [Antenna fairing with angular filtration based on metal-dielectric diffraction gratings], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2021, Vol. 85, No. 7, pp. 70-79.
5. *Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A.* Prostranstvennye polyarizatsionnye fil'try, preobrazovately i manipulyatory na osnove mikropoloskovykh difraktsionnykh reshetok [Spatial polarization filters, converters and manipulators based on microstrip diffraction gratings], *Antenny* [Antennas], 2011, No. 7, pp. 43-51.
6. *Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A.* Intellektual'nye radioelektronnye pokrytiya. Sovremennoe sostoyanie i problemy. Obzor [Intelligent electronic coatings. Current state and problems. Overview], *Antenny* [Antennas], 2001, No. 4 (50), pp. 4-11.
7. *Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A.* Otrazhatel'nye antennoye reshetki kak mikrovolnovye komponenty intellektual'nykh pokrytiy [Reflective antenna arrays as microwave components of intelligent coatings], *Antenny* [Antennas], 2001, No. 4 (50), pp. 12-16.
8. *Bratchikov A.N.* SVCh-ustroystva, izluchately i FAR na osnove novykh metamaterialov i struktur [Microwave devices, emitters and headlights based on new metamaterials and structures] *Antenny* [Antennas], 2009, No. 1 (140), pp. 1-71.
9. *Zouhdi S., Coueñon G.E., Fourier-Lamer A.* Scattering from a periodic array of thin planar chiral structures – calculation and measurements, *IEEE Transactions on antennas and propagation*, June 1999, Vol. 47, No. 6, pp. 1061-1065.
10. *Obukhovets V.A., Kas'yanov A.O.* Mikropoloskovye otrazhatel'nye antennoye reshetki. Metody proektirovaniya i chislennoe modelirovanie [Microstrip reflective antenna arrays. Design methods and numerical modeling]. Moscow: Radiotekhnika. 2006, 240 p.
11. *Kas'yanov A.O., Kas'yanova A.N.* Primenenie pechatnykh otrazhatel'nykh reshetok dlya sozdaniya mikrovolnovykh linz s uluchshennymi kharakteristikami [The use of printed reflective gratings to create microwave lenses with improved characteristics], *Antenny* [Antennas], 2018, No. 8, pp. 17 -23.
12. *Kas'yanov A.O.* Tvist-polyarizatory na osnove mikropoloskovykh difraktsionnykh reshetok [Twist polarizers based on microstrip diffraction gratings], *Antenny* [Antennas], 2002, Issue 5 (60), pp. 34-39.
13. *Kas'yanov A.O., Saplin P.P.* Svernutaya linzovaya antenna MMV-diapazona na osnove shiroko-polosnykh mikropoloskovykh OAR [Rolled-up lens antenna of the MMV-band based on broadband microstrip OAR], *Nauchno-tekhnicheskii sbornik «Obshchie voprosy radioelektroniki»* [Scientific and technical collection "General issues of radio electronics"]. Rostov-on-Don: Izd-vo FGUP «RNIIRS», 2012, pp. 13-18.
14. *Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A.* Upravlenie tokami v mikropoloskovoy antennoy reshetke s nagruzhennymi elementami [Control of currents in a microstrip antenna array with loaded elements], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 1995, No. 12, pp. 32-36.
15. *Kas'yanov A.O.* Chastotno-izbiratel'nye poverkhnosti. Metody proektirovaniya i oblasti primeneniya: monografiya [Frequency-selective surfaces. Design methods and applications: monograph]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2019, 150 p.
16. *Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A., Zakovorotnyy S.I.* Rasshirenie funktsiy ploskogo fazokorrektiruyushchego reflektora pri vkluchenii impedansnykh nagruzok [Expansion of the functions of a flat phase-correcting reflector when switching on impedance loads], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2006, No. 2, pp. 60-64.

17. *Kas'yanov A.O.* Modeling of the Microstrip-Stubs Reflectarrays with the Digital Control of Scattering Characteristics at Microwaves, *Proc. of the 28th ESA Antenna Workshop on Space Antenna Systems and Technologies, 31 May – 3 June 2005, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands*, pp. 467-474.
18. *Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A., Kitayskiy M.S.* Matematicheskaya model' mikro-poloskovoy otrazhatel'noy antennoy reshetki kombinirovannykh izluchateley [Mathematical model of a microstrip reflective antenna array of combined emitters], *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy* [Electromagnetic waves and electronic systems], 2009, Vol. 14, No. 5, pp. 56-65.
19. *Kas'yanov A.O. i dr.* Razrabotka i primeneniye kompozitnykh materialov s trebuemyimi svoystvami: monografiya [Development and application of composite materials with the required properties: monograph], ed. by M.Yu. Zvezdinoy. Novosibirsk: Izd. ANS «Si-bAK», 2016, 198 p.
20. *Kas'yanov A.O., Mushnikov V.V., Obukhovets V.A.* Kharakteristiki napravlenosti konechnykh mnogoelementnykh ploskikh mikropoloskovykh otrazhatel'nykh antennoykh reshetok [Directional characteristics of finite multi-element flat microstrip reflective antenna arrays], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2008, No. 11, pp. 64-72.
21. *Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A., Zagorovskiy V.I.* Chislennoe modelirovaniye mikropoloskovoy fazirovannoy antennoy reshetki [Numerical modeling of a microstrip phased antenna array], *Nauchno-tekhnicheskii zhurnal NTORES A.S. Popova «Radiotekhnika»* [Scientific and technical journal of NTORES A.S. Popov "Radio Engineering"], 2002, No. 12, pp. 57-64.
22. *Kas'yanov A.O.* Dvukhzerkal'naya antenna Kassegrana na osnove reshetok pechatnykh elementov [A two-mirror Cassegrain antenna based on arrays of printed elements ], *Antenny* [Antennas], 2003, Issue 6 (73), pp. 17-22.
23. *Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A.* Chastotno-izbiratel'nye poverkhnosti. Osnovnyye oblasti primeneniya [Frequency-selective surfaces. Main application areas], *Antenny* [Antennas], 2005, Issue 9 (100), pp. 4-12.
24. *Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A.* Elektrodinamicheskoye modelirovaniye i konstruktivnyy sintez planarnykh chastotno-izbiratel'nykh poverkhnostey [Electrodynamical modeling and constructive synthesis of planar frequency-selective surfaces], *Antenny* [Antennas], 2008, No. 11, pp. 24-32.
25. *Obukhovets V.A., Kas'yanov A.O., Zagorovskiy V.I.* Analiz chastotno-selektivnykh struktur s elementami slozhnoy formy [Analysis of frequency-selective structures with elements of complex shape], *11th International Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2001), 10-14 Sept. Sevastopol, Crimea, Ukraine, 2001*, pp. 368-370.
26. *Khitrov Yu.A.* Kommutiruemaya mikropoloskovaya antenna [Switched microstrip antenna], *Nauchno-tekhnicheskii zhurnal NTORES A.S. Popova «Radiotekhnika»* [Scientific and technical journal of NTORES A.S. Popov "Radio Engineering"], 1992, No. 3, pp. 62-65.
27. *Guo Y.J., Barton S.K.* Phase Correcting Zonal Reflector Incorporating Rings, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1995, Vol. AP-43, No. 4, pp. 350-355.
28. *Obukhovets V.A.* Problemy konstruktivnogo sinteza otrazhatel'nykh antennoykh reshetok [Problems of constructive synthesis of reflective antenna arrays], *Antenny* [Antennas], 1997, Issue 2 (39), pp. 17-24.
29. *Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A.* Chastotno-izbiratel'nye poverkhnosti i polarizatsionnye modulyatory na osnove mikropoloskovykh difraktsionnykh reshetok [Frequency-selective surfaces and polarization modulators based on microstrip diffraction gratings], *Mater. 8-y mezhdunarodnoy krymskoy konferentsii «SVCh-tekhnika i telekommunikatsionnye tekhnologii», 14-17 sentyabrya 1998, Sevastopol'* [Proceedings of the 8th International Crimean Conference "Microwave technology and telecommunication technologies", September 14-17, 1998, Sevastopol']. Vol. 2, pp. 451-453.
30. *Kas'yanov A.O.* Kharakteristiki rasseyaniya mikropoloskovykh otrazhatel'nykh antennoykh reshetok s impedansnymi vklyucheniymi [Scattering characteristics of microstrip reflective antenna arrays with impedance inclusions], *Antenny* [Antennas], 2002, Issue 4 (59), pp. 23-28.
31. *Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A., Zagorovskiy V.I., Mel'nikov S.Yu.* Kompleks programm po proektirovaniyu otrazhatel'nykh antennoykh reshetok [A set of programs for the design of reflective antenna arrays], *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems], 2002, Issue 1, pp. 9-12.

32. Kas'yanov A.O. Chislennoe issledovanie chastotno-izbiratel'nykh poverkhnostey s fraktal'nymi elementami [Numerical study of frequency-selective surfaces with fractal elements], *Antenny* [Antennas], 2005, Issue 9 (100), pp. 13-19.
33. Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Rezul'taty chislenного modelirovaniya mikropoloskovy-shtyrevoy otrazhatel'noy antennoy reshetki [Results of numerical simulation of a microstrip-pin reflective antenna array], *Antenny* [Antennas], 2003, Issue 6 (73), pp. 4-9.
34. Kas'yanov A.O., Kitayskiy M.S. Rezul'taty chislenного issledovaniya ploskoy rektennoy reshetki pechatnykh kombinirovannykh elementov [Results of a numerical study of a flat rectal lattice of printed combined elements], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 1 (102), pp. 204-208.
35. Kas'yanov A.O. Chislennoe issledovanie chastotno-izbiratel'nykh poverkhnostey s fraktal'nymi elementami [Numerical study of frequency-selective surfaces with fractal elements], *Antenny* [Antennas], 2005, No. 9, pp. 13-19.
36. Kas'yanov A.O. Volnovodnoe modelirovanie chastotno-selektivnykh struktur na osnove mikropoloskovykh difraktsionnykh reshetok [Waveguide modeling of frequency-selective structures based on microstrip diffraction gratings], *Mezhdovedomstvennyy sbornik nauchnykh statey «Rasseyaniye elektromagnitnykh voln»* [Interdepartmental collection of scientific articles "Scattering of electromagnetic waves"], 2003, Issue 12, pp. 121-127.
37. Kas'yanov A.O. Chislennoe issledovanie metallodielektricheskikh chastotno-izbiratel'nykh reshetok s pechatnymi i aperturnymi elementami [Numerical study of metal-dielectric frequency-selective gratings with printed and aperture elements], *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy* [Electromagnetic waves and electronic systems], 2010, Vol. 15, No. 5, pp. 47-55.
38. Kas'yanov A.O. The radiating properties of spiraphase reflector based on microstrip array, *Proceeding of International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'99), Sevastopol, 1999*, pp. 328-330.
39. Kas'yanov A.O. Analiz mikropoloskovoy fazirovannoy antennoy reshetki [Analysis of microstrip phased array antenna array], *Naukovi Visti* [Scientific News], 2001, No. 4 (18), pp. 25-33.
40. Kump D.G., Himdi M., Rudberg A. Design of an unequally spaced reflectarray, *IEEE Antennas and wireless propagation letters*, 2000, Vol. 2.
41. Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Rasseyaniye voln periodicheskoy reshetkoy s passivnymi nagruzkami [Scattering of waves by a periodic lattice with passive loads], *Sb. "Rasseyaniye elektromagnitnykh voln"* [Collection "Scattering of electromagnetic waves"]. Taganrog: TRTI, 1987, Issue 6, pp. 19-25.
42. Kas'yanov A.O. Aperturnye anteny v pechatnom ispolnenii. Metody proektirovaniya i oblasti primeneniya [Aperture antennas in printed form. Design methods and applications]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2021, 203 p.
43. Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Konstruktivnyy sintez zerkal'noy antennoy s reflektorom v vide ploskoy reshetki pechatnykh izluchateley [Constructive synthesis of a mirror antenna with a reflector in the form of a flat array of printed emitters], *Antenny* [Antennas], 1999, Issue 2 (43), pp. 10-17.
44. Kas'yanov A.O. Dvukhzerkal'naya antenna Kassegrana na osnove reshetok pechatnykh elementov [A two-mirror Cassegrain antenna based on arrays of printed elements], *Antenny* [Antennas], 2003, Issue 6 (73), pp. 17-22.
45. Kas'yanov A.O. Konstruktivnyy sintez pechatnogo fazokorrektiruyushchego tvist-reflektora s uluchshennymi kharakteristikami [Constructive synthesis of a printed phase-correcting twist reflector with improved characteristics], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2011, No. 9, pp. 30-38.
46. Kas'yanov A.O., Saplin P.P., Sumatokhin K.V. Razrabotka vysokotekhnologichnoy svernutoy zerkal'noy antennoy na osnove difraktsionnykh reshetok pechatnykh elementov [Development of a high-tech folded mirror antenna based on diffraction gratings of printed elements], *Antenny* [Antennas], 2012, Issue 9 (184), pp. 90-96.
47. Kas'yanov A.O. Aperturnye anteny v pechatnom ispolnenii. Metody proektirovaniya i oblasti primeneniya [Aperture antennas in printed form. Design methods and applications]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2021, 203 p.
48. Rubin B.J., Bertoni H.L. Reflection from a periodically perforated plane using a subsectional current approximation, *IEEE Trans.*, 1983, Vol. AP-31, No. 6, pp. 829-836.

49. Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Sumatokhin K.V. Upravlyaemye tvist-reflektory na osnove rekonfiguriruemyykh mikropoloskovyykh reshetok [Controlled twist reflectors based on reconfigurable microstrip arrays], *Antenny* [Antennas], 2013, Issue 10 (197), pp. 29-36.
50. Kas'yanov A.O., Sumatokhin K.V., Il'in I.V. Rekonfiguriruemyy mikrovolnovyy modul' tsifrovogo upravlyаемого radioelektronnogo pokrytiya s prostranstvenno-vremennoy adresatsiey na osnove mikropoloskovoy otrazhatel'noy antennoy reshetki [Reconfigurable microwave module of a digital controlled radioelectronic coating with spatio-temporal addressing based on a microstrip reflective antenna array], *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki* [Successes of modern radio electronics], 2013, No. 8, pp. 101-109.
51. Kas'yanov A.O. Chislennoe issledovanie metallodielektricheskikh chastotno-izbiratel'nykh reshetok s pechatnymi i aperturnymi elementami [Numerical study of metal-dielectric frequency-selective gratings with printed and aperture elements], *Elektromagnitnye volny i elektronnyye sistemy* [Electromagnetic waves and electronic systems], 2010, Vol. 15, No. 5, pp. 47-55.
52. Obukhovets V.A., Kas'yanov A.O. Potentsial'nye vozmozhnosti i oblasti primeneniya poloskovyykh reshetok [Potential possibilities and applications of strip arrays], *Antenny* [Antennas], 2011, No. 6 (169), pp. 3-15.
53. Kasyanov A.O. The polarizing properties of periodic printed reflectarrays from the elements of the complicated shape, *Proceedings ESA WPP-185 24-th ESTEC Antenna Workshop on Innovative Periodic Antennas: Photonic Bandgap, Fractal and Frequency Selective Structures, 30 May - 1 June 2001, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands*.
54. Chulkov V.I. Matematicheskoe modelirovanie mnogosloynnykh polyarizatorov na meandrovyykh liniyakh [Mathematical modeling of multilayer polarizers on meander lines], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 1994, No. 9, pp. 71-75.
55. Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Raschet i eksperimental'noe issledovanie mnogofunktsional'nogo obtekatel'ya sudovoy anteny [Calculation and experimental study of a multifunctional fairing of a ship antenna], *Nauchno-tekhnicheskyy zhurnal NTORES im. A.S. Popova «Radiotekhnika»* [Scientific and technical journal of the A.S. Popov NTORES "Radio Engineering"], 2004, No. 4, pp. 51-56.
56. Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Razrabotka mikropoloskovyykh otrazhatel'nykh antennoykh reshetok dlya fokusirovki i polyarizatsionnoy fil'tratsii na SVCh [Development of microstrip reflective antenna arrays for focusing and polarization filtering on microwave], *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki* [Successes of modern radio electronics], 2006, No. 4, pp. 27-33.
57. Obukhovets V.A., Kas'yanov A.O., Zagorovskiy V.I. Elektrodinamicheskyy analiz mnogosloynnykh mikropoloskovyykh otrazhatel'nykh antennoykh reshetok [Electrodynamic analysis of multilayer microstrip reflective antenna arrays], *Antenny* [Antennas], 2002, Issue 4 (59), pp. 4-11.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Д.Д. Габриэлян.

**Касьянов Александр Олегович** – Южный федеральный университет; e-mail: kasyanovao@sfedu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем; д.т.н.; профессор.

**Kasyanov Alexander Olegovich** – Southern Federal University; e-mail: kasyanovao@sfedu.ru; Rostov-on-Don, Russia; the department of radio engineering and telecommunication systems; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 658.512.2.011.5

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-60-74

**В.В. Лисяк**

## **ОБЗОР СЛАЙСЕРОВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ**

*Представлен обзор программного обеспечения (ПО) для подготовки трёхмерных моделей (3D-моделей) объектов различного назначения к передаче на 3D-принтер для печати. Отмечается, что в последнее время 3D-печать является неотъемлемой частью аддитивного производственного процесса. Указывается, что для выполнения процесса 3D-печати, созданные или загруженные 3D-модели, хранящиеся в STL-файлах, должны быть транслированы в язык управления принтером. Такой язык называется G-кодом, а программы, позволяющие его получить, называются слайсерами. Отмечается, что основной функцией*