



А. О. Касьянов

**Микроволновые устройства
пространственной, частотной
и поляризационной селекции
и трансформации на основе
печатных антенных решеток.**

**Методы проектирования
и области применения**



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕСИТЕТ»

Инженерно-технологическая академия

А. О. КАСЬЯНОВ

**МИКРОВОЛНОВЫЕ УСТРОЙСТВА
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ, ЧАСТОТНОЙ
И ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ СЕЛЕКЦИИ
И ТРАНСФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ
ПЕЧАТНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК.
МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ**

Монография

Ростов-на-Дону – Таганрог
Издательство Южного федерального университета
2021

УДК 621.396.67

ББК 32.845

K289

*Выписка из протокола заседания экспертного совета
«Инженерные науки» № 6 от 27 апреля 2021 г.*

Рецензенты:

профессор кафедры информатики и информационных таможенных технологий Ростовского филиала Российской таможенной академии,
доктор технических наук, доцент *П. Н. Башлы*

профессор кафедры радиоэлектроники Донского государственного технического университета, доктор физико-математических наук, доцент
М. Ю. Звездина

Касьянов, А. О.

K289 Микроволновые устройства пространственной, частотной и поляризационной селекции и трансформации на основе печатных антенных решеток. Методы проектирования и области применения : монография / А. О. Касьянов ; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2021. – 308 с.

ISBN 978-5-9275-3976-5

DOI 10.18522/801287532

Работа посвящена вопросам проектирования и применения печатных антенных решеток отражательного и проходного типа. Представлен электродинамический анализ и построены математические модели многоэлементных антенных решеток в интегральном исполнении. Рассмотрены этапы построения микроволновых устройств пространственной, частотной и поляризационной селекции и трансформации, конструктивно реализованных в виде многоэлементных дифракционных решеток в печатном исполнении. Разработаны методики проектирования таких устройств на основе их электродинамического анализа и последующего конструктивного синтеза. Рассмотрена возможность применения таких устройств в качестве микроволновых компонентов интеллектуальных радиоэлектронных покрытий. Проведен анализ современного состояния и тенденций дальнейшего развития микроволновых устройств пространственной, частотной и поляризационной селекции и трансформации на основе печатных антенных решеток. Исследованы электродинамические характеристики этих решеток и даны рекомендации для их автоматизированного проектирования.

Работа представляет интерес для инженеров, научных работников, аспирантов и магистрантов.

УДК 621.396.67

ББК 32.845

ISBN 978-5-9275-3976-5

© Южный федеральный университет, 2021

© Касьянов А. О., 2021

© Оформление. Макет. Издательство

Южного федерального университета, 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	12
1. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСТРОЙСТВ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ СЕЛЕКЦИИ И ТРАНСФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ПЕЧАТНЫХ РЕШЕТОК	18
1.1. Пространственные поляризационные фильтры, преобразо- ватели и манипуляторы на основе микрополосковых дифракци- онных решеток	18
1.1.1. Применение микрополосковых отражательных антен- ных решеток для создания устройства поляризационной се- лекции и трансформации	18
1.1.2. Твист-рефлекторы	19
1.1.3. Отражательные поляризаторы	23
1.2. Численное и экспериментальное исследование устройств поляризационной селекции, выполненных в виде периодических решеток печатных элементов	28
1.2.1. Многофункциональный обтекатель антенны судовой радионавигационной станции	28
1.2.2. Методики расчета многофункционального обтекателя антенны судовой радионавигационной станции	33
1.2.3. Расчет и экспериментальное исследование многофунк- ционального обтекателя антенны судовой радионавигацион- ной станции	42
1.2.4. Поляризационные фильтры на основе плоских решеток печатных вибраторов	55
1.3. Численное и экспериментальное исследование твист-поля- ризаторов на основе многоэлементных микрополосковых антен- ных решеток отражательного типа	60
1.3.1. Твист-поляризатор на основе многоэлементной микро- полосковой отражательной антенной решетки и его элек- тродинамическая модель	60

1.3.2. Результаты численного и экспериментального моделирования твист-поляризаторов на основе микрополосковых дифракционных решеток	62
1.4. Поляризационно-активные устройства отражательного и проходного типа на основе микрополосковых дифракционных решеток с элементами сложной формы	80
1.4.1. Отражательные и проходные дифракционные решетки, составленные из TFH-печатных переизлучателей	81
1.4.2. Поляризационно-активные устройства отражательного и проходного типа на основе микрополосковых дифракционных решеток с S- и Z-образными элементами	95
1.5. Выводы	98
2. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСТРОЙСТВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ И ЧАСТОТНОЙ СЕЛЕКЦИИ НА ОСНОВЕ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ПЕЧАТНЫХ РЕШЕТОК	100
2.1. Металлодиэлектрические частотно-избирательные поверхности	100
2.1.1. Постановка задачи	100
2.1.2. Система интегральных уравнений задачи	102
2.1.3. Алгебраизация системы ИУ	105
2.1.4. Численные результаты	109
2.2. Частотно-избирательный антенный обтекатель на основе металлодиэлектрических дифракционных решеток и перфорированных экранов	115
2.2.1. Применение селективных антенных обтекателей для обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств	115
2.2.2. Математическое моделирование	116
2.2.3. Постановка задачи конструктивного синтеза частотно-избирательного антенного обтекателя	117
2.2.4. Результаты численного исследования характеристик рассеяния 1-го варианта конструктивной реализации металлодиэлектрического антенного обтекателя	117

2.2.5. Результаты численного исследования характеристик рассеяния 2-го варианта конструктивной реализации металлodieлектрического антенного обтекателя	125
2.2.6. Результаты численного исследования характеристик рассеяния 3-го варианта конструктивной реализации антенного обтекателя в виде толстого перфорированного экрана волноводного типа	126
2.3. Антенный обтекатель с угловой фильтрацией на основе металлodieлектрических дифракционных решеток	128
2.3.1. Антенные обтекатели с угловой селекцией для разреженных антенных решеток перспективных радиотехнических комплексов	128
2.3.2. Применение металлodieлектрических частотно-избирательных поверхностей в качестве угловых фильтров	129
2.3.3. Постановка задачи конструктивного синтеза пространственно-избирательного антенного обтекателя	130
2.3.4. Результаты численного исследования характеристик направленности АР с металлodieлектрическим антенным обтекателем	135
2.3.5. Результаты численного исследования антенной решетки с металлodieлектрическим антенным обтекателем в диапазоне частот	136
2.4. Выводы	140
3. УПРАВЛЕНИЕ РАССЕЯНИЕМ ВОЛН С ПОМОЩЬЮ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ПЕЧАТНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК ОТРАЖАТЕЛЬНОГО ТИПА	142
3.1. Управляемые твист-рефлекторы на основе плоских реконфигурируемых печатных дифракционных решеток	142
3.1.1. Постановка задачи	143
3.1.2. Математическая модель	144
3.1.3. Управляемые твист-рефлекторы на основе печатных решеток с поверхностно-ориентированными управляющими элементами переключательного типа	144
3.2. Управляемые фазокорректирующие и твист-рефлекторы на основе печатных ОАР	157

3.2.1. Фазокорректирующий твист-рефлектор	157
3.2.2. Сканирующий фазокорректирующий рефлектор	162
3.3. Поляризационные манипуляторы	163
3.4. Цифровое управляемое радиоэлектронное покрытие с пространственно-временной адресацией на основе микрополосковой отражательной антенной решетки	170
3.4.1. Реконфигурируемый микроволновый модуль цифрового управляемого радиоэлектронного покрытия	170
3.4.2. Структурная организация управляемого радиоэлектронного покрытия	171
3.4.3. Математическая модель интегрального микроволнового модуля управляемого радиоэлектронного покрытия в виде отражательной антенной решетки	172
3.4.4. Экспериментальное исследование управляемых модулей печатных ОАР методом волноводного моделирования	175
3.4.5. Управляемая микрополосковая отражательная решетка с цифровым формированием характеристик рассеяния	178
3.5. Выводы	184
4. МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ФАЗИРОВАННЫЕ И ОТРАЖАТЕЛЬНЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ КАК МИКРОВОЛНОВЫЕ КОМПОНЕНТЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ПОКРЫТИЙ	185
4.1. Интеллектуальные радиоэлектронные покрытия. Современное состояние и проблемы	185
4.1.1. Актуальность задачи исследования интеллектуальных покрытий	185
4.1.2. Структурная организация интеллектуального радиоэлектронного покрытия	186
4.1.3. Подсистема управления рассеянием волн и антенная подсистема интеллектуального покрытия	186
4.2. Управление полями рассеяния отражательных антенных решеток	188
4.2.1. Расширение функциональных возможностей антенных систем за счет управления полями рассеяния отражательных решеток	188

4.2.2. Исследование возможности создания сканирующей зеркальной антенны с рефлектором в виде плоской решетки управляемых печатных излучателей	189
4.3. Численное и экспериментальное исследование возможности применения микрополосковых ОАР как СВЧ- и КВЧ-компонентов интеллектуальных покрытий	192
4.3.1. Результаты численного моделирования реконфигурируемых ОАР как устройств пространственной, частотной и поляризационной селекции в составе интеллектуального радиоэлектронного покрытия	192
4.3.2. Волноводное моделирование управляемых частотно-избирательных поверхностей и отражательных антенных решеток в печатном исполнении	209
4.3.3. Результаты натурных испытаний реконфигурируемых микрополосковых ОАР	219
4.4. Электродинамические модели и численное исследование микрополосковых отражательных антенных решеток с импедансными включениями	224
4.4.1. Математическая модель микрополосковой отражательной антенной решетки с импедансными включениями	224
4.4.2. Результаты численного исследования микрополосковых отражательных антенных решеток с импедансными включениями	227
4.5. Выводы	236
5. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ МИКРОВОЛНОВЫХ УСТРОЙСТВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ, ЧАСТОТНОЙ И ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ СЕЛЕКЦИИ И ТРАНСФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ПЕЧАТНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЁТОК	239
5.1. Потенциальные возможности и области применения микрополосковых решеток	239
5.1.1. Отражательные антенные решетки и ФАР проходного типа в печатном исполнении	239
5.1.2. Зеркальные антенны с плоскими рефлекторами на основе микрополосковых отражательных антенных решеток	241

5.1.3. ФАР проходного типа с оптической схемой питания на основе печатных решеток	248
5.1.4. Углочастотная селекция с помощью многоэлементных печатных решеток	152
5.1.5. Полосковые антенные решетки с управляемыми элементами	254
5.1.6. Возможность построения СВЧ-модулей интеллектуальных радиоэлектронных покрытий на основе решеток печатных элементов	255
5.2. Преобразование поляризации электромагнитных волн с помощью печатных дифракционных решеток в микроволновом диапазоне	256
5.2.1. Устройства поляризационной селекции и трансформации на основе печатных дифракционных решеток	256
5.2.2. Примеры применения результатов математического моделирования к созданию поляризационно-чувствительных микрополосковых дифракционных решеток	257
5.3. Выводы	276
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	278
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	282