

УДК 621. 396. 67
ББК 32. 845
К289

Печатается по решению экспертной группы комитета по инженерному направлению науки и образования при ученом совете Южного федерального университета (протокол №11 от 28 октября 2017 г.)

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, доцент, заведующая кафедрой радиоэлектроники Донского государственного технического университета *М. Ю. Звездина*

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой радиопизики Южного федерального университета *Г. Ф. Заргано*

Касьянов, А. О.

К289

Электродинамический анализ и разработка САПР-ориентированных математических моделей печатных антенных решеток : монография / А. О. Касьянов, А. Н. Касьянова ; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2017. – 300 с.

ISBN 978-5-9275-2671-0

Работа посвящена вопросам проектирования и применения печатных фазированных и отражательных антенных решеток. Представлен электродинамический анализ и построены САПР-ориентированные математические модели многоэлементных антенных решеток в интегральном исполнении. Рассмотрены этапы построения математических моделей электродинамического уровня для широкого класса полосковых и микрополосковых фазированных и отражательных антенных решеток на основе открытых печатных электродинамических структур. Разработаны методики электродинамического учета влияния фидерной системы на характеристики излучения и согласования печатных фазированных антенных решеток, а также конструктивных элементов управляющих СВЧ-устройств на характеристики рассеяния печатных отражательных антенных решеток, как микроволновых компонентов интеллектуальных покрытий. Описан комплекс вычислительных программ автоматизированного проектирования отражательных и фазированных антенных решеток в печатном исполнении. Исследованы электродинамические характеристики этих решеток и даны рекомендации для их автоматизированного проектирования. Монография представляет интерес для инженеров, научных работников, аспирантов и магистрантов.

УДК 621. 396. 67
ББК 32. 845

ISBN 978-5-9275-2671-0

© Южный федеральный университет, 2017
© Касьянов А. О., Касьянова А. Н., 2017
© Оформление. Макет. Издательство
Южного федерального университета, 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	11
1. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ПЕЧАТНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ	21
1.1. Методы анализа и компьютерного моделирования однослойных микрополосковых антенных решеток	21
1.2. Методы электродинамического моделирования и перспективы применения многослойных мультипланарных микрополосковых антенных решеток	29
Выводы	44
2. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК С ИМПЕДАНСНЫМИ НАГРУЗКАМИ В ВИДЕ ШТЫРЕЙ	46
2.1. Математическая модель однослойной микрополосковой отражательной антенной решетки с импедансными штырями	46
2.1.1. Постановка задачи	46
2.1.2. Формулировка интегральных уравнений при построении математической модели микрополосковой отражательной антенной решетки	48
2.1.3. Определение напряженностей полей вспомогательных источников	52
2.1.4. Применение условия периодичности печатных элементов в решетке	57
2.1.5. Интегральное уравнение для микрополосковой решетки с импедансными штырями	60
2.1.6. Решение вспомогательных задач для микрополосково-штыревой решетки	61
2.1.7. Применение условия периодичности импедансных штырей в решетке	61
2.1.8. Интегральное уравнение относительно тока на штырях	62
2.1.9. Система интегральных уравнений для микрополосковой решетки с импедансными штырями	65
2.2. Численная реализация решения системы интегральных уравнений	71

2.3. Электродинамическое моделирование многослойных мультипланарных микрополосковых решеток отражательного типа	77
2.3.1. Многослойные микрополосковые отражательные решетки	77
2.3.2. Применение метода обобщенных матриц рассеяния при электродинамическом моделировании многослойных печатных отражательных антенных решеток	78
2.4. Численное исследование математической модели микрополосково-штыревой отражательной антенной решетки	87
2.4.1. Определение элементов поляризационной матрицы рассеяния для микрополосковой отражательной антенной решетки	87
2.4.2. Численное исследование особенностей поведения токов микрополосковой отражательной антенной решетки	87
2.4.3. Численное моделирование микрополосковой отражательной антенной решетки с нагруженными элементами	96
2.4.4. Результаты численного исследования многослойных мультипланарных микрополосковых антенных решеток отражательного типа	116
Выводы	121
3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ, ВОЗБУЖДАЕМОЙ КОАКСИАЛЬНЫМИ ВОЛНОВОДАМИ	126
3.1. Математическая модель плоской микрополосковой фазированной антенной решетки, возбуждаемой коаксиальными волноводами	126
3.1.1. Постановка задачи	126
3.1.2. Векторное интегральное уравнение для полей в апертурах излучающей системы микрополосково-штыревой ФАР	129
3.1.3. Применение условия периодичности излучателей в микрополосковой сканирующей антенной решетке	134
3.1.4. Векторное интегральное уравнение для полей в раскрывах коаксиальных волноводов, возбуждающих излучатели печатной ФАР ...	138
3.1.5. Применение условия периодичности к фидерной системе микрополосковой ФАР	144
3.1.6. Векторное интегральное уравнение для полей во входных поперечных сечениях отрезков фидеров системы коаксиальных волноводов, возбуждающих ФАР	150

3.1.7. Интегральное уравнение для поля на поверхности внутреннего проводника в отрезке коаксиального волновода, возбуждающего печатный излучающий элемент центральной ячейки микрополосково-штыревой фазированной антенной решетки	152
3.1.8. Интегральное уравнение для поля на боковой поверхности, помещенного в подложку, внутреннего проводника коаксиального волновода, возбуждающего печатный излучатель центральной ячейки микрополосково-штыревой ФАР	156
3.1.9. Система интегральных уравнений для полей на боковых поверхностях импедансных штырей в магнитодиэлектрической подложке печатной ФАР	162
3.1.10. Представление математической модели микрополосково-штыревой ФАР в виде системы связанных ИУ	165
3.2. Численное моделирование микрополосковой ФАР	169
Выводы	175
4. ОТРАЖАТЕЛЬНАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА КОМБИНИРОВАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	177
4.1. Преимущества и конструктивные особенности отражательной антенной решетки, составленной из комбинированных печатных излучателей	177
4.2. Математическая модель отражательной решетки комбинированных излучателей	179
4.2.1. Постановка задачи	179
4.2.2. Векторное интегральное уравнение для напряженностей полей на апертурах излучающей системы печатной отражательной решетки комбинированных переизлучателей	180
4.2.3. Применение условия периодичности излучателей печатной отражательной решетки	186
4.2.4. Векторное интегральное уравнение для напряженностей полей на боковых сторонах подложек решетки из комбинированных излучателей	191
4.2.5. Представление математической модели печатной отражательной решетки с комбинированными элементами в виде системы ИУ	200
4.3. Результаты численного моделирования микрополосковых отражательных антенных решеток комбинированных излучателей	203
4.3.1. Конструктивные особенности комбинированного печатного переизлучателя микрополосково-штыревой отражательной решетки	203

4.3.2. Результаты численного моделирования	204
4.4. Моделирование микрополосковой ФАР на основе решения дифракционных задач	213
4.4.1. Эффект «ослепления» микрополосковой ФАР	213
4.4.2. Методики определения углов «ослепления» микрополосковых фазированных антенных решеток	213
4.4.3. Применение математической модели микрополосковой ОАР	215
4.4.4. Численные результаты	217
Выводы	222
5. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФАР КОМБИНИРОВАННЫХ ПЕЧАТНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ПОЛОСКОВЫМИ ВОЛНОВОДАМИ	225
5.1. Математическая модель ФАР комбинированных печатных излучателей, возбуждаемая полосковыми волноводами	225
5.1.1. Постановка задачи	225
5.1.2. Векторное интегральное уравнение для касательных составляющих напряженностей полей в апертурах излучающей системы печатной ФАР	229
5.1.3. Векторное интегральное уравнение для полей в раскрывах полосковых волноводов, возбуждающих микрополосковые излучатели антенной решетки	232
5.1.4. Векторное интегральное уравнение для полей во входных поперечных сечениях $z = -(\Delta + d)$ полосковых волноводов, возбуждающих ФАР комбинированных МПЭ	239
5.1.5. Векторное интегральное уравнение для полей на поверхностях S''_b в отрезках полосковых волноводов фидерной системы ФАР из комбинированных излучателей	242
5.1.6. Векторное интегральное уравнение для напряженностей полей на боковых сторонах подложек решетки продольных микрополосковых излучателей	246
5.1.7. Представление математической модели микрополосковой ФАР с комбинированными излучающими элементами в системы ИУ	249
5.2. Численное и экспериментальное исследование характеристик согласования излучателей фазированных решеток печатных вибраторов на опорных стойках	252

5.2.1. Результаты численного и экспериментального исследования характеристик согласования продольного печатного излучателя вибраторной ФАР	252
5.2.2 Характеристики согласования антенной решетки из продольных печатных вибраторов	256
5.3. Численное моделирование и экспериментальное исследование печатных ФАР из продольных широкополосных излучателей	261
5.3.1. Исследование характеристик согласования изолированного широкополосного ИЭ микрополосковой ФАР, выполненного на основе трехслойной антенны Вивальди	261
5.3.2. Численное моделирование характеристик излучения и согласования продольного печатного излучателя микрополосковой ФАР в виде трехслойной антенны Вивальди	265
5.3.3. Численное моделирование характеристик излучения и согласования широкополосного продольного печатного излучателя в виде пятислойной антенны Вивальди, находящегося в составе микрополосковой ФАР	271
5.3.4. Результаты экспериментального исследования характеристик согласования широкополосных излучателей ФАР на основе модифицированных антенн Вивальди	281
Выводы	283
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	286
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	291