

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ И
ЭЛЕКТРОНИКИ
им. В.А.КОТЕЛЬНИКОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН)

Моховая ул., д. 11, корп. 7, Москва, 125009
Тел. +7(495)629-35-74, факс +7(495)629-36-78
ire@cplire.ru, <http://www.cplire.ru>

11210-6215-523
15.10.2014

О Т З Ы В

**официального оппонента на диссертацию Скобелева С.П.
«Фазированные антенные решетки с секторными парциальными
диаграммами направленности», представленную к защите на
соискание ученой степени доктора физико-математических наук по
специальности 05.12.07 – антенны, СВЧ устройства и их технологии.**

Диссертация Скобелева С.П. посвящена исследованию и развитию теории ФАР, включая формулировку фундаментальных ограничений в них, разработке методов формирования перекрывающихся подрешеток с секторными и контурными ДН в излучающих структурах ФАР, а также разработке математических моделей для эффективного численного анализа и оптимизации структур с указанными подрешетками.

Предметом исследования являются математические и физические модели периодических излучающих структур с перекрывающимися подрешетками для формирования секторных и контурных диаграмм направленности.

Методы исследования – математический аппарат теории антенн и математической физики, включая методы интегральных уравнений, проекционные методы, метод конечных элементов, метод факторизации, методы численного решения систем линейных алгебраических уравнений, численные методы поиска экстремумов целевых функций, а также экспериментальные методы антенных измерений.

Предложенные и исследованные автором в диссертации физические структуры представляют как практический, так и теоретический интерес. Известно, что фазированные антенные решетки (ФАР) относятся к тому типу антенных устройств, которые способны обеспечивать наиболее широкие функциональные возможности радиосистем, используемых в радиолокации, связи и радиоастрономии.

Исследование теории ФАР может быть осуществлено с использованием адекватных математических моделей. Поэтому создание моделей, позволяющих проводить численный анализ и оптимизацию излучающих структур, способных формировать секторные и контурные парциальные ДН, также является **актуальной задачей**.

По постановке задач и методам их решения диссертация соответствует заявленной специальности: антенны, СВЧ устройства и их технологии.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Автором предложено определение идеальной контурной и секторной ДН элемента решетки, включая формулировку требований к области, занимаемой диаграммой в пространстве направляющих косинусов. Показано, что если указанная область полностью лежит в области видимости, то ДН различных элементов являются ортогональными. В рамках схемного метода предложена и исследована новая многокаскадная "шахматная" схема формирования перекрывающихся подрешеток с секторными ДН, имеющая определенные преимущества перед известными схемами. Предложены и исследованы ее квазиоптические аналоги, позволяющие формировать узкие секторные парциальные ДН в решетках крупноапертурных зеркальных или линзовых излучающих элементов.
2. Предложен новый подход к формированию секторных ДН элемента с использованием решеток двухмодовых волноводов с простыми щелевыми связями, позволяющими упростить конструкцию по сравнению с известным аналогом. Разработаны математические модели таких решеток, с использованием которых получены новые результаты по формированию

секторных ДН. Получены также новые экспериментальные результаты с использованием макета, спроектированного согласно теоретической модели. Рассмотрен и обоснован новый подход к формированию секторных ДН элемента на основе использования пассивных реактивно нагруженных излучателей в виде ребристых структур в раскрыве решетки, разработаны математические модели таких решеток и получены новые расчетные и экспериментальные результаты по формированию секторных ДН.

3. Разработаны новые эффективные гибридные проекционные методы численного анализа решеток волноводов с выступающими диэлектрическими элементами, использующие меньшее число наборов неизвестных коэффициентов разложения полей по сравнению с ранее разработанными версиями. Это позволило получить новые результаты по формированию секторных и контурных ДН элемента в решетках указанного типа. Предложена новая методика формирования секторных ДН элемента, основанная на использовании ребристых стержневых элементов. Разработаны математические модели для анализа и оптимизации решеток с такими элементами и получены новые расчетные и экспериментальные результаты, подтверждающие эффективность такого подхода.

4. Разработана и обоснована математическая модель вибраторных решеток с директорными элементами для формирования секторных ДН элемента в одной плоскости. Автором исследовано обобщение одного известного метода эффективного вычисления функции Грина прямоугольного волновода для расчета функции Грина периодических структур, использованной при численном решении задачи. Им получены новые расчетные результаты, характеризующие возможности директорных элементов по формированию секторных ДН в одной плоскости.

Практическая значимость полученных результатов состоит в следующем:

1. Оригинальные результаты автора по формированию секторных и контурных ДН элемента в решетке, полученные как в рамках известных подходов, так и новых позволяют проектировать ФАР с различными типами излучающих элементов при близком к минимальному числу дорогостоящих управляемых элементов для заданного КУ в заданной области сканирования.

2. Новые алгоритмы и соответствующие компьютерные программы позволяют эффективно проводить численное моделирование излучающих структур ФАР связанных двухмодовых волноводов, ребристых структур, выступающих диэлектрических элементов, ребристых стержней и их двумерных аналогов, а также директорных антенных элементов, обеспечивая их эффективное проектирование. Результаты диссертационной работы С.П. Скобелева получены и использованы при выполнении госбюджетных НИР "Багор" (ФАР с ребристыми структурами), "Лама" (волноводные ФАР с выступающими диэлектрическими элементами) и "Моренос" (ФАР с ребристо-стержневыми элементами), проводимых в ОАО "Радиофизика", а также коммерческих НИР и ОКР, проводимых ЗАО "Апекс" (дочернее предприятие ОАО "Радиофизика") при проектировании ФАР с диэлектрическими и ребристо-стержневыми элементами. По результатам диссертационной работы получены 7 авторских свидетельств на изобретение.

Диссертационная работа состоит из предисловия, введения, 6 глав, содержащих 8 приложений, заключения и списка литературы. Работа содержит 349 страниц, 120 рисунков и 3 таблицы. Список литературы включает 298 наименований. Кратко изложим содержание диссертационной работы.

Введение посвящено обзору публикаций по ФАР и вопросам, связанным с темой диссертации, обоснована актуальность работы и дано краткое содержание каждой главы диссертации с указанием новых полученных результатов.

Первая глава диссертационной работы содержит основные фундаментальные соотношения и ограничения для ФАР, полученные с использованием общей теории антенн, примененной к периодическим структурам, используемым в качестве теоретических моделей больших линейных и плоских многоэлементных ФАР.

Вторая глава посвящена развитию схемного метода формирования перекрывающихся подрешеток с секторными ДН. Метод состоит в том, что между фазовращателями и излучателями ФАР располагается пассивный проходной многополюсник, через который каждый управляемый вход решетки подключается к излучателям, соответствующим выбранному и соседним входам. Предложены и рассмотрены квазиоптические аналоги однокаскадной шахматной схемы, представляющиеся предпочтительными в случаях, когда требуется формировать очень узкие (менее градуса) секторные ДН.

В третьей главе исследуются двумерные модели решетки связанных двухмодовых волноводов, в которых требуемые перекрывающиеся амплитудные распределения формируются путем возбуждения первых четной и нечетной мод. Предложено использовать простые щели в стенках двухмодовых волноводов, что заметно упрощает конструкцию по сравнению с известными подходами. Исследована решетка двухмодовых волноводов, возбуждаемых волнами TE_1 из одномодовых волноводов (E -поляризация). Проведена проверка численных результатов и возможности практической реализации предложенных структур для работы в K_a -диапазоне частот с использованием экспериментальной линейной решетки прямоугольных волноводов, связанных через щели в общих узких стенках. Автором предложены алгоритмы расчета матриц рассеяния элементов

рассмотренных структур, основанные на методе сшивания и использованные в методе обобщенных матриц рассеяния

Четвертая глава посвящена исследованию решеток волноводов с реактивными нагрузками в виде короткозамыкателей, образующих модулированные ребристые структуры. В отличие от использования связей между линиями передачи для формирования перекрывающихся подрешеток, рассмотренных во второй и третьей главах, здесь предлагается формировать перекрывающиеся подрешетки за счет естественных взаимных связей между излучателями по свободному пространству. Необходимая интенсивность взаимодействия излучателей обеспечивается их плотным размещением, а секторная ДН элемента формируется в результате подбора положений короткозамыкателей. Рассмотрены разные модели решеток.

В пятой главе проводится исследование решеток волноводов с выступающими диэлектрическими элементами. Между такими элементами также может быть обеспечено достаточно сильное взаимодействие по свободному пространству, которое можно использовать для формирования перекрывающихся подрешеток с секторными и контурными ДН.

Показано, что использование частичного заполнения верхних секций вместо полного позволяет получить хорошее согласование раскрытов волноводов, а наличие ступенчатого перехода позволяет обеспечить согласование между нижними питающими одномодовыми волноводами и верхними секциями. Приведен гибридный проекционный метод решения трехмерной задачи о двумерно-периодической структуре, образованной круглыми волноводами с выступающими диэлектрическими стержнями

В шестой главе предлагаются решетки с элементами продольного излучения, альтернативными диэлектрическим стержням, в виде ребристых стержней и их аналогов, таких как ленточные структуры в двумерном случае, а также дисковые структуры и директорные элементы

в трехмерном случае. Указанные элементы могут иметь преимущества по сравнению с диэлектрическими в L - и S - диапазонах частот, где потребовалось бы слишком много диэлектрического материала. Следует отметить, что многослойные ленточные и дисковые структуры можно формировать путем нанесения их на тонкие пленки или на поверхности плоских слоев пенопласта для использования в миллиметровом диапазоне волн. Разработана математическая модель, а также теоретически и экспериментально исследованы плоские решетки круглых волноводов с многослойными дисковыми структурами.

В заключении диссертации приведены основные результаты, полученные в ходе выполнения работы.

В приложение вынесен вывод некоторых достаточно громоздких формул и алгоритмов.

Оценивая диссертационную работу Скобелева С.П. в целом, следует отметить, что она представляет собой законченное научное исследование, посвященное актуальной проблеме, имеющей большое теоретическое и прикладное значение. Диссертация удачно сочетает глубокое теоретическое исследование рассматриваемых моделей методами математической физики и их реализацию с использованием современных численных методов.

Основные положения, выносимые автором на защиту:

- Определение идеальной контурной и секторной ДН элемента в решетке, как ДН, имеющую максимально высокий уровень в максимально широкой области сканирования при заданных периодах решетки, ее свойства, касающиеся формы контура и уровня на контуре, свойства ортогональности. Многокаскадная "шахматная" схема возбуждения перекрывающихся подрешеток, формирующих секторные ДН, волноводный макет ее однокаскадного варианта, квазиоптические аналоги однокаскадной "шахматной" схемы, расчетные и измеренные характеристики ФАР с указанной схемой.

- Метод формирования секторных ДН элемента в решетке на основе двухмодовых волноводов с щелевыми связями, математические модели, полученные геометрические параметры, волноводный макет решетки, расчетные и измеренные характеристики решеток. Формирование секторных ДН элемента в решетке путем использования реактивно нагруженных излучателей в виде ребристых структур, математические модели и макет решеток такого типа.
- Гибридные проекционные методы численного анализа решеток волноводов с выступающими диэлектрическими элементами, математические модели решеток указанного типа и численные результаты, характеризующие применение выступающих диэлектрических элементов для формирования секторных и контурных парциальных ДН. Метод формирования секторных ДН элемента в решетке на основе элементов в виде ребристых стержней и их аналогов, двумерные и трехмерные математические модели для анализа и оптимизации таких решеток, макет, численные и экспериментальные результаты, характеризующие эффективность применения указанных элементов.
- Метод формирования секторных ДН элемента в решетке на основе использования элементов в виде директорных антенн, математическая модель решеток указанного типа, обобщение известного метода эффективного вычисления функции Грина прямоугольного волновода на функцию Грина периодических структур, использованную в модели, численные результаты, характеризующие возможности формирования секторных ДН элемента в решетках указанного типа.

Обоснованность и достоверность результатов обеспечиваются строгой постановкой граничных задач, согласованностью с известными положениями макроскопической электродинамики и теории антенн,

сходимостью численных результатов, сравнением численных результатов, полученных разработанными методами, с результатами, имеющимися в литературе для некоторых частных случаев, и сравнением результатов расчетов с данными измерений характеристик соответствующих макетных образцов.

Личный вклад автора. Соискателем лично опубликовано 39 работ, включая 22 журнальные статьи, 1 авторское свидетельство на изобретение, 14 статей в трудах конференций и симпозиумов, 2 монографии. В остальных работах, опубликованных с соавторами, вклад соискателя в постановку и решение задач, разработку компьютерных программ, проведение расчетов, анализ полученных результатов и написание текста статей в части, относящейся к теме диссертации, является основным.

Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы.

Замечания. К сожалению, в диссертационной работе С.П. Скобелева имеются некоторые недостатки. Отметим следующие из них:

1. Автор не привел сравнения используемого им гибридного проекционного метода с известными в литературе результатами.

- Харьковской школы дифракции академика НАН Украины В.П. Шестопалова (Шестопалов В.П., Кириленко А.А., Масалов С.А. Матричные уравнения типа свертки в теории дифракции. Киев: Наук. думка, 1984. 294с.; Шестопалов В.П., Кириленко А.А., Масалов С.А., Сиренко Ю.К. Дифракционные решетки. Киев: Наук. думка, 1986. 232с. (Резонансное рассеяние волн: В 2-х т.; Т.1); Шестопалов В.П., Кириленко А.А., Рудь Л.А. Волноводные неоднородности. Киев: Наук. думка, 1988. 216 с. (Резонансное рассеяние волн: В 2-х т.; Т.2))
- Московской школы физического факультета МГУ А.С. Ильинского и А.Г. Свешникова (Ильинский А.С., Слепян Г.Я. Колебания и волны в

электродинамических системах с потерями. М.: Изд-во МГУ, 1983. 232с.; Галишникова Т.Н., Ильинский А.С. Численные методы в задачах дифракции. М.: Изд-во МГУ, 1987. 208с.; Ильинский А.С., Свешников А.Г., Кравцов В.В. Математические модели электродинамики. М.: Высш. школа, 1991).

- Отсутствует ссылка на известную монографию Митра Р. Вычислительные методы в электродинамике. М.: Мир, 1977, в которой рассматриваются подобные физические модели.

2. В главах 3-5 исследуется задача оптимизации геометрии структур. Однако, она решена приближенно: методом подбора физических параметров (ширина щели, расстояние между щелями и переходами). Эту задачу можно решить строго с помощью теории R-функций (функций В.Л. Рвачева) (*Рвачев В.Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения. Киев: Наукова думка, 1982.; Кравченко В.Ф., Басараб М.А. Булева алгебра и методы аппроксимации в краевых задачах электродинамики / под ред. В.Ф. Кравченко. М.: Физматлит. 2004.; Кравченко В.Ф., Рвачев В.Л. Алгебра логики, атомарные функции и вейвлеты в физических приложениях. М.: Физматлит. 2006.*)

3. В диссертации отсутствуют акты о внедрении научных результатов, полученных автором. Они существенно усилили бы качество исследования.

4. При чтении диссертационной работы были обнаружены неточности и опечатки. Например, на стр. 34 отсутствует запятая после формулы на 11 строке сверху, при разрыве строк формул отсутствует повторение переносимого символа ((1.33), (1.37), (1.72) и т.д.).

Выводы. Указанные недостатки и замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы. Скобелевым С.П. предложены и обоснованы теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как новое крупное научное достижение в развитии теории и техники фазированных антенных решеток.

Сама работа представляет собой законченное научное исследование, выполненное на высоком научном уровне. Новизна и достоверность полученных результатов не вызывают сомнений. Защищаемые автором научные результаты опубликованы в ведущих журналах как России, так и зарубежных. Они неоднократно докладывались и обсуждались на различных научных семинарах, российских и международных конференциях.

Считаю, что представленная диссертация содержит решение важных с теоретической и практической точек зрения научных, а также прикладных задач. Отвечает всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям ВАК РФ, а ее автор Скобелев Сергей Петрович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.12.07 – антенны, СВЧ устройства и их технологии.

Официальный оппонент:

заслуженный деятель науки РФ,
д.ф.-м.н., профессор,
главный научный сотрудник
лаб. Радиофизических методов в
аэрокосмических исследованиях
природно-техногенной среды


В.Ф. Кравченко
15 октября 2014 г.

Отзыв профессора В.Ф.Кравченко заверяю:

Ученый секретарь ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,
к.ф.-м.н.


И.И. Чусов

Данные об оппоненте:

ФИО: Кравченко Виктор Филиппович

Ученая степень: Доктор физико-математических наук,

Специальность: 01.04.03 – «Радиофизика»

Почтовый адрес: 125009, Москва, ул. Моховая д.11, корп.7.

Телефон: +7 (495) 629 3365.

Адрес электронной почты: kvf-ok@mail.ru

Наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН.

Должность: главный научный сотрудник лаб. Радиофизических методов в аэрокосмических исследованиях природно-техногенной среды