

На правах рукописи



Балландович Святослав Владимирович

Исследование и разработка печатных отражательных антенных решеток с
использованием модели на основе конечно-бесконечных структур

05.12.07 - Антенны, СВЧ устройства и их технологии

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2015

Работа выполнена на кафедре теоретических основ радиотехники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ)

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент, Сугак Михаил Иванович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, Парнес Михаил Давидович, главный инженер ООО «Резонанс», г. Санкт-Петербург

кандидат технических наук, доцент, Москалев Виктор Михайлович, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург

Ведущая организация - ОАО «НИИ «Вектор», г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится 18 марта 2015 года в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 212.238.03 в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д.5., ауд. 2312.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина) и на сайте www.eltech.ru

Автореферат разослан ____ ____ 20__ года

Ученый секретарь
диссертационного совета



М.Е. Шевченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования: Печатные отражательные антенные решетки (ПОАР) начали активно исследоваться с середины 90-х годов. В общем случае, по структуре ПОАР очень близки к зеркальным антеннам (ЗА) и состоят из облучателя и рефлектора, который выполнен по печатной технологии. В отличие от ЗА, формирование диаграммы направленности (ДН) ПОАР происходит за счет подбора размеров печатных элементов (ПЭ), расположенных в раскрыве. Интерес со стороны разработчиков к таким антеннам обусловлен тем, что с одной стороны, благодаря пространственной схеме питания у них практически отсутствуют потери в фидерной системе, с другой стороны, реализуются преимущества печатной технологии. В последнее время выработалось несколько основных направлений развития ПОАР, а именно: остронаправленные антенны для спутниковых и телекоммуникационных систем; антенны с диаграммой направленности специальной формы; антенны, способные работать в нескольких частотных диапазонах, и антенны с управляемой ДН.

Несмотря на огромное количество научных работ, посвященных данной тематике, разработчик может столкнуться с определенными трудностями при разработке ПОАР. В частности, в литературных источниках отсутствуют систематизированные данные, отражающие закономерности поведения характеристик ПОАР от их геометрии. В результате приходится руководствоваться отчасти интуитивными соображениями по выбору основных параметров антенной системы (количество слоев ПЭ, фокусное расстояние, размер раскрыва).

Кроме того, на данный момент фактически существуют всего лишь два метода расчета характеристик ПОАР. Один из них основан на теореме перемножения диаграмм направленности с использованием приближения локальной периодичности (ячейки Флоке), другой представляет собой электродинамический анализ всей структуры. В приближении локальной периодичности каждый элемент помещается в бесконечную планарную периодическую структуру, что оправдано, когда размеры соседних ПЭ не претерпевают резких изменений. Однако, последнее требование не выполняется, если размер раскрыва больше $15\lambda \times 15\lambda$ (λ - центральная частота рабочего диапазона в котором работает антенна) при практических отношениях F/D (фокусное расстояние/ сторона раскрыва). Электродинамический анализ всей структуры целиком, с одной стороны, обладает наивысшей точностью среди методов расчета, с другой стороны, требует значительных вычислительных ресурсов, особенно для антенн с большим раскрывом. В связи с этим, представляется перспективным метод расчета ПОАР на основе модели с использованием конечно-бесконечных структур, которые уже с середины 70-х годов применяются для расчета антенных решеток (АР) с внутренним питанием. Тем не менее, разработанные методы анализа ПОАР с использованием таких моделей не известны.

Постоянно растет потребность в ПОАР, способных работать в двух частотных диапазонах. Большинство научных работ по данной тематике содержат описание антенн, предназначенных для работы с конкретным видом поляризации, что сужает область их применения. Методики проектирования универсальных (двухполяризационных) двухчастотных ПОАР, опубликованные в литературных источниках, носят разрозненный характер, что создает очевидные проблемы для разработчиков.

Актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования методов расчета характеристик ПОАР; необходимостью проведения систематизированных исследований, направленных на выявление закономерностей поведения характеристик ПОАР в зависимости от параметров геометрии. Кроме того, отсутствие методик, позволяющих проектировать двухполяризационные двухчастотные ПОАР с использованием доступных и дешевых материалов, определяет актуальность исследований в данном направлении.

Целью работы является:

- разработка математической модели ПОАР на основе конечно-бесконечных структур;
- исследование закономерностей влияния геометрии ПОАР на полосу рабочих частот и форму диаграммы направленности;
- развитие методов проектирования двухчастотных ПОАР.

Основные задачи диссертации

1. Разработка математической модели ПОАР на основе конечно-бесконечных структур. Модель должна позволять рассчитывать ДН структуры, состоящей из однослойных или многослойных ПЭ с различными параметрами диэлектрика.
2. Исследование с помощью полученной модели закономерностей поведения зависимости ширины полосы рабочих частот и формы ДН ПОАР от размера раскрыва, фокусного расстояния и количества слоев в ПЭ.
3. Анализ влияния параметров геометрии ПОАР на ошибки фазового распределения вдоль раскрыва.
4. Совершенствование методики проектирования многочастотных ПОАР.
5. Теоретические и экспериментальные исследования образцов ПОАР.

Методы исследования

При разработке математических моделей применяется метод моментов в спектральной области. Для теоретических исследований, дополнительно к разработанной математической модели, используется метод конечных элементов (FEM). Экспериментальные измерения параметров антенн осуществлялись методом сравнения с эталоном в дальней зоне.

Научная новизна

В процессе проведения исследований получены следующие научные результаты:

1. Разработана математическая модель ПОАР, основанная на применении метода моментов в спектральной области с использованием конечно-бесконечных структур, позволяющая сократить время расчета по сравнению с полноволновым электродинамическим расчетом.

2. Получены зависимости ширины полосы рабочих частот ПОАР от геометрии. Получены и приведены в виде графиков данные для широкого диапазона изменений параметров, определяющих геометрию антенны, таких как размер раскрыва, количество слоев печатных излучателей и отношение F/D (фокусное расстояние/сторона раскрыва).

3. Разработаны новые методики, позволяющие проектировать двухполяризационные двухчастотные ПОАР с использованием доступных и дешевых материалов. Такой результат достигается за счет новых способов учета взаимного влияния ПЭ различных частотных диапазонов в раскрыве антенны.

4. Произведена экспериментальная оценка шумовых характеристик разработанных образцов ПОАР, что позволяет более точно прогнозировать их эффективность в составе радиотехнических систем.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработанная математическая модель печатных отражательных антенных решеток на основе конечно-бесконечных структур позволяет реализовать достоинства электродинамических методов расчета и методов, основанных на приближении локальной периодичности, что приводит к существенному сокращению времени расчета по сравнению с полноволновым анализом.

2. Предложенные методы учета взаимного влияния элементов в раскрыве позволяют проектировать двухчастотные ПОАР с улучшенными характеристиками направленности и технико-экономическими показателями.

3. Многослойные ПОАР, раскрыв которых занимает площадь первых двух зон Френеля, потенциально обеспечивают двукратное перекрытие частотного диапазона по критерию снижения коэффициента использования поверхности (КИП) на 1 дБ.

4. Многослойные ПОАР с большим раскрывом обладают значительно большей устойчивостью к погрешностям при сборке и разбросу параметров материалов в сравнении с однослойными структурами.

5. При проектировании многослойных ПОАР увеличение числа слоев печатных излучателей свыше двух не приводит к однозначному улучшению характеристик ПОАР. Таким образом, переход на трехслойные структуры и выше не целесообразен без дополнительной оптимизации геометрии, для которой требуются ПЭ с большим числом степеней свободы.

Теоретическая и практическая значимость

1. Предложенная математическая модель ПОАР позволяет прогнозировать характеристики ПОАР. Наибольшей практической ценностью данный метод обладает при расчете антенн с большим раскрывом, поскольку позволяет

уменьшить время анализа по сравнению с электродинамическим анализом всей структуры.

2. Представленные данные относительно характеристик ПОАР позволяют на этапе проектирования определить основные параметры антенны, такие как количество слоев, фокусное расстояние и размер раскрыва.

3. Предложенные методики позволяют проектировать многочастотные ПОАР с улучшенными электрическими и технико-экономическими характеристиками.

Реализация и внедрение результатов

Получен акт о внедрении от ОАО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс».

Теоретические положения данной работы, методы расчета и экспериментальных исследований использовались в следующих работах: НИР по теме 6672/ГОР-174 от 15.02.07, 2007 г.; НИР по теме ЕНН-041-08/6739/РОС-38 от 29.01.08; ОКР по теме ЕНО-001-09/6834/ГОР-184 от 04.03.09, 2009-2010 гг.; СЧ ОКР «Ядро-1-Р-ГЭТУ» (2010), НИОКР по программе «Умник» (2013-2015).

Апробация результатов работы

Основные положения диссертационной работы были представлены и обсуждались на:

- 18-й международной крымской конференции «СВЧ Техника и телекоммуникационные технологии», 2008 г., Севастополь;
- всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники», Красноярск, 2008-2009 гг.;
- 8-м международном симпозиуме по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии, СПб, 2009;
- 63, 64, 65, 66 научно-технических конференциях НТОРЭС им. А.С. Попова, СПб, 2008 - 2011 гг.;
- первой всероссийской конференции молодых ученых «Новые материалы и нанотехнологии в СВЧ электронике», Санкт-Петербург, 2010 г.;
- на всероссийской научно-технической конференции «Микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, 2012г.;
- на конференциях профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ («ЛЭТИ») в 2008-2014 гг.

Публикации

Основные теоретические и практические результаты по теме диссертации опубликованы в 22 статьях и материалах конференций, из которых 6 публикаций в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК. Доклады доложены и получили одобрение на 15 международных, всероссийских и межвузовских научно-практических конференциях.

Структура и объем работы

Диссертация содержит 179 страниц основного текста, 145 рисунков, 1 таблицу. Список литературы состоит из 111 позиций.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе дан обзор исследований, посвященных тематике работы.

В первой части содержатся общие сведения относительно ПОАР, поясняющие принцип их работы. В состав типичной ПОАР входит рефлектор, состоящих из ПЭ, и облучатель (чаще всего рупорная антенна). Требуемое фазовое распределение вдоль раскрыва антенны реализуется путем подбора размеров каждого ПЭ. В процессе проектирования реальный облучатель обычно представляется в виде источника сферической волны. Таким образом, с помощью зависимости фазы коэффициента отражения от размеров ПЭ синтезируется геометрия раскрыва ПОАР.

Вторая часть представляет собой обзор наиболее распространенных математических моделей одиночных ПЭ.

В третьей части дается обзор основных разновидностей элементов ПОАР таких, как однослойные и многослойные ПЭ, диэлектрические элементы, ПЭ в виде вложенных рамок, элементы с линиями задержки и двухчастотные ПЭ круговой поляризации. Кратко дано описание основных особенностей каждого из элементов, а также приводятся их основные электрические характеристики.

В четвертой части первой главы дается описание основных методов фазового синтеза: вариационного и итерационного. Возможность получать диаграммы направленности произвольной формы является одним из основных преимуществ ПОАР. В связи с этим, решение задачи фазового синтеза является важным этапом при проектировании таких антенн.

В последних двух частях первой главы производится обзор методов анализа и практических реализаций ПОАР.

В конце первой главы формируются задачи диссертационной работы.

Во второй главе автором формируется математическая модель ПОАР на основе конечно-бесконечных структур. Кроме того, проведены исследования свойств ПОАР с помощью полученной математической модели.

На данный момент используется два основных метода расчета характеристик ПОАР. Один из них основан на приближении локальной периодичности (ячейке Флоке), суть которого в том, что при анализе каждый ПЭ помещается в бесконечную планарную периодическую АР. Такой прием позволяет резко сократить время расчета, но имеет свои границы применимости, которые определяются отсутствием резких скачков в размерах соседних ПЭ. Другой метод расчета характеристик ПОАР представляет собой полноволновой электродинамический анализ всей структуры. Точность электродинамического анализа высокая, но могут возникнуть трудности, связанные с нехваткой машинных ресурсов. Модель ПОАР на основе конечно-бесконечных структур является промежуточным вариантом, так как сочетает в себе свойства обоих методов. Конечно-бесконечные структуры используются с середины 70-х годов для моделирования АР с внутренним питанием, тем не менее, применительно к ПОАР данный подход в литературе практически не представлен.

В общем виде геометрия конечно-бесконечной структуры при возбуждении плоской либо сферической волной показана на рис. 1а и рис. 1б соответственно. Вдоль оси ОУ раскрыв содержит бесконечное число элементов, в то время как вдоль оси ОХ – только N элементов. Направление падения плоской волны задается вектором волновых чисел \mathbf{k}^{inc} , либо, в частном случае (вектор \mathbf{k}^{inc} лежит в плоскости ХОZ или ХОУ), просто углом θ^{inc} (см. рис. 1а). Местоположение фазового центра сферической волны задается параметром F/D , где F - фокусное расстояние, D - размер раскрыва вдоль оси ОХ (рис. 1б).

Рефлектор ПОАР состоит из печатных излучателей, расположенных над экраном с диэлектриком, следовательно, рассеянное поле каждого ПЭ можно записать в виде суммы:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_i^{\text{S}} + \mathbf{E}_i^{\text{gr}}, \\ \mathbf{E}_i^{\text{S}} = \int_{x'} \int_{y'} \mathbf{G}(r, r') \mathbf{J}_i(x', y') dx' dy', \end{aligned} \quad (1)$$

где \mathbf{E}_i^{gr} - поле, рассеянное от экрана с диэлектриком, \mathbf{E}_i^{S} - поле, рассеянное печатными излучателями, индекс « i » обозначает порядковый номер элемента, $\mathbf{G}(r, r')$ - функция Грина, $\mathbf{J}_i(x', y')$ - плотность поверхностного электрического тока. Кроссполяризационными составляющими излучения ПОАР, уровень

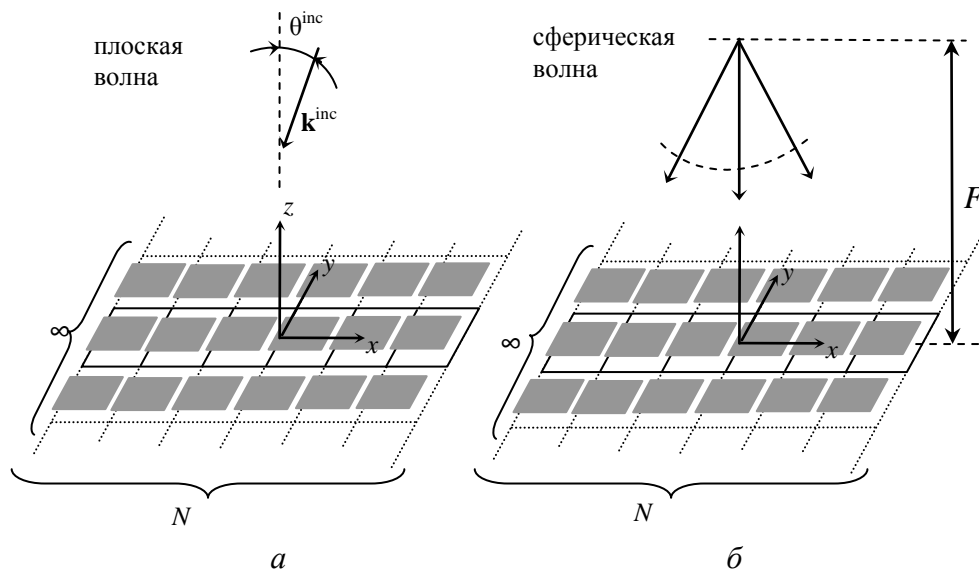


Рис. 1. Конечно-бесконечная ПОАР при возбуждении: а - плоской волной; б - сферической волной

которых обычно достаточно низкий, можно пренебречь и перейти от векторной записи выражения (1) к скалярной. Значение вектора \mathbf{E}_i^{S} для основной поляризационной составляющей в дальней зоне принимает следующий вид:

$$E_i^{\text{S}} = \frac{Z_0}{2\pi} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \tilde{Q}_{xx}^{\text{S}}(k_x, k_y) I_i \tilde{J}_i(k_x, k_y) \cos(\theta) \sim \tilde{Q}_{xx}^{\text{S}}(k_x, k_y) I_i \tilde{J}_i(k_x, k_y) \cos(\theta), \quad (2)$$

где θ и φ – углы сферической системы координат, $k_x = k_0 \sin(\theta) \cos(\varphi)$, $k_y = k_0 \sin(\theta) \sin(\varphi)$, $Z_0 = 120\pi$ Ом, $\tilde{J}_i(k_x, k_y)$ - Фурье-образ базисной функции плотности поверхностного тока печатного излучателя.

Функция \tilde{Q}_{xx}^S представляет собой Фурье-образ функции Грина для источника электрического тока над экраном с диэлектриком и определяется следующими формулами:

$$\tilde{Q}_{xx}^S = \frac{jk_1(k_0^2 - k_x^2) \sin(k_1 d) + k_2(\varepsilon k_0^2 - k_x^2) \cos(k_1 d) e^{-jk_2(z-d)}}{T_e T_m} \sin(k_1 d), \quad (3)$$

$$T_m = jk_1 \sin(k_1 d) + k_2 \varepsilon \cos(k_1 d),$$

$$T_e = jk_2 \sin(k_1 \cdot d) + k_1 \cos(k_1 d),$$

где d толщина диэлектрической подложки, $k_1 = -j\sqrt{k_x^2 + k_y^2 - k_0^2 \varepsilon}$ - продольное волновое число в среде с относительной диэлектрической проницаемостью ε , $k_2 = -j\sqrt{k_x^2 + k_y^2 - k_0^2}$ - продольное волновое число в свободном пространстве.

Аналогично можно переписать второе слагаемое в формуле (1):

$$E_i^{\text{gr}} \sim \tilde{Q}_{xx}^{\text{gr}}(k_x, k_y) I_i^{\text{gr}} \tilde{J}_i^{\text{gr}}(k_x, k_y) \cos(\theta), \quad (4)$$

где $\tilde{Q}_{xx}^{\text{gr}} = j \frac{k_x^2 - k_0^2}{2k_2}$ является Фурье-образом функции Грина для источника электрического тока в свободном пространстве, $\tilde{J}_i^{\text{gr}}(k_x, k_y)$ - Фурье-образ базисной функции плотности поверхностного тока фрагмента экрана, I_i^{Gr} - амплитуда поверхностного тока экрана, которая определяется источником. Формулы (2) и (4) получены путем записи (1) в спектральной области с последующим вычислением интегралов методом стационарной фазы для дальней зоны.

В результате, поле в дальней зоне, рассеянное рефлектором, можно записать в виде следующей суммы:

$$E^\Sigma = \sum_i \left(E_i^s e^{jk_0 \sin \theta x_i} \right) + \sum_i \left(E_i^{\text{gr}} e^{jk_0 \sin \theta x_i} \right), \quad (5)$$

где x_i - координата положения i -го ПЭ, x_i - координата положения i -го элемента экрана. Фактически выражения (5) представляет собой ДН, зная которую можно рассчитать такие характеристики ПОАР как КНД, ширину полосу рабочих частот.

Чтобы найти неизвестные амплитуды I_i при базисных функциях в формуле (2) необходимо решить систему связанных интегральных уравнений (СИУ), представляющую собой запись граничного условия на поверхности излучателей из идеально проводящего металла: $\mathbf{e}_x (\mathbf{E}^s + \mathbf{E}^{gr} + \mathbf{E}^{inc}) = 0$ на поверхности печатного излучателя (где \mathbf{E}^{inc} - поле источника). С помощью процедуры Галеркина СИУ сводится к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), которую в матричном виде можно записать как $\mathbf{Z} \mathbf{I} = \mathbf{V}$. Для

конечно-бесконечной структуры, изображенной на рис. 1, компоненты матрицы \mathbf{Z} вычисляются как сумма интегралов:

$$Z_{ij} = \frac{jZ_0}{2\pi b k_0} \sum_n \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{J}_i^*(k_x, k_{yn}) \tilde{Q}_{xx}^S(k_x, k_{yn}) \tilde{J}_j(k_x, k_{yn}) e^{jk_x(x_i - x_j)} dk_x \right\}, \quad (6)$$

где $k_{yn} = 2\pi n/b$ при $n = 0, 1, 2, \dots$, b - межэлементное расстояние вдоль оси ОУ.

При расчете структур с воздушным межслойным заполнением функции Грина в (6) определяются формулой (3). Если $\varepsilon > 1$, то необходимо воспользоваться следующим выражением:

$$\tilde{Q}_{xx}(k_x, k_y; z, z') = \frac{1}{k_t^2} \left[\frac{k_1 k_x^2 [\varepsilon_1 k_2 \cos(k_1 z) - j k_1 \sin(k_1 z)]}{\varepsilon_1 T m} + \frac{k_0^2 k_y^2 [\cos(k_1 z) - j \frac{k_1}{k_2} \sin(k_1 z)]}{T e} \right] \sin(k_1(z' + d)),$$

$$k_t^2 = k_x^2 + k_y^2, \quad (7)$$

где z' - плоскость, в которой расположен источник; z - плоскость, в которой расположена точка наблюдения.

Элементы столбца напряжений V_i СЛАУ при возбуждении плоской волной можно записать как:

$$V_i = \int \int_{x' y'} J_i(x', y') (E^{gr} + E^{inc}) dx' dy' = \int \int_{x' y'} J_i(x', y') \left| E^{gr} + E^{inc} \right| e^{jk_0 \sin \theta_{inc} x'} dx' dy' =$$

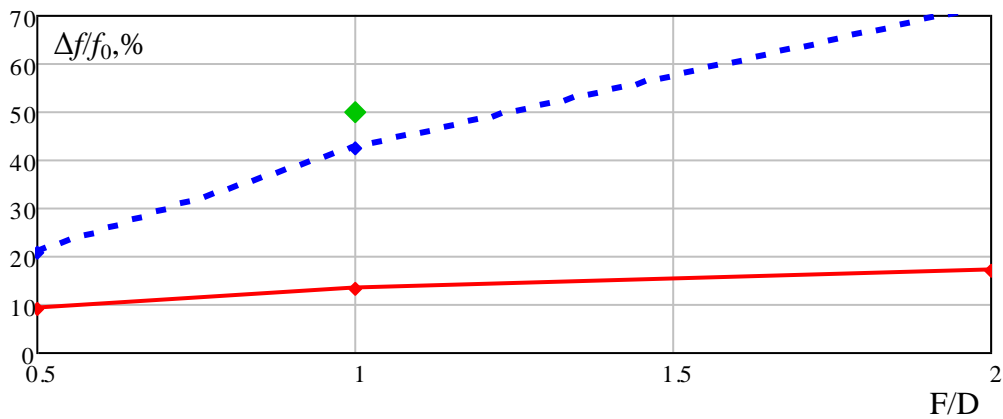
$$= \tilde{J}_i(k_0 \sin \theta_{inc}, 0) \left| E^{gr} + E^{inc} \right|, \quad (8)$$

где θ_{inc} - угол падения плоской волны. Сферическую волну можно представить как совокупность плоских волн, распространяющихся в разных направлениях.

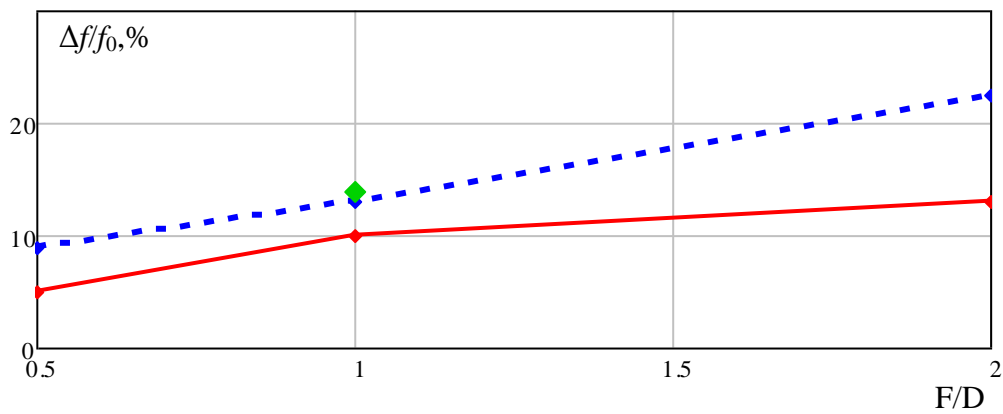
В этом случае в (8) угол θ_{inc} рассчитывается для каждого ПЭ: $\theta_{inc_i} = \arctg \frac{-x_i}{F}$,

где x_i - координата центра i -й базисной функции.

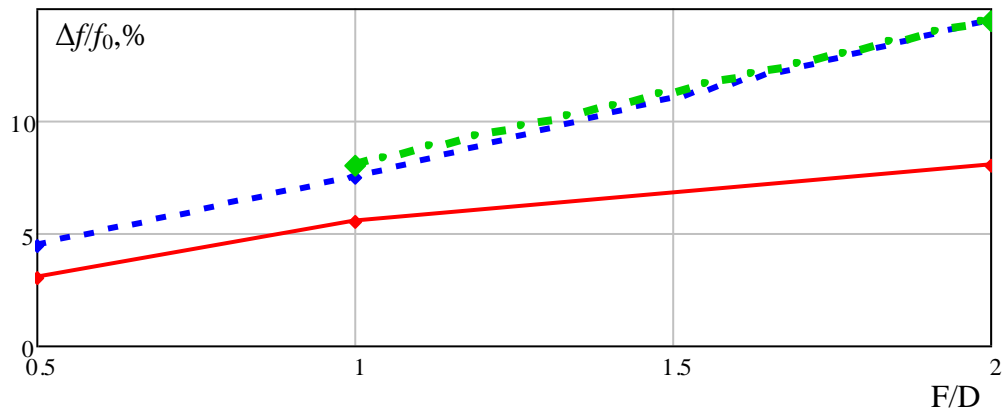
Далее, с помощью полученной модели, производятся расчеты характеристик ПОАР с различными геометрическими параметрами. Рассматриваются ПОАР с раскрывом $10\lambda \times 10\lambda$, $20\lambda \times 20\lambda$ и $40\lambda \times 40\lambda$ с отношением $F/D=0.5$, $F/D=1$ и $F/D=2$ (отношение фокусного расстояния к стороне раскрыва). Полученные данные систематизированы и сведены в графики на рис. 2 в виде зависимости ширины полосы рабочих частот по критерию снижения КУ на 1 дБ от отношения F/D . Из приведенных зависимостей видно, что как при уменьшении параметра F/D , так и при увеличении площади раскрыва полоса рабочих частот уменьшается. Переход на двухслойные ПЭ позволяет добиться значительного увеличения полосы рабочих частот по сравнению с однослойными структурами. Тем не менее, преимущество многослойных ПОАР в полосе частот уменьшается по мере роста площади раскрыва. Для однослойной АР с раскрывом $10\lambda \times 10\lambda$ ширина



a



б



в

Рис. 2. Ширина полосы рабочих частот по критерию снижения КИП на 1 дБ для ПОАР со стороной раскрыва: а - 10λ ; б - 20λ ; в - 40λ для : — 1-слойных ПЭ, - - - 2-слойных ПЭ, - . - 3-слойных

полосы рабочих частот составляет 13% от центральной, в то время как для двухслойной АР - более 40%, а для трехслойной уже 50%. Для АР с раскрывом $40\lambda \times 40\lambda$ и $F/D=1$ аналогичные показатели составляют 6%, 7.5% и 8%. При дальнейшем увеличении размеров раскрыва разница в полосе частот и вовсе исчезает. Данные с рис. 2, показывают, что переход на трехслойные ПЭ не ведет к значительному увеличению полосы рабочих частот. По-видимому, использование трехслойных элементов целесообразно при введении в процесс проектирования ПОАР дополнительных процедур оптимизации, так как они

обладают большим числом степеней свободы по сравнению с двухслойными ПЭ.

Помимо оценки ширины полосы рабочих частот во второй главе исследуется влияние параметров геометрии на форму ДН ПОАР. Установлено, что многослойные АР обладают пониженным уровнем боковых лепестков по сравнению с однослойными.

Кроме того, рассмотрены вопросы влияния геометрии ПОАР на фазовое распределение вдоль раскрыва.

Третья глава посвящена проектированию двухчастотных ПОАР. Потребность в таких антеннах возникает из-за противоречивости требований широкой полосы частот и высокого КУ ПОАР.

Проектирование двухчастотных ПОАР не вызывает особых проблем, если прием и передача информации ведется на ортогональных поляризациях, но в таком случае антенна перестает быть универсальной. В ряде литературных источников можно найти описание двухполяризационных двухчастотных ПОАР, однако, сопутствующие методики проектирования обладают рядом существенных недостатков. Наиболее перспективным представляется развитие антенн с совмещенным раскрывом, то есть содержащим отдельные ПЭ для работы в разных частотных диапазонах (см. рис. 3а). Основные трудности при проектировании таких ПОАР заключаются в корректном учете взаимного влияния элементов, предназначенных для работы на разных частотах. На данный момент, такого рода взаимодействие ПЭ оптимизируется путем подбора параметров диэлектрической подложки, что может привести к необходимости использования дорогостоящих материалов и, соответственно, к потере конкурентоспособности ПОАР.

В работе предлагается методика проектирования двухполяризационных двухчастотных ПОАР на основе модифицированной ячейки Флоке, которая показана на рис 3б внизу. Отличия от традиционной ячейки Флоке (см. рис. 3б вверху) заключаются в наличии пассивных элементов, имитирующих ПЭ другого частотного диапазона (см. рис. 3б внизу). Размер пассивных элементов определяется среднестатистическим размером ПЭ, предназначенных для работы на другой частоте. Электродинамический анализ показывает, что ПОАР, спроектированные с использованием модифицированной ячейки Флоке, обладают улучшенными электрическими характеристиками. В качестве подтверждения, на рис. 4. приводятся зависимости коэффициента направленного действия от

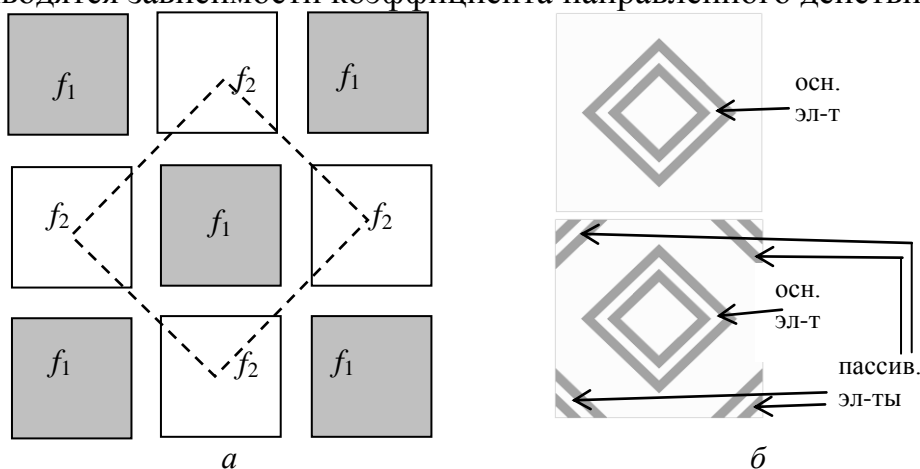


Рис. 3 а - принцип построения совмещенных раскрывов; б - традиционная ячейка Флоке (вверху) и модифицированная (внизу)

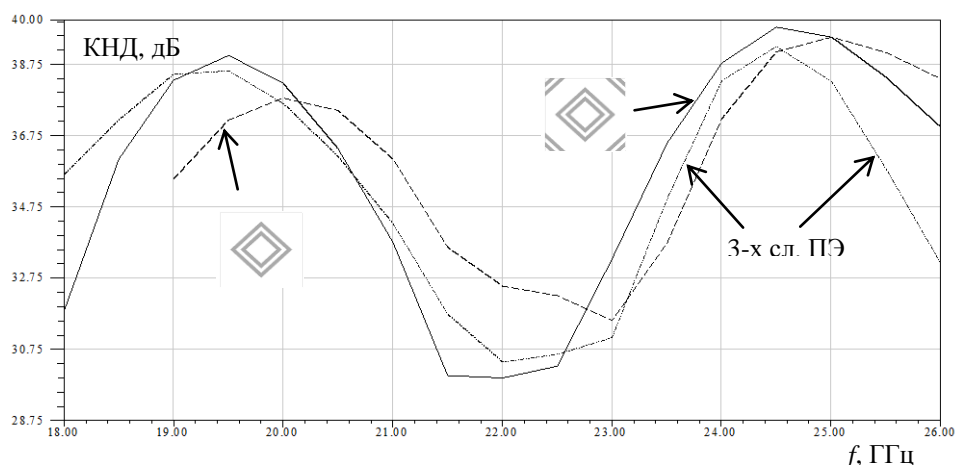


рис. 4. Частотная зависимость КНД для: однослойной ПОАР, спроектированной на основе модифицированной ячейки Флоке (сплошная линия); однослойной ПОАР, спроектированной на основе традиционной ячейки Флоке (пунктирная линия); трехслойной ПОАР, спроектированной на основе модифицированной ячейки Флоке (штрихпунктирная линия)

частоты для трех ПОАР. Все антенны обладают раскрывом 600мм x 600мм с отношением $F/D=1$. Как видно, использование модифицированной ячейки Флоке (соответствующая кривая отмечена пиктограммой на рис. 4 позволяет увеличить значение КУ примерно на 1 дБ.

Тем не менее, не всегда удастся добиться приемлемых характеристик АР описанным способом. В таких случаях требуется непосредственный учет взаимного влияния ПЭ разных частотных диапазонов. Для этого предлагается пошаговая процедура проектировки ПОАР, описание которой следует далее. Сначала синтезируется геометрия раскрыва для верхнего частотного диапазона. Затем, на основе полученного массива размеров ПЭ, строится функция $L(r)$, в которой L - размер высокочастотного элемента, r - длина радиус-вектора от центра раскрыва до точки положения конкретного излучателя. Подставляя координаты положения конкретного низкочастотного ПЭ в данную функцию, можно получить размер пассивного элемента (см. рис. 3б внизу). После этого, для каждого низкочастотного ПЭ рассчитывается своя зависимость фазы коэффициента отражения от его размеров с помощью модифицированной ячейки Флоке. Далее формируется геометрия низкочастотного раскрыва и объединяется с геометрией высокочастотного. Для проверки эффективности предложенной пошаговой процедуры синтеза геометрии были спроектированы две ПОАР - одна с раскрывом 300мм x 300мм, другая с раскрывом 450мм x 450мм. Рабочий диапазон частот для обеих антенн лежит в интервале 18.5-20 ГГц и 28.5-30 ГГц. На рис. 5. показана расчетная зависимость КНД указанных антенн от частоты. Максимальное значение КНД для антенны с раскрывом 300мм x 300мм в нижней полосе частот составляет 32.6 дБ (КИП=43%), в верхней полосе 36.7 дБ (КИП=46%). Аналогичные показатели апертурной эффективности (КИП) для ПОАР с раскрывом 450мм x 450мм составляют 38.55% в нижней полосе частот и 43.6% в верхней.

Таким образом, в третьей главе предлагаются методики проектирования универсальных (двухполяризационных) двухчастотных ПОАР, позволяющие учитывать взаимное влияние ПЭ, предназначенных для работы на разных

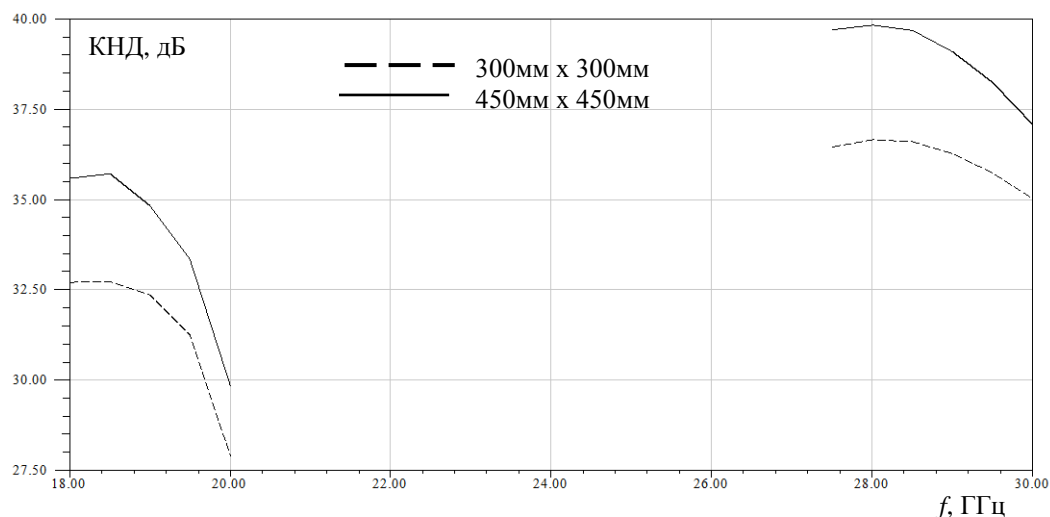
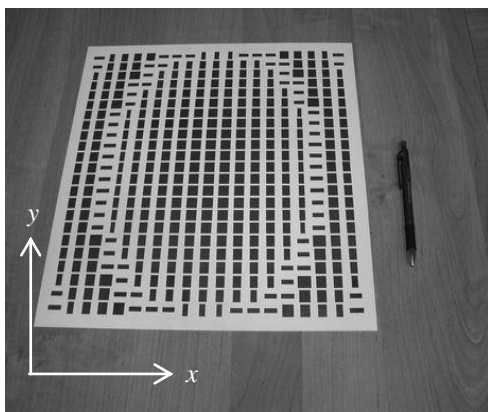


Рис. 5. Зависимость КНД от частоты для ПОАР, спроектированной с использованием пошаговой процедуры синтеза геометрии

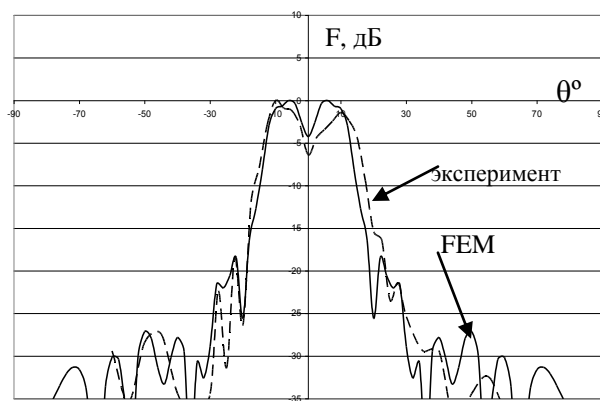
частотах. Показано, что учет такого рода взаимодействия между ПЭ позволяет использовать широкую номенклатуру доступных и дешевых материалов в процессе проектирования.

В четвертой главе приводятся экспериментальные данные, полученные при исследовании практически реализованных ПОАР.

В результате исследования ПОАР с ДН специальной формы был разработан ряд экспериментальных образцов. Одним из них является ПОАР с секторной ДН, геометрия которой показана на рис. 6а. Размер раскрыва 300мм x 300мм ($10\lambda \times 10\lambda$); размер ячейки с прямоугольными ПЭ - 20мм x 16мм,



а



б

Рис. 6 а - геометрия ПОАР с секторной ДН; б - теоретическая и экспериментальная ДН

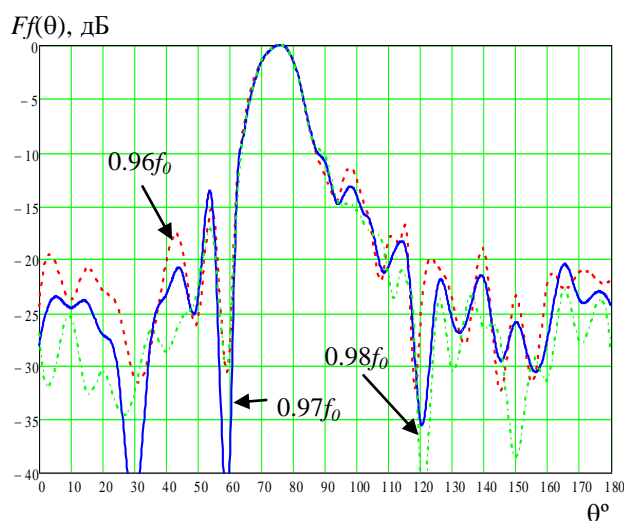
отношение $F/D=1$, антенна предназначена для работы в X-диапазоне. В качестве диэлектрической подложки используется пенополиэтилен ($\epsilon \approx 1.05$), а в качестве защитного слоя – ПВХ ($\epsilon \approx 1.33$). Теоретическая и экспериментальная ДН показаны на рис. 6б, который демонстрирует их хорошее соответствие. Относительно невысокое качество формы ДН объясняется использованием однослойных ПЭ. Результаты проведенных исследований позволяют сделать предположение, что для относительно небольших раскрывов результаты, полученные с помощью приближения локальной периодичности, обладают приемлемой точностью.

В рамках НИР «Ядро» был изготовлен образец ПОАР с ДН специальной формы для решения радиолокационных задач в миллиметровом диапазоне.

Требуемая форма ДН близка к косекансной. Фотография макета антенны показана на рис. 7а. Диаметр раскрыва равен 75мм, размер ячейки 4.4мм x 4.4мм, расчетное фокусное расстояние 40мм ($F/D=0.53$), в качестве диэлектрической подложки используется материал Rogers4003 ($\epsilon' = 3.55$). Для расширения рабочей полосы частот и улучшения формы ДН используется двухслойный ПЭ, в котором толщина каждого слоя равна 0.508 мм. Предварительные исследования производились с помощью модели на основе конечно-бесконечных структур и показали соответствие расчетных характеристик требуемым. Затем был изготовлен экспериментальный образец, фотография которого показана на рис. 7а. На рис. 7б представлена экспериментальная ДН в диапазоне $0.96f_0 - 0.98f_0$. В целом, антенна сохраняет работоспособность в 3% полосе частот. Реальный диапазон рабочих частот оказался несколько ниже расчетного. Как показал эксперимент, большое влияние на качество формы ДН оказывает дифракция на рупорном облучателе, в частности, дифракционный всплеск на диаграмме направленности в направлении 97° обусловлен именно этим эффектом. В целом, измеренные данные подтверждают правоту выбранных решений по геометрии ПОАР.



а



б

Рис. 7 а - ПОАР миллиметрового диапазона с ДН специальной формы; б - экспериментальная ДН

Одним из направлений развития печатных отражательных антенных решеток является их продвижение как альтернативы ЗА для спутникового телевидения. Преимущество ПОАР для таких задач заключается в возможности отклонения главного лепестка ДН в произвольном направлении. В рамках нескольких НИОКР в 2008 - 2010 г был разработан ряд антенн, предназначенных для работы в составе спутниковых телекоммуникационных систем. Итогом работ стала антенная решетка с раскрывом 2.4м x 2.4м ($95\lambda \times 95\lambda$), спроектированная для работы в Кв-диапазоне (11.75-12.25 ГГц), и главным лепестком ДН, отклоненным на 40° от нормали к раскрыву. Конструктивные решения отрабатывались на АР с уменьшенными размерами (раскрыв $13\lambda \times 13\lambda$). Предварительные расчеты показали, что двухслойный вариант антенны является предпочтительным. Во-первых, ДН многослойных ПОАР имеет пониженный уровень боковых лепестков, во вторых многослойные ПЭ более устойчивы к производственным погрешностям и разбросу параметров материалов. В результате был изготовлен полноразмерный образец ПОАР, фотография которого показана на рис. 8. Из-за размеров раскрыва, измерения КУ по дальней зоне были трудноосуществимы,



Рис. 8. ПОАР, предназначенная для работы в составе спутниковых телекоммуникационных систем.

поэтому экспериментальные характеристики были получены методом сравнения с эталоном. В качестве эталонных использовались ЗА диаметром 0.9 м ($KУ=39$ дБ на частоте 11.3 ГГц) и 1.2 м ($KУ=41.6$ дБ на частоте 11.3 ГГц), источником радиосигнала служил телекоммуникационный спутник. Параметром, по которому оценивалась эффективность антенн, было отношение сигнал/шум. По этому показателю спроектированная ПОАР оказалась эквивалентной ЗА диаметром 1.2 м. В то же время, уровень спектра принятого на ПОАР сигнала со спутника был выше, чем уровень спектра сигнала, принятого на ЗА. В итоге, $KУ$ спроектированной антенны оценивается в 45 дБ. Такая разница между шумовыми и направленными характеристиками объясняется ДН ПОАР, которая имеет повышенный уровень боковых лепестков в сравнении с ЗА.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В ходе исследований, проведенных в рамках поставленных задач, получены следующие основные результаты:

1. Разработана математическая модель ПОАР на основе конечно-бесконечных структур. Конечно-бесконечные структуры давно используются для моделирования АР с внутренним питанием, однако, применительно к ПОАР такой подход не был развит до настоящего времени.

2. С помощью полученной модели исследована зависимость ширины полосы рабочих частот и формы ДН ПОАР от размера раскрыва, величины фокусного расстояния и количества слоев печатных излучателей.

3. Проанализировано влияния геометрии ПОАР на ошибки фазового распределения вдоль раскрыва

4. Усовершенствованы методики проектирования многочастотных ПОАР, позволившие получить антенны с улучшенными характеристиками. Суть предложенных нововведений заключается в модификации ячейки Флоке, что позволяет более точно учитывать взаимное влияние ПЭ в пределах раскрыва.

5. Предложена пошаговая процедура синтеза геометрии двухчастотных ПОАР.

6. Установлено, что многослойные ПОАР, раскрыв которых совпадает с площадью, занимаемой первыми двумя зонами Френеля, потенциально могут

обеспечивать двукратное перекрытие частотного диапазона по критерию снижения коэффициента использования поверхности (КИП) на 1 дБ.

7. Установлено, что многослойные ПОАР с большим раскрывом обладают значительно большей устойчивостью к производственным погрешностям при сборке и разбросу параметров материалов в сравнении с однослойными структурами.

8. Установлено, что при проектировании многослойных ПОАР увеличение числа слоев печатных излучателей свыше двух не приводит к однозначному улучшению характеристик ПОАР. Так, переход на трехслойные структуры и выше уже не целесообразен без дополнительной оптимизации геометрии ПОАР.

Обоснованность данных выводов подтверждена в ходе экспериментальных исследований изготовленных образцов ПОАР в ходе ряда НИОКР.

Публикации по теме диссертации

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Балландович С.В., Сугак М.И., Костиков Г.А., печатные отражательные антенные решетки с диаграммой направленности специальной формы. Антенны. М. №6, 2008, с.53-59

2. С. В. Балландович, Г. А. Костиков, М. И. Сугак. Печатная двухслойная отражательная антенная решетка мм-диапазона с диаграммой направленности специальной формы. // Антенны, N 10, 2012, стр-22-27.

3. Ю. Г. Антонов, С. В. Балландович, Г. А. Костиков, М. И. Сугак. Характеристики плоских отражательных антенных решеток, выполненных на основе фрезерованных композитных панелей.// Антенны, N 10, 2010, стр. 5-10

4. Балландович С. В., Костиков Г. А., Пташкин А. А., Сугак М. И. Оптимизация геометрии многослойной линзы. Антенны, М., N10, 2009, с 43-48

5. Балландович С. В., Костиков Г. А., Пташкин А. А., Сугак М. И., Рязанцев Р.О., Ю.П. Саломатов, Опыт проектирования и результаты исследования печатных многослойных линзовых антенн. Антенны, М., N8, 2010, с 3-7.

6. Балландович С.В. Применение конечно-бесконечной модели для анализа печатных отражательных антенных решеток. Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», №9, 2014 г., стр. 3-8

Публикации в других изданиях

7. Балландович С.В., Костиков Г.А., Сугак М.И. Проектирование печатных отражательных антенных решеток с применением метода фазового синтеза. Севастополь. Материалы 18-й международной крымской конференции «СВЧ Техника и телекоммуникационные технологии», 2008 г., с 415-416

8. Балландович С.В., Костиков Г. А., Сугак М.И. Печатные отражательные антенные решетки с диаграммой направленности специальной формы. Современные проблемы радиоэлектроники. Сборник научных трудов. Под ред. А.И.Громыко, А.В. .Сарафанова. Красноярск. ИПК СФУ 2008. с.110-113.

9. Балландович С.В., Костиков Г.А., Сугак М.И., Одинцов А.Ю. Теоретическое и экспериментальное исследование печатных отражательных антенных решеток с диаграммой направленности специальной формы. Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», труды 63-й научно-технической конференции посвященной дню радио, Санкт-Петербург, апрель 2008 г., с. 7-8.

10. Балландович С.В., Сугак М.И., Костиков Г. А. Проектирование печатных отражательных антенных решеток для спутникового телевидения. Современные

проблемы радиоэлектроники: сб. научн. тр. – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. с. 125-127.

11. Балландович С. В., Костиков Г. А., Сугак М. И. Улучшение электромагнитной совместимости радиосистем с печатными отражательными антенными решетками. Труды 8-го международного симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии, СПб, 2009, с. 207-208.

12. Балландович С. В., Костиков Г. А., Сугак М. И. Результаты исследования остронаправленных печатных отражательных антенных решеток для спутникового телевидения. 62-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава университета, СПб 2009, с 24-28.

13. Балландович С. В., Костиков Г. А., Сугак М. И., Ю.П. Саломатов. Сравнительный анализ точности математических моделей печатных отражательных антенных решеток, 64-я научно-техническая конференция, посвященная дню радио, СПб 2009 г.

14. Балландович С.В., Сугак М.И., Костиков Г.А., Саломатов Ю.П., плоская диэлектрическая линза миллиметрового диапазона, изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», труды 65-й научно-технической конференции посвященной дню радио, Санкт-Петербург, апрель 2010 г.

15. Балландович С.В., Сугак М.И., Костиков Г.А., Антонов Ю.Г, Мигай М.В., Попов Д.В., особенности характеристик направленности плоских отражательных антенных решеток, выполненных на основе фрезерования композитных панелей, изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», труды 65-й научно-технической конференции посвященной дню радио, Санкт-Петербург, апрель 2010 г.

16. Балландович С.В., Сугак М.И., Костиков Г.А., Проектирование печатных отражательных антенных решеток для спутникового телевидения, современные проблемы радиоэлектроники. Сборник научных трудов. под ред. А.И.Громыко, А.В.Сарафанова. Красноярск. ИПК СФУ 2009. с.125-126.

17. Ю.Г. Антонов, С.В. Балландович, Г.А. Костиков, М.И. Сугак. Печатные многослойные отражательные антенные решетки Ka-диапазона с диаграммой направленности специальной формы. Труды 66 научно-технической конференции, посвященной дню радио. 19-29 апреля 2011г. СПб. Изд-во СПбГЭТУ«ЛЭТИ». с. 6-7.

18. О.Т. Драк, И.С. Чупилин, С.В. Балландович, Г.А. Костиков, М.И. Сугак Теоретическое и экспериментальное исследование плоских линзовых антенн. Материалы первой всероссийской научной конференции молодых ученых «Новые материалы и нанотехнологии в электронике СВЧ», 2010 г., с. 37-39.

19. Балландович С.В., Костиков Г.А. Математическое моделирование отражательной антенной решетки на щелевых элементах. Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», сборник докладов 65-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава университета, 24 января-4 февраля, Санкт-Петербург, апрель 2012 г., с. 16-17.

20 С.В. Балландович, Г.А. Костиков, М.И. Сугак. Проектирование и экспериментальное исследование плоской отражательной антенной решетки миллиметрового диапазона. Сборник трудов всероссийской научной конференции "Микроэлектроника СВЧ", 2012, том 2, стр. 340-344.

21. Моделирование, проектирование и технологии СВЧ-устройств и ФАР. Коллективная монография/ Под ред. А.Ю. Гринева. - М.: Радиотехника, 2014. - 198 с.: ил.

22. Антенные системы локации, навигации и радиосвязи. коллективная монография/ Под ред. А.Ю. Гринева. - М.: Радиотехника, 2013. - 176 с.: ил.