

На правах рукописи



Ястребцова Ольга Игоревна

**МИКРОПОЛОСКОВЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ С ДВУХСЛОЙНОЙ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКОЙ**

2.2.14 – АНТЕННЫ, СВЧ-УСТРОЙСТВА И ИХ ТЕХНОЛОГИИ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2021

Работа выполнена на кафедре «Технической электродинамики и антенн» Ордена Трудового Красного Знамени ФГБОУ ВО «Московский технический университет связи и информатики».

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент
Николаев Алексей Владимирович

Официальные оппоненты:

Горбачев Анатолий Петрович
доктор технических наук, профессор,
Новосибирский государственный технический университет,
профессор

Комиссарова Елена Владимировна
кандидат технических наук, доцент,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
доцент

Ведущая организация:

Публичное акционерное общество «Радиофизика»

Защита состоится « 28 » декабря 2021 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.2.327.01 в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте mau.ru и в библиотеке МАИ.
Автореферат разослан « ___ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
24.2.327.01, к.т.н.

А.А. Горбунова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Загруженность радиочастотного спектра, а также потребность в новом спектре с возможностью обеспечения возрастающей пропускной способности различных систем радиосвязи приводит к развертыванию этих систем во все более высоких диапазонах частот. Однако при этом существенно увеличиваются потери распространения радиосигнала, а в условиях плотной городской застройки, помимо этого, возрастает негативное влияние многолучевого распространения на качество радиосвязи. В то же время, при повышении рабочей частоты происходит уменьшение геометрических размеров антенных систем, что позволяет использовать многоэлементные фазированные антенные решетки (ФАР) с обработкой сигнала, реализующие технологию ММО или адаптивно формирующие диаграмму направленности с учетом изменяющихся условий распространения, а также с учетом существующей помеховой обстановки.

Для реализации таких антенных систем требуется выполнение следующих условий: возможность интеграции полотна излучателей с устройствами обработки сигнала, производство с ними в едином технологическом цикле, высокая повторяемость характеристик, невысокая стоимость, низкие массогабаритные показатели. Одним из типов ФАР, удовлетворяющих этим условиям, являются микрополосковые ФАР. Однако им свойственен эффект «ослепления», когда при отклонении луча от направления, перпендикулярного плоскости ФАР, в ее диаграмме направленности (ДН) появляется фиксированный провал, что приводит к ограничениям допустимого сектора сканирования ФАР, и, в свою очередь, влечет за собой увеличение количества ФАР, необходимых для обеспечения требуемого покрытия. Наиболее часто применяемым методом борьбы с эффектом «ослепления» является использование в плоских микрополосковых ФАР тонких подложек с небольшой относительной диэлектрической проницаемостью, что, однако, приводит к ухудшению частотных свойств излучателей и к уменьшению электрической прочности ФАР.

Для борьбы с явлением «ослепления» в микрополосковых ФАР более эффективным является предлагаемый в работе переход от однослойной диэлектрической подложки к двухслойной. В настоящее время использование двухслойных диэлектрических подложек для этой цели в микрополосковых антеннах недостаточно хорошо исследовано как в теоретическом, так и в практическом его аспектах. Поэтому проведенные в диссертации теоретические исследования возможности расширения широкоугольных свойств микрополосковых ФАР путем перехода от однослойной диэлектрической подложки к двухслойной диэлектрической подложке являются актуальными. Результаты этих исследований позволяют утверждать, что становится возможным отдалить угол «ослепления» ФАР дальше от направления, перпендикулярного плоскости решетки, при сохранении общей толщины подложки или сохранить сектор углов сканирования без «ослепления» при некотором увеличении общей толщины подложки. Практическая значимость проведенных в работе исследований и полученных в ней результатов заключается в реко-

мендации о возможности использования в микрополосковых ФАР сравнительно толстых подложек и больших значений относительной диэлектрической проницаемости без эффекта «ослепления» в секторе углов сканирования, что, в свою очередь, позволит использовать более широкополосные элементы в составе ФАР, а также элементы, работающие в нескольких полосах частот.

Степень разработанности темы. Теоретические исследования эффекта «ослепления» в ФАР с диэлектрическим покрытием представлены в работах Hansen R.C., Amitay N., Galindo V., Wu C.P., Mailloux R.J.. Эффект «ослепления» в микрополосковых ФАР рассмотрен в работах Pozar D.M., Schaubert D.H., Bhattacharyya A.K., Mailloux R.J. В работах Amitay N., Galindo V., Wu C.P., Pozar D.M., Schaubert D.H., Bhattacharyya A.K. приводится метод определения углов «ослепления» для случая ФАР с обычной однослойной диэлектрической подложкой.

Разработанный в диссертации переход от однослойной диэлектрической подложки к двухслойной диэлектрической подложке с целью отдаления углов «ослепления» ранее не рассматривался, однако в ряде работ (В.В. Чебышев, Б.А. Панченко, Е.И. Нефедов, А.Ю. Гринев, Ю.В. Котов, А.О. Касьянов) по микрополосковым антеннам и антенным решеткам представлены методы расчета характеристик и параметров микрополосковых антенн и микрополосковых антенных решеток при использовании многослойных диэлектрических подложек. Для борьбы с эффектом «ослепления» обычно предлагается использовать сравнительно тонкие подложки с небольшой относительной диэлектрической проницаемостью (Д.И. Воскресенский), также в последнее время рассматривается метод использования в качестве подложек метаматериалов (частотно-селективных структур) (Д.И. Воскресенский, А.Ю. Гринев, А.О. Касьянов, Т. Срепин, G. Donzelli, S.S. Holland). Использование тонких подложек накладывает ограничения на частотные свойства излучателей и уменьшает электрическую прочность ФАР. По сравнению с применением метаматериалов в качестве подложек, использование двухслойной диэлектрической подложки позволяет сделать конструкцию микрополосковой ФАР более простой и с меньшими массогабаритными показателями.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования выбраны плоские микрополосковые фазированные антенные решетки с прямоугольной сеткой расположения излучателей, предметом исследования – их широкоугольные свойства при сканировании, ограничиваемые эффектом «ослепления».

Цель работы. Целью работы является решение научной задачи расширения широкоугольных свойств микрополосковых фазированных антенных решеток за счет увеличения угла «ослепления» путем перехода от однослойной к двухслойной диэлектрической подложке.

Достижение сформулированной цели потребовало решения следующих научно-технических задач:

1. научное обоснование и сравнение ограничений, накладываемых эффектом «ослепления» на сектор углов сканирования микрополосковых ФАР с однослойной и двухслойной подложками;

2. развитие возможностей применения двухслойной диэлектрической подложки в микрополосковых ФАР для увеличения углов «ослепления»;

3. проведение сравнительного анализа глубины провала в диаграмме направленности центрального элемента микрополосковой ФАР с однослойной и двухслойной диэлектрическими подложками вследствие влияния эффекта «ослепления»;

4. разработка нового подхода к определению влияния эффекта «ослепления» на коэффициент усиления микрополосковых ФАР с однослойной и двухслойной диэлектрическими подложками в широком секторе углов сканирования;

5. разработка нового алгоритма решения задачи выбора совокупности параметров двухслойной диэлектрической подложки по заданному уровню снижения коэффициента усиления микрополосковой ФАР в широком секторе углов сканирования.

Научная новизна работы заключается в изложении новых научно обоснованных технических решений для расширения широкоугольных свойств микрополосковых фазированных антенных решеток, в частности:

1. теоретически доказано, что применение двухслойной диэлектрической подложки позволяет увеличить угол «ослепления» микрополосковой ФАР по сравнению с микрополосковой ФАР с однослойной подложкой той же толщины;

2. проведена оценка и сравнение влияния угла «ослепления» ФАР на снижение коэффициента усиления в секторе углов сканирования и на глубину провала в ДН центрального элемента в микрополосковых ФАР с однослойной и двухслойной диэлектрическими подложками;

3. предложен новый алгоритм определения параметров двухслойной диэлектрической подложки по заданному уровню снижения коэффициента усиления микрополосковой ФАР в секторе углов сканирования.

Теоретическая значимость работы заключается в результатах анализа широкоугольных свойств микрополосковых ФАР с двухслойной диэлектрической подложкой в отношении эффекта «ослепления» и разработанном алгоритме определения параметров двухслойной диэлектрической подложки по заданному уровню неравномерности коэффициента усиления микрополосковой ФАР в секторе углов сканирования.

Практическая значимость работы заключается в демонстрации возможности использования в микрополосковых ФАР сравнительно толстых подложек и больших значений относительной диэлектрической проницаемости без эффекта «ослепления», что, в свою очередь, позволит проектировать плоские микрополосковые ФАР, способные осуществлять сканирование в широком секторе углов. Кроме того, применение таких подложек позволит использовать более широкополосные элементы в составе ФАР, а также элементы, работающие в нескольких полосах частот.

Личный вклад. Все основные результаты, составляющие содержание диссертации, получены соискателем самостоятельно.

Методология и методы исследований. В работе использован метод интегральных уравнений, метод решения волнового уравнения, метод использования мод Флоке, компьютерное моделирование с применением современного средства электродинамического моделирования. Основные теоретические результаты были подтверждены результатами экспериментальных исследований макета микрополосковой антенной решетки с двухслойной диэлектрической подложкой.

Достоверность. Достоверность результатов, полученных в ходе диссертационной работы, обеспечена выбором непротиворечивого и адекватного рассматриваемым задачам математического аппарата. Предложенные теоретические выкладки подтверждаются моделированием и результатами экспериментальных исследований макета микрополосковой антенной решетки с двухслойной диэлектрической подложкой.

Апробация результатов. Полученные результаты опубликованы в различных специализированных изданиях в области теории и практики антенн, неоднократно докладывались на всероссийских и международных научно-технических конференциях по антенной тематике, а также обсуждались на заседаниях кафедры технической электродинамики и антенн Московского технического университета связи и информатики.

Основные результаты диссертационной работы обсуждались и получили одобрение на следующих научных конференциях: Международная отраслевая научно-техническая конференция «Технологии информационного общества», г. Москва, МТУСИ, 2016-2019; Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо), г. Севастополь, 2016, 2018; Всероссийская конференция (с международным участием) «Радиоэлектронные средства получения, обработки и визуализации информации» (РСПОВИ), г. Москва, РНТОРЭС им. А.С. Попова, 2016-2017; Международная научно-техническая конференция «INTERMATIC», Москва, МИРЭА, 2016-2018; Всероссийская микроволновая конференция «Московская микроволновая неделя», Москва, ИРЭ РАН им. В.А. Котельникова, 2018; 7-я Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли», Москва, АО «Корпорация «ВНИИЭМ»», 2019; I International conference technology & entrepreneurship in digital society, Москва, Финансовый университет при Правительстве г. Москвы, 2018; Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russia, 2018, 2020.

Реализация и внедрение результатов. Результаты диссертационной работы были использованы и внедрены в СЧ ОКР «Разработка перспективного возимого комплекса навигационно-связного оборудования для передачи навигационных данных системы ГЛОНАСС и речи», шифр «Элемент-Поток РС», выполненной в НИИР им. М.И. Кривошеева. Кроме того, результаты диссертационной работы были использованы при проведении НИР на тему

«Разработка и исследование микрополосковых и щелевых излучателей в составе фазированных антенных решеток» (номер государственной регистрации ААА-Б19-219021290164-1), выполненной в МТУСИ, и используются в учебном процессе кафедры технической электродинамики и антенн МТУСИ (дисциплины “Теория и методы расчета антенн для систем радиорелейной, спутниковой связи и радиодоступа” и “Компьютерное проектирование антенных систем”) и наиболее полно отражены в учебном пособии «Микрополосковые антенные решетки с широкоугольным сканированием на многослойной подложке» (изд. ЭБС МТУСИ, 2020 г., автор Ястребцова О.И.).

Копии актов о внедрении и использовании результатов работы включены в приложение.

Публикации. Наиболее важные результаты диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых научно-технических журналах, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки (6 работ), основными из которых являются следующие: Ястребцова О.И. Электродинамический анализ волн в направляющих многослойных структурах. Статья. // Антенны. – М.: 2016, №12 (232) – с. 22-32; Ястребцова О.И. Условия отсутствия «ослепления» у микрополосковых антенных решеток. Статья. // Труды МАИ. – М.: №97, 16 с.; Ястребцова О.И. Метод улучшения электрических характеристик в широком диапазоне углов микрополосковых антенных решеток. Статья. // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М.: 2019, т. 171, №4 – с. 39-44.

Кроме того, основные теоретические и экспериментальные результаты работы опубликованы в материалах различных всероссийских и международных научно-технических конференций по антенной тематике: Ястребцова О.И. Ограничение распространения поверхностных волн путем применения для микрополосковых антенн многослойных подложек. В сборнике: 26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо’2016). Материалы конференции: в 13 т., 2016. – с. 1016-1022; Ястребцова О.И. Явление «ослепления» в микрополосковых антенных решетках с двухслойной диэлектрической подложкой. В сборнике: 28-я Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо’2018). Материалы конференции. 2018. – с. 627-633; Ястребцова О.И. Метод борьбы с явлением «ослепления» в микрополосковых антенных решетках. Доклады VI Всероссийской микроволновой конференции «Московская микроволновая неделя», 28-30 ноября 2018 г., Москва, ИРЭ РАН им. В.А. Котельникова, 2018. - с. 29-33; Ястребцова О.И. Метод улучшения широкоугольных свойств микрополосковых антенных решеток. Тезисы докладов 7-ой Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». - Москва, АО «Корпорация «ВНИИЭМ»», 2019. - с. 128-130.

Всего по результатам исследований, проведенных в работе, опубликовано 27 печатных работ.

Структура и объем работы. Основной текст диссертации изложен на 158 страницах и включает введение, четыре главы, заключение и приложение.

ния. Список литературы содержит 97 наименований. В работе представлено 117 рисунков и 3 таблицы.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Применение двухслойных диэлектрических подложек для микрополосковых ФАР позволяет увеличить угол «ослепления» на величину до 42-х градусов при полуволновом периоде антенной решетки и на величину до 32-х градусов при периоде решетки $0,6\lambda$ по сравнению с микрополосковыми ФАР с однослойными диэлектрическими подложками той же толщины с той же относительной диэлектрической проницаемостью, что и верхний слой двухслойной диэлектрической подложки.

2. Сектор углов сканирования микрополосковых ФАР с однослойной и двухслойной диэлектрическими подложками при угле «ослепления», равном 50-и градусам, сокращается на 12 градусов при допустимом уровне неравномерности коэффициента усиления в секторе 3 дБ и на 4 градуса при допустимом уровне неравномерности коэффициента усиления 1 дБ по сравнению с идеализированным случаем использования диаграммы направленности одиночного элемента.

3. Разработанный алгоритм определения параметров двухслойной диэлектрической подложки по заданному уровню неравномерности коэффициента усиления микрополосковой ФАР из прямоугольных патч-излучателей позволяет получить заданный сектор углов сканирования с погрешностью не более 4-х градусов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы, решаемые в ней задачи и положения, выносимые на защиту, а также приведена структура разделов диссертации. Кроме того, во введении содержатся сведения о публикациях и апробации работы.

В первой главе приводится описание существующих методов борьбы с эффектом «ослепления» в плоских ФАР, основанных, в основном, на ограничении распространения поверхностных волн в подложке.

В диссертации для отдаления угла «ослепления» от направления, перпендикулярного поверхности решетки, рассматривается переход от однослойной диэлектрической подложки к двухслойной диэлектрической подложке. Показано, что при таком переходе происходит расширение рабочей полосы частот одиночного излучателя.

Во второй главе приводятся основные соотношения, позволяющие провести анализ эффекта «ослепления» в бесконечных микрополосковых ФАР с обычной подложкой в виде одного слоя диэлектрика с целью последующего сравнения с результатами для ФАР с двухслойной диэлектрической подложкой.

Дается описание существующего метода определения углов «ослепления» на основе построений на плоскости волновых чисел с использованием хорошо известных дисперсионных уравнений для определения фазовых по-

стоянных поверхностных волн электрического и магнитного типов в одно-слойной диэлектрической подложке на проводящем экране.

На основе этого метода сформулированы условия (1), позволяющие определить, оказывается ли угол «ослепления», ближайший к направлению, перпендикулярному плоскости решетки, в секторе углов сканирования $\theta_{\max id}$:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_0 \sin \theta_{\max id} < \left\lfloor \frac{\beta}{2\pi/d_x} \right\rfloor < \frac{2\pi}{d_x} - k_0 \sin \theta_{\max id} \\ k_0 \sin \theta_{\max id} < \left\lfloor \frac{\beta}{\sqrt{\left(\frac{2\pi}{d_x}\right)^2 + \left(\frac{2\pi}{d_y}\right)^2}} \right\rfloor < \sqrt{\left(\frac{2\pi}{d_x}\right)^2 + \left(\frac{2\pi}{d_y}\right)^2} - k_0 \sin \theta_{\max id}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где β - фазовая постоянная поверхностной волны, определяемая как решение дисперсионного уравнения, k_0 - волновое число в воздухе, d_x , d_y - расстояния между излучающими элементами по горизонтали и вертикали. Знаком [...] обозначена операция взятия остатка от деления. Эти условия, как показано в третьей главе диссертации, в полной мере применимы к ФАР с двухслойными диэлектрическими подложками.

При выполнении в условиях (1) хотя бы одного равенства, угол $\theta_{\max id}$ совпадает с первым углом «ослепления» ФАР. Зависимости этого угла «ослепления» от параметров слоя диэлектрика подложки (относительной диэлектрической проницаемости и толщины слоя) показаны на Рисунках 2а) и 2б), на которых по вертикальной оси отмечены углы «ослепления» ($\theta_{осп}$), ближайшие к направлению, перпендикулярному плоскости решетки, а по горизонтали – нормированная толщина слоя диэлектрика (H_1/λ). Кривые построены для трех различных значений относительных диэлектрических проницаемостей слоя, расстояние между излучающими элементами на Рисунке 1а) составляет $0,5\lambda$, на Рисунке 1б) - $0,7\lambda$.

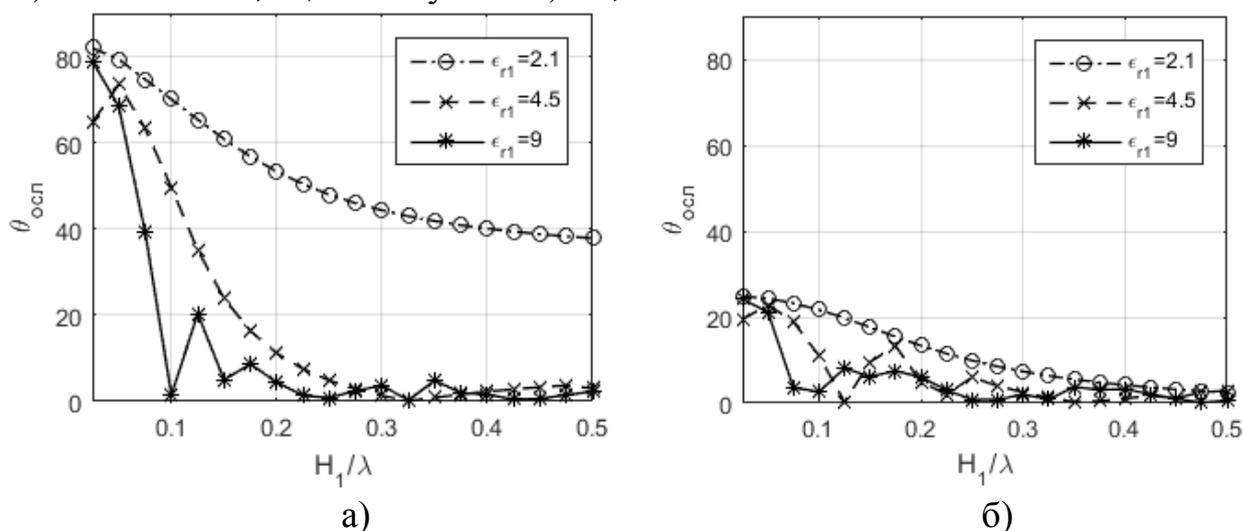


Рисунок 1 - Первый угол «ослепления» для ФАР с однослойной подложкой при расстоянии между излучающими элементами $0,5\lambda$ (а) и $0,7\lambda$ (б)

Из сравнения Рисунков 1а) и 1б) следует, что при прочих равных условиях при увеличении расстояния между элементами первый угол «ослепления» становится ближе к направлению, перпендикулярному плоскости антенной решетки. При постоянном расстоянии между элементами увеличение толщины подложки приводит к увеличению величины фазовой постоянной поверхностной волны, а, начиная с некоторого значения толщины, к возбуждению поверхностной волны магнитного типа, что значительно сокращает сектор углов сканирования. Аналогичный процесс происходит и при увеличении относительной диэлектрической проницаемости слоя при постоянной толщине подложки. При этом следует отметить, что при расстоянии между излучающими элементами $0,7\lambda$ дифракционный лепесток в области действительных углов появляется при угле сканирования 23° , однако наличие эффекта «ослепления» приводит к тому, что осуществлять сканирование до этого угла и далее невозможно из-за провала в ДН элемента в решетке. Таким образом, представленные в первой главе результаты указывают на необходимость применения методов, позволяющих отдалить углы «ослепления» дальше от направления, перпендикулярного плоскости антенной решетки.

В третьей главе проведен анализ эффекта «ослепления» в бесконечных микрополосковых ФАР с двухслойной диэлектрической подложкой путем развития методики определения углов «ослепления», описанной в предыдущей главе.

Представлен анализ поверхностных волн в двухслойных диэлектрических подложках на проводящем экране, в результате которого получены следующие дисперсионные уравнения (уравнение (3) - для поверхностных волн электрического типа, уравнение (4) - для поверхностных волн магнитного типа):

$$\varepsilon_1 \varepsilon_2 \gamma_0 \gamma_1 - \varepsilon_1^2 \gamma_0 \gamma_2 \operatorname{tg} \gamma_1 H_1 \operatorname{tg} \gamma_2 H_2 - \varepsilon_0 \varepsilon_2 \gamma_1^2 \operatorname{tg} \gamma_1 H_1 - \varepsilon_0 \varepsilon_1 \gamma_1 \gamma_2 \operatorname{tg} \gamma_2 H_2 = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\gamma_1 \gamma_2}{\mu_1 \mu_2} + \frac{\gamma_0 \gamma_2}{\mu_0 \mu_2} \tan \gamma_1 H_1 - \left(\frac{\gamma_1}{\mu_1} \right)^2 \tan \gamma_1 H_1 \tan \gamma_2 H_2 + \frac{\gamma_0 \gamma_1}{\mu_0 \mu_1} \tan \gamma_2 H_2 = 0, \quad (4)$$

где ε_1, μ_1 - параметры верхнего слоя диэлектрика толщиной H_1 ; ε_2, μ_2 - параметры нижнего слоя диэлектрика толщиной H_2 ; γ_0, γ_1 и γ_2 - поперечные волновые числа в воздухе и в соответствующем диэлектрике, определяемые следующим образом: $\gamma_0 = \sqrt{\beta^2 - k_0^2}$, $\gamma_1 = \sqrt{k_1^2 - \beta^2}$, $\gamma_2 = \sqrt{k_2^2 - \beta^2}$, где, в свою очередь, k_0, k_1 и k_2 - волновые числа в воздухе и в верхнем и нижнем слоях диэлектрика, соответственно.

Проведен анализ свойств поверхностных волн в двухслойной диэлектрической подложке на проводящем экране. На Рисунке 2 приведены кривые, показывающие условия возбуждения первой поверхностной волны магнитного типа. Параметром кривых является относительная диэлектрическая проницаемость верхнего слоя (ε_{r1}), линиями для определенной относительной диэлектрической проницаемости показана минимальная толщина верхнего (H_1) (по горизонтальной оси) и нижнего слоя (H_2) (по вертикальной оси), при которых появляется первая поверхностная волна магнитного типа.

Таким образом, допустимая область одноволнового режима работы, т.е. когда возбуждается только одна поверхностная волна электрического типа, располагается левее соответствующей линии на Рисунке 2. В качестве нижнего слоя был взят диэлектрик с относительной диэлектрической проницаемостью 2,5.

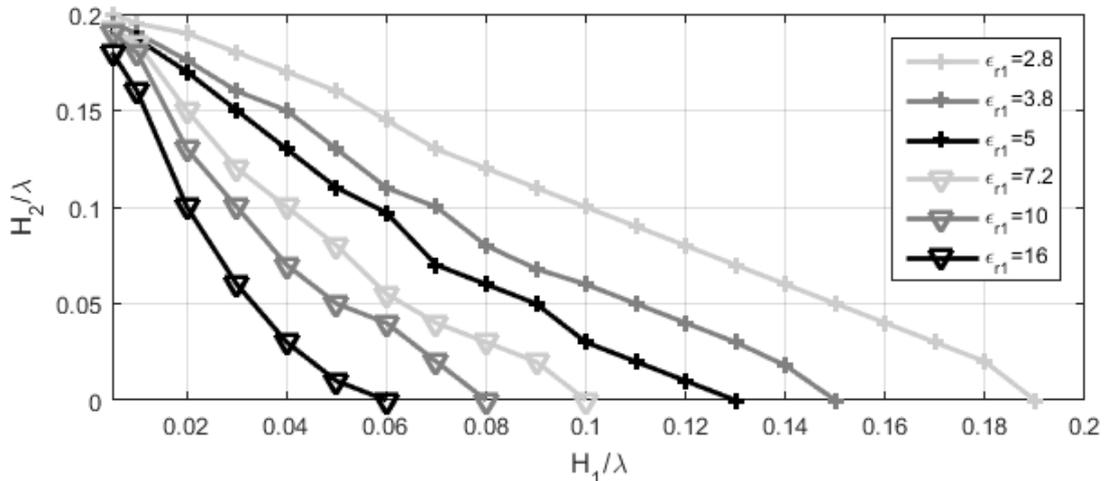


Рисунок 2 - Отсечка поверхностной волны магнитного типа в двухслойной подложке при нижнем слое в виде диэлектрика с относительной диэлектрической проницаемостью 2,5

Значения толщины верхнего слоя H_1 при толщине нижнего слоя H_2 , равной нулю, соответствуют условиям отсечки поверхностной волны магнитного типа в однослойной подложке.

Показана применимость методики (1) для определения углов «ослепления» микрополосковой ФАР с двухслойной диэлектрической подложкой при использовании дисперсионных уравнений (3) и (4) для определения фазовой постоянной поверхностной волны. В приложении к диссертации представлены результаты моделирования бесконечных ФАР четырех типов: из микрополосковых полуволновых диполей с двухслойной подложкой, из прямоугольных и из круглых патч-излучателей с двухслойной подложкой, а также из щелевых антенн с двумя слоями покрытия, показывающие применимость этой методики.

Для подтверждения теоретических результатов были проведены экспериментальные исследования макета микрополосковой антенной решетки с двухслойной подложкой (структурная схема экспериментальной установки приведена на Рисунке 3).



Рисунок 3 - Структурная схема экспериментальной установки

Изготовленный макет микрополосковой антенной решетки содержал 7×17 прямоугольных элементов, и был рассчитан на работу в полосе частот 5,19-5,5 ГГц. В качестве нижнего слоя диэлектрика использовался воздух,

верхний слой представлял собой материал ФЛАН с относительной диэлектрической проницаемостью 7,2. На разработанном макете были проведены измерения ДН центрального элемента на частотах 5200 МГц и 5400 МГц. Результаты проведенных экспериментальных исследований показали качественное совпадение углов «ослепления» данной антенной решетки с результатами расчетов. В частности, путем применения методики определения углов «ослепления» были получены значения этих углов для двухслойной антенной решетки, равные 24° на частоте 5200 МГц и 22° - на частоте 5400 МГц. Из экспериментальных результатов ДН центрального элемента макета антенной решетки с двухслойной подложкой на этих частотах были определены значения углов «ослепления», которые оказались равными 24° (Рисунок 4а)) и 22° (Рисунок 4б)), соответственно.

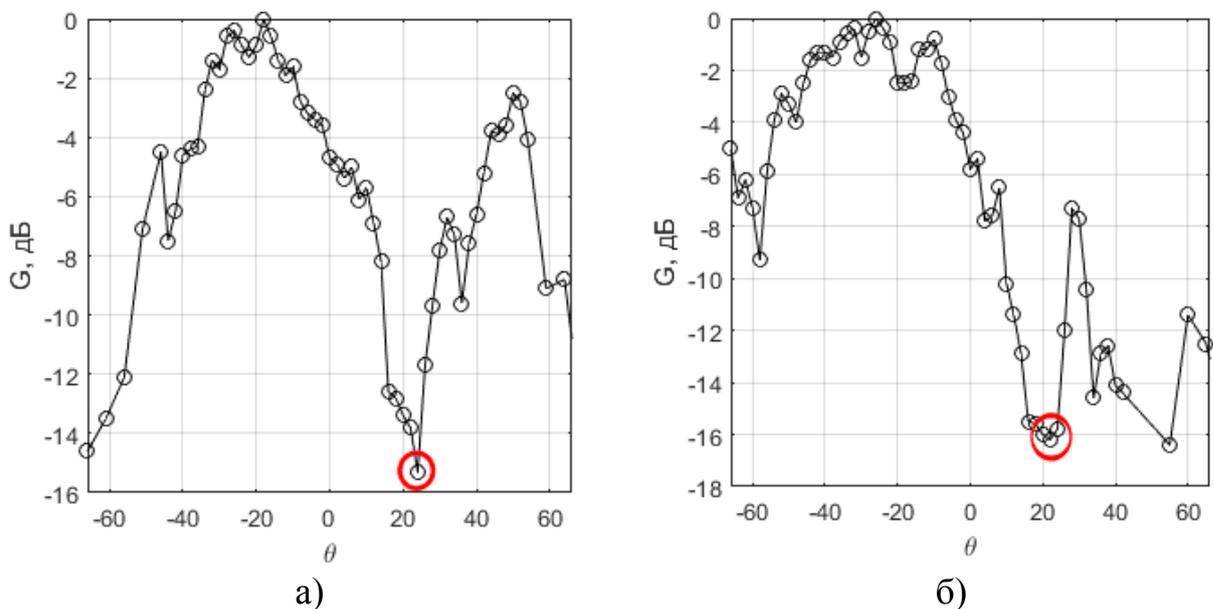


Рисунок 4 - Измеренные ДН центрального элемента макета антенной решетки на частотах 5200 МГц (а) и 5400 МГц (б)

Произведено сравнение широкоугольных свойств микрополосковых ФАР с однослойной и двухслойной диэлектрическими подложками. При сравнении ограничений на сектор углов сканирования следует учитывать, что в связи с тем, что поверхностные волны являются медленными волнами, углы «ослепления» при использовании тонких подложек, работающих в одноволновом режиме, всегда будут возникать до угла сканирования, при котором в области действительных углов появляется дифракционный лепесток, и, поэтому, более этого угла сектор сканирования ФАР расширен быть не может.

На Рисунках 5а) и 5б) представлены зависимости углов «ослепления», ближайших к направлению, перпендикулярному плоскости решетки, для ФАР с однослойной и двухслойной подложками от толщины единственного слоя для однослойной подложки и суммарной толщины слоев - для двухслойных подложек. Серыми линиями изображены углы ослепления для однослойных подложек, черными – для двухслойных подложек. Анализ был

проведен на частоте 8,2 ГГц. Для двухслойных подложек в качестве нижнего, прилегающего к экрану слоя, для примера была взята воздушная прослойка высотой 2 мм, верхний слой выполнен из тех же материалов, что и для однослойных подложек, изображенных тем же типом линии. Расстояние между излучающими элементами было взято полуволновым. На Рисунке 5а) относительные диэлектрические проницаемости одного слоя однослойной подложки и верхнего слоя двухслойной подложки равны 2,8, 3,8 и 5, на Рисунке 5б) – 7,2, 10 и 16.

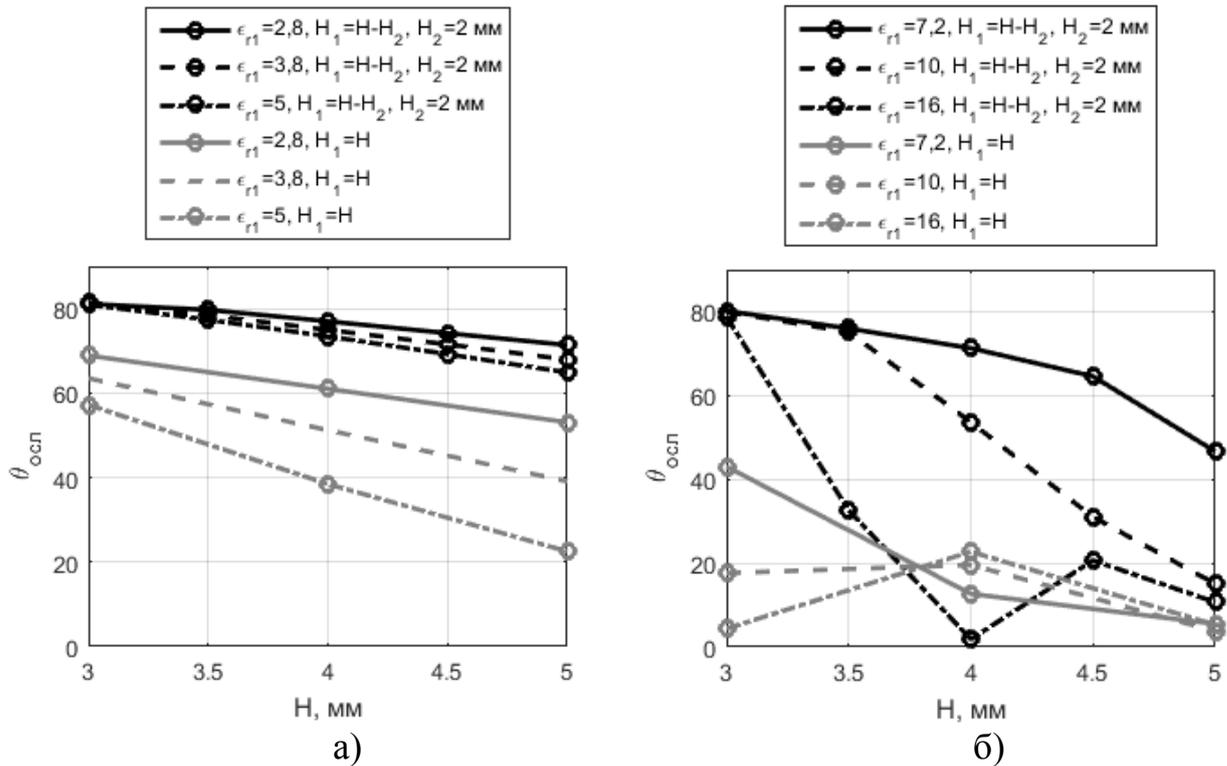


Рисунок 5 - Сравнение первых углов «ослепления» ФАР с однослойной и двухслойной подложками при относительных диэлектрических проницаемостях 2,8, 3,8 и 5 - (а) и 7,2, 10 и 16 - (б)

Из Рисунков 5а) и 5б) видно, что при одинаковых параметрах ФАР с однослойной и двухслойной подложками (одинаковая суммарная толщина подложки, верхний слой двухслойной подложки выполнен из того же материала, что и однослойная подложка) эффект «ослепления» в ФАР с двухслойной подложкой наступает при большем значении угла отклонения максимума ее ДН от направления, перпендикулярного плоскости решетки.

На основе условий (1) был построен Рисунок 6, на котором в зависимости от расстояния между излучающими элементами и фазовой постоянной поверхностной волны изображены первые углы ослепления.

Делается вывод, что только при использовании таких подложек, в которых фазовая постоянная поверхностной волны оказывается по величине как можно ближе к волновому числу в воздухе, сектор углов сканирования ФАР оказывается сравнительно широким. Таким образом, для устранения ограничений сектора сканирования ФАР вследствие эффекта «ослепления»

необходимо обеспечить минимально возможное значение фазовой постоянной поверхностной волны.

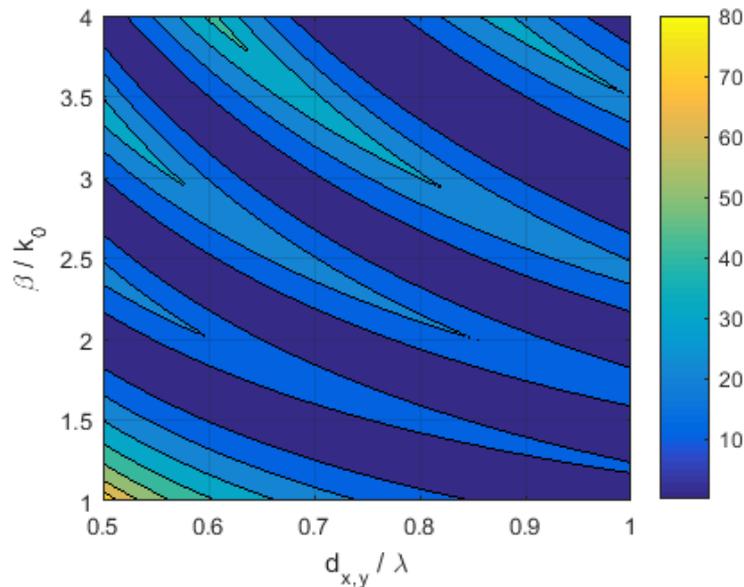


Рисунок 6 - Первый угол «ослепления» в зависимости от свойств поверхностной волны и расстояния между элементами

Было проведено сравнение значений фазовых постоянных поверхностных волн в однослойной и двухслойной подложках при выборе суммарной толщины двухслойной подложки, равной толщине однослойной подложки, и верхнем слое в виде диэлектрика с той же относительной диэлектрической проницаемостью, что и единственный слой однослойной подложки. На Рисунке 7 штриховой и штрихпунктирной линиями изображены фазовые постоянные для двухслойных подложек, имеющих такую же суммарную толщину подложки, что и однослойная подложка. Сплошной линией показана кривая фазовой постоянной для однослойной подложки. Относительная диэлектрическая проницаемость верхнего слоя двухслойной подложки равна этой величине для однослойной подложки, а нижний слой двухслойной подложки имеет относительную диэлектрическую проницаемость, близкую к воздуху.

Делается вывод, что кривые фазовых постоянных для двухслойных подложек расположены ниже аналогичных кривых для однослойной подложки той же толщины, то есть при одинаковых относительных диэлектрических проницаемостях верхнего слоя и суммарной толщине подложки фазовая постоянная в двухслойной подложке оказывается меньше, чем в однослойной. С учетом Рисунка 6, меньшая величина фазовой постоянной поверхностной волны в двухслойной подложке напрямую свидетельствует о расширении сектора сканирования при переходе от однослойной подложки к двухслойной той же толщины, либо к сохранению сектора углов сканирования при увеличении суммарной толщины подложки. Следует отметить, что увеличение суммарной толщины двухслойной подложки будет способствовать увеличению допустимой излучаемой мощности за счет увеличения электрической прочности ФАР.

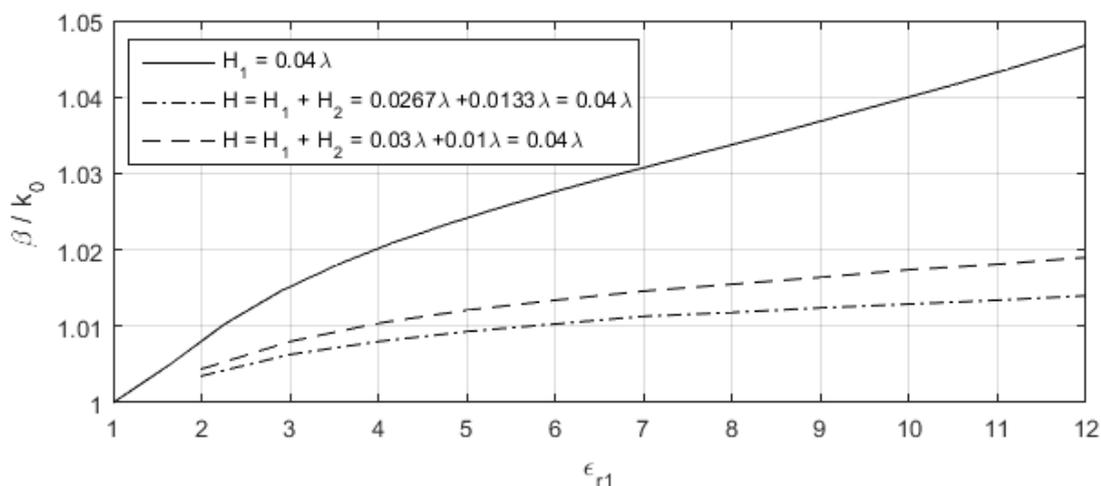


Рисунок 7 - Сравнение фазовых постоянных поверхностных волн в однослойной и двухслойной подложках при суммарной толщине подложки $0,04\lambda$

Таким образом, в третьей главе показано, что применение двухслойной диэлектрической подложки позволяет отодвинуть угол «ослепления» дальше от направления, перпендикулярного плоскости ФАР, по сравнению с аналогичной ФАР с однослойной подложкой, т.е. становится возможным улучшение ее широкоугольных свойств.

В четвертой главе рассмотрены закономерности поведения провала в ДН центрального элемента конечных микрополосковых ФАР за счет эффекта «ослепления» с однослойной и двухслойной диэлектрическими подложками, а также проанализировано понижение коэффициента усиления (КУ) элемента АР в секторе сканирования за счет угла «ослепления», расположенного вне этого сектора. Результаты получены путем моделирования микрополосковых ФАР с различными подложками и с различным количеством элементов, излучателями являются прямоугольные патч-излучатели.

Проанализировано изменение формы провала за счет эффекта «ослепления» в зависимости от размера микрополосковой ФАР. Проанализированы зависимости уменьшения КУ в районе «ослепления» по сравнению с КУ в направлении перпендикуляра к плоскости антенной решетки, а также ширина провала за счет эффекта «ослепления» по уровню плюс 3 дБ от минимума от размера решетки. По результатам этого анализа отмечается, что при постепенном увеличении размера решетки с определенного момента, начиная примерно с размера решетки 19×19 элементов, как в однослойной, так и в двухслойной микрополосковых ФАР происходит стабилизация этих двух параметров, т.е. форма ДН центрального элемента для решеток большого размера перестает зависеть от краевых эффектов. Также можно отметить, что при увеличении размера ФАР происходит одновременное сужение и углубление провала до определенного предела.

Проведен анализ изменения формы провала за счет «ослепления» в зависимости от величины угла «ослепления» для однослойной и двухслойной микрополосковых ФАР. На Рисунке 8а) приведена зависимость уменьшения

КУ в районе «ослепления» по сравнению с КУ в направлении перпендикуляра к плоскости антенной решетки, на Рисунке 8б) – зависимость ширины провала за счет эффекта «ослепления» по уровню плюс 3 дБ от минимума, по горизонтальной оси на обоих рисунках отмечены углы «ослепления». Серые линии соответствуют двум микрополосковым ФАР с различными однослойными подложками, черные линии – ФАР с двумя различными двухслойными подложками. Сдвиг углов «ослепления» для каждого типа подложки осуществлялся путем изменения расстояния между элементами, размер решеток - 27×27 элементов.

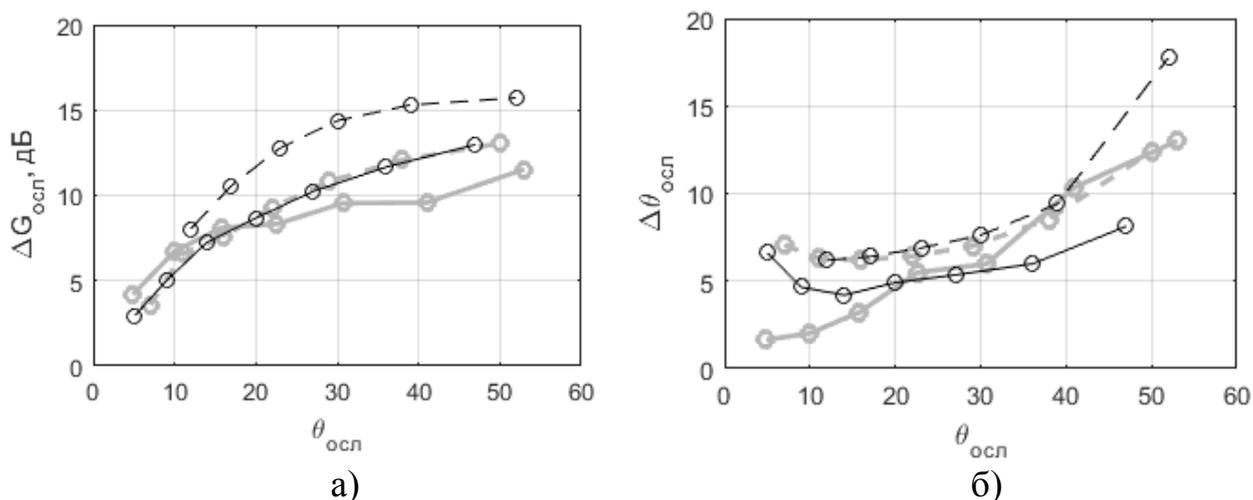


Рисунок 8 - Понижение КУ в районе «ослепления» по сравнению с КУ в направлении перпендикуляра к плоскости решетки - (а) и ширина провала при «ослеплении» - (б) в зависимости от угла «ослепления»

По результатам проведенного анализа изменения формы провала за счет «ослепления» в зависимости от величины угла «ослепления» можно отметить, что чем больше величина угла «ослепления», тем глубже оказывается провал (Рисунок 8а), и тем он шире (Рисунок 8б). Отклонение от этого правила при углах «ослепления» менее примерно 10° связано с тем, что при этом происходит значительная деформация формы всей ДН центрального элемента и уровень плюс 3 дБ от минимума приближается к 0° .

С учетом того, что провал при «ослеплении» оказывается достаточно широким, и он оказывает влияние на форму ДН центрального элемента решетки в направлениях, значительно отстоящих от самого угла «ослепления», был рассмотрен эффект снижения КУ в секторе сканирования в зависимости от угла «ослепления», расположенного вне этого сектора.

Схематично рассмотренная ситуация изображена на Рисунке 9, где сплошной линией показана ДН центрального элемента ФАР с «ослеплением», штриховой – ДН одиночного элемента. За счет возникновения эффекта «ослепления» сектор углов сканирования, в котором КУ антенной решетки имеет неравномерность не более величины ΔG , сокращается по сравнению с величиной $\theta_{ид}$ на величину $\Delta\theta$, в результате чего половина допустимого сектора сканирования ФАР оказывается равной θ_{max} .

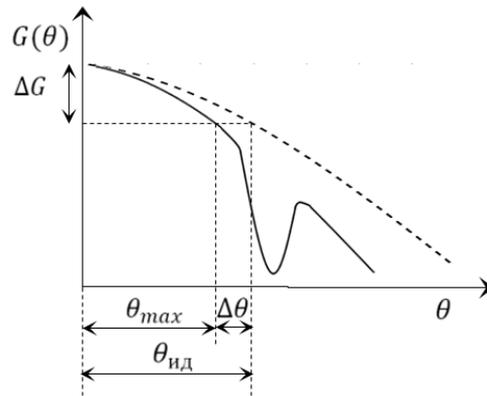


Рисунок 9 - Схематичный рисунок снижения КУ АР за счет эффекта «ослепления»

Для нескольких микрополосковых ФАР из патч-излучателей (трех однослойных и двух двухслойных с различными параметрами диэлектрических подложек размером 27×27 элементов) были рассчитаны зависимости максимальных углов сканирования θ_{max} , при которых происходит уменьшение КУ антенной решетки на 1 дБ, 2 дБ и 3 дБ, от угла «ослепления» $\theta_{осл}$. Далее, чтобы исключить из этой величины спад ДН одиночного элемента, было произведено вычитание значения сектора сканирования идеализированной АР, в которой отсутствует эффект «ослепления» и взаимодействие между элементами, для каждого уровня неравномерности КУ АР ($\theta_{ид}$). Таким образом, была получена величина $\Delta\theta$ (схематично показана на Рисунке 9) в зависимости от углов «ослепления». На Рисунке 10 значками изображена величина $\Delta\theta$ для пяти различных ФАР при уменьшении КУ на 1 дБ, 2 дБ и 3 дБ, крестиками и треугольниками различного направления изображены три ФАР с однослойной подложкой, кружочками – две ФАР с двухслойной подложкой.

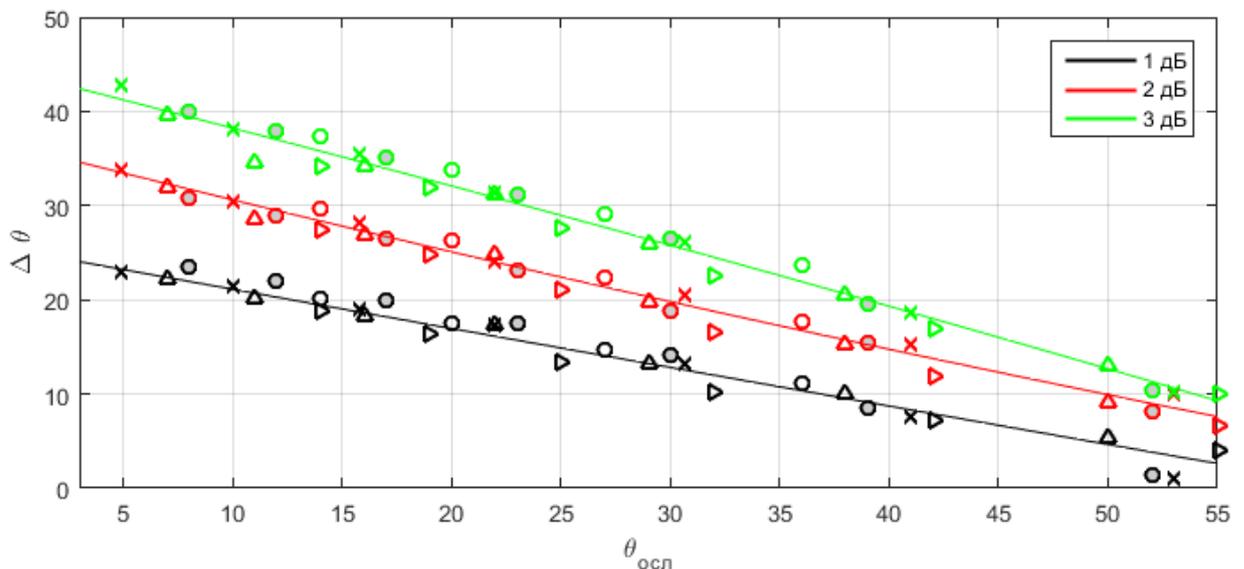


Рисунок 10 - Сокращение сектора сканирования в зависимости от угла «ослепления»

Точки, изображенные на Рисунке 10 для каждого уровня неравномерности КУ АР, были аппроксимированы следующими полиномами для каждого уровня неравномерности КУ АР (1 дБ, 2 дБ и 3 дБ), переменной является угол «ослепления» $\theta_{осл}$:

$$\begin{aligned}\Delta\theta_{1\text{ дБ}} &= 0,0001459\theta_{осл}^2 - 0,4205412\theta_{осл} + 25,314 \\ \Delta\theta_{2\text{ дБ}} &= 0,001164\theta_{осл}^2 - 0,5869\theta_{осл} + 36,3679 \\ \Delta\theta_{3\text{ дБ}} &= -0,0008574\theta_{осл}^2 - 0,587273\theta_{осл} + 44,18447\end{aligned}\quad (5)$$

Графики, рассчитанные по этим формулам, изображены на Рисунке 11 сплошными линиями.

Показано, что ошибка определения половины сектора углов сканирования по аппроксимационным формулам (5) не превосходит 2° .

Таким образом, с достаточно высокой точностью можно учесть снижение КУ микрополосковой ФАР в секторе углов сканирования, в котором обеспечено отсутствие углов «ослепления», по значению угла «ослепления», находящегося вне сектора сканирования. При этом достаточно знать ДН одиночного излучателя и угол «ослепления» исходя из параметров подложки и периода решетки, то есть для приблизительного определения характеристик микрополосковой ФАР можно не проводить расчет ДН всей антенной решетки.

Был разработан алгоритм определения параметров диэлектрической подложки по известным значениям неравномерности КУ (ΔG) в заданном секторе углов сканирования θ_{max} (блок-схема алгоритма представлена на Рисунке 11) для случая решетки из прямоугольных патч-излучателей. В процессе выполнения этого алгоритма в общем случае могут быть найдены как относительные диэлектрические проницаемости обоих слоев подложки, так и их толщина. Под «другими факторами» на Рисунке 11 подразумеваются внешние факторы, влияющие на выбор толщин слоев подложки, например: требование по обеспечению необходимой рабочей полосы ФАР, электрической прочности и т.д. Аппроксимация (5) используется в алгоритме на этапе определения величины $\Delta\theta$.

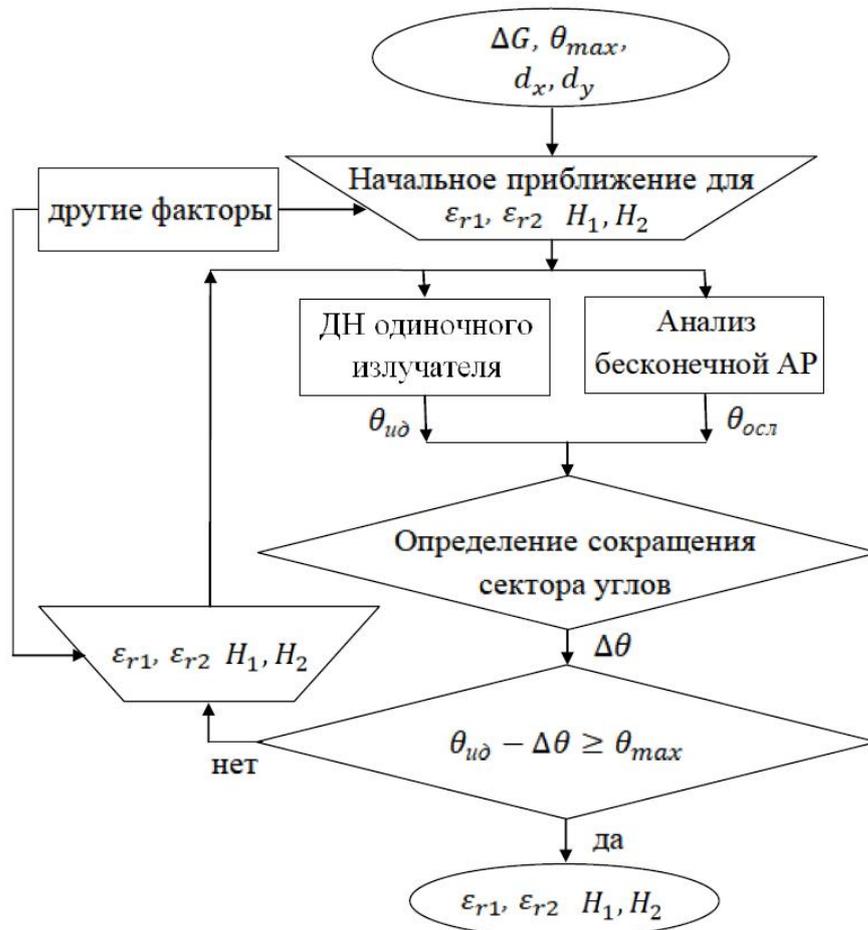


Рисунок 11 - Алгоритм определения параметров подложки по критерию обеспечения требуемой неравномерности КУ в секторе

Таким образом, в четвертой главе описан разработанный алгоритм определения параметров диэлектрической подложки двухслойной микрополосковой ФАР из прямоугольных патч-излучателей с размерами, при которых на ДН центрального элемента решетки перестают оказывать влияние краевые эффекты, по заданным значениям неравномерности КУ в секторе углов сканирования. Он позволяет, проводя на каждой итерации только расчет ДН одиночного излучателя, определить параметры диэлектрической подложки, реализация которых позволит обеспечить с достаточно высокой точностью требуемый уровень КУ ФАР в секторе сканирования. При этом угол «ослепления» определяется в приближении бесконечной антенной решетки на основе данных о параметрах двухслойной диэлектрической подложки и расстоянии между излучающими элементами.

В заключении сформулированы основные результаты работы и сделаны выводы по работе в целом.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Подтверждена экспериментально методика определения углов «ослепления» для микрополосковых ФАР с двухслойной диэлектрической

подложкой при использовании соответствующих дисперсионных уравнений для определения фазовых постоянных поверхностных волн.

2. Показано, что переход от однослойной диэлектрической подложки к двухслойной диэлектрической подложке в микрополосковых ФАР позволяет при сохранении общей толщины подложки расширить сектор углов сканирования путем увеличения угла «ослепления», частотные свойства при этом не ухудшаются. В частности, при переходе от микрополосковой ФАР с расстояниями между элементами $0,5\lambda$ с однослойной подложкой с относительной диэлектрической проницаемостью 7,2 толщиной $0,04\lambda$ к такой же ФАР, но с двухслойной диэлектрической подложкой, верхний слой которой выполнен из того же диэлектрика, а суммарная толщина подложки сохранена, угол «ослепления» смещается на величину до 4° дальше от направления, перпендикулярного плоскости решетки, в зависимости от выбора диэлектрика нижнего слоя и соотношения толщин слоев. При переходе от ФАР с однослойной подложкой толщиной $0,06\lambda$ к аналогичной ФАР с двухслойной подложкой происходит смещение угла «ослепления» уже на величину до 9° в зависимости от остальных параметров, при относительной диэлектрической проницаемости, равной 16, смещение «ослепления» может достигать $7,5^\circ$ при толщине подложки $0,04\lambda$ и 42° при толщине подложки $0,06\lambda$.

3. Результаты анализа снижения КУ микрополосковой ФАР в зависимости от угла «ослепления» позволили определить сокращение сектора сканирования при учете эффекта «ослепления» как функцию угла «ослепления». В частности, при угле «ослепления», равном 40° , сектор сканирования ФАР, определенный по допустимому уровню неравномерности КУ 3 дБ, сократится на 19° по сравнению с сектором сканирования идеализированной антенной решетки, в которой отсутствует эффект «ослепления». Аналогично, при угле «ослепления», равном 50° , сектор сканирования сократится на 12° .

Таким образом, в диссертации решена актуальная научная задача расширения широкоугольных свойств микрополосковых фазированных антенных решеток за счет увеличения угла «ослепления» путем перехода от однослойной к двухслойной диэлектрической подложке.

Для дальнейшей разработки темы целесообразно рассмотреть форму провала в ДН центрального элемента за счет эффекта «ослепления» при использовании излучателей формы, отличной от прямоугольной, в том числе, позволяющих осуществлять работу в нескольких полосах частот. Для дальнейших исследований также представляется перспективным рассмотреть широкоугольные свойства микрополосковых ФАР с тремя и более слоями подложки.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах перечня ВАК министерства образования и науки РФ:

1. Ястребцова О.И. Электродинамический анализ волн в направляющих многослойных структурах // Антенны. 2016. № 12 (232). С. 22-32.

2. *Чебышев В.В., Ястребцова О.И.* Электродинамический анализ волн, распространяющихся в многослойных средах микрополосковых антенн // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2016. Т. 10. № 8. С. 3-8.

3. *Ястребцова О.И.* Условия отсутствия «ослепления» у микрополосковых антенных решеток // Труды МАИ. 2017. № 97. 15с.

4. *Ястребцова О.И., Чебышев В.В.* Влияние двухслойной подложки на характеристики микрополосковых антенн // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Т. 12. № 8. С. 32-37.

5. *Ястребцова О.И.* Явление «ослепления» в микрополосковых антенных решетках с однослойной подложкой // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Т. 12. № 10. С. 31-35.

6. *Ястребцова О.И.* Метод улучшения электрических характеристик в широком диапазоне углов микрополосковых антенных решеток // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2019. Т. 171. № 4. С. 39-44.

Публикации Scopus:

7. *Yastrebtsova O.I.* Scan blindness in one-layer microstrip antenna arrays. В сборнике: 2018 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. Moscow, Russia, 2018. – p. 1-4.

8. *Yastrebtsova O.I.* Scan blindness in finite Microstrip Antenna Arrays. В сборнике: 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. Moscow, Russia, 2020. – p. 1-4.

Прочие публикации:

9. *Ястребцова О.И.* Электродинамический анализ волн, распространяющихся в слоистых средах микрополосковых антенн // Сб. трудов X Международной отраслевой научно-технической конференции. М.: МТУСИ. 2016. С. 164.

10. *Ястребцова О.И.* Ограничение распространения поверхностных волн путем применения для микрополосковых антенн многослойных подложек // Сб. трудов 26-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2016). 2016. С. 1016-1022.

11. *Ястребцова О.И.* Использование многослойных сред для микрополосковых антенн // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2016. Т. 16. № 5. С. 94-97.

12. *Ястребцова О.И.* Двухслойная подложка как способ ограничения поверхностных волн в микрополосковых антеннах // Сборник докладов 6-й Всероссийской конференции «Радиоэлектронные средства получения, обработки и визуализации информации» (РСПОВИ-2016). Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова. 2016. С. 18-22.

13. *Ястребцова О.И.* Влияние двухслойной подложки на характеристики микрополосковых антенн // Сб. трудов XI Международной отраслевой научно-технической конференции. МТУСИ. 2017. С. 241-242.

14. *Ястребцова О.И.* Двухслойная подложка как способ ограничения возбуждения поверхностных волн в микрополосковых антеннах // Труды Научно-исследовательского института радио. 2017. № 1. С. 51-58.

15. *Ястребцова О.И.* Связь поверхностных волн с явлением «ослепления» микрополосковых антенных решеток // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2017. Т. 17, № 4. С. 1035-1038.

16. *Ястребцова О.И.* Явление «ослепления» микрополосковых антенных решеток // Сборник докладов 7-й Всероссийской конференции (с международным участием) «Радиоэлектронные средства получения, обработки и визуализации информации» (РСПОВИ-2017). Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова. 2017. С. 8-12.

17. *Ястребцова О.И.* Явление «ослепления» в микрополосковых антенных решетках с однослойной подложкой // В сборнике XII Международной отраслевой научно-технической конференции. МТУСИ. 2018. С. 280-281.

18. *Ястребцова О.И.* Явление «ослепления» в микрополосковых антенных решетках с двухслойной диэлектрической подложкой // В сборнике 28-й Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2018). 2018. С. 627-633.

19. *Ястребцова О.И.* Использование в микрополосковых антенных решетках двухслойной подложки для борьбы с «ослеплением» // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2018. Т. 18. № 4. С. 915-918.

20. *Ястребцова О.И.* Метод борьбы с явлением «ослепления» в микрополосковых антенных решетках // Доклады VI Всероссийской микроволновой конференции «Московская микроволновая неделя», ИРЭ РАН им. В.А. Котельникова. 2018. С. 29-33.

21. *Chebyshev V., Yastrebtsova O.* Features of the application in wireless communication systems microstrip antenna arrays with single-layer substrate. I International Conference “Technology & Entrepreneurship in Digital Society” (TEDS), 7 November 2018, Financial University under the Government of the Russian Federation.

22. *Ястребцова О.И.* Расширение сектора сканирования микрополосковых антенных решеток // Тезисы докладов Третьей молодежной конференции «Инновационная деятельность в науке и технике. Создание космических аппаратов. Актуальные проблемы и пути их решения». 2019. С. 75-79.

23. *Ястребцова О.И.* Улучшение широкоугольных свойств микрополосковых антенных решеток // В сборнике XIII Международной отраслевой научно-технической конференции. МТУСИ. 2019. С. 318-319.

24. *Ястребцова О.И.* Метод улучшения широкоугольных свойств микрополосковых антенных решеток // Тезисы докладов 7-ой Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». Москва. АО «Корпорация «ВНИИЭМ»». 2019. С. 128-130.

25. *Ястребцова О.И.* Широкоугольные свойства микрополосковых и щелевых антенных решеток // Труды Научно-исследовательского института радио. 2019. № 2-3-4. С. 14-21.

26. *Ястребцова О.И.* Оптимизация диэлектрической подложки микрополосковых антенных решеток для борьбы с эффектом «ослепления» // Доклады VII Всероссийской микроволновой конференции «Московская микроволновая неделя». Москва. ИРЭ РАН им. В.А. Котельникова. 2020 С. 169-173.

27. *Ястребцова О.И.* Микрополосковые антенные решетки с широкоугольным сканированием на многослойной подложке [Электронный ресурс]: Учебно-методическое пособие. - М.: ЭБС МТУСИ, 2020г. - 26с.