

На правах рукописи

Парнес Михаил Давидович

**ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ СВЧ
НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАТ
ДЛЯ РАДАРОВ И СИСТЕМ СВЯЗИ**

Специальность: 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в ЗАО «Светлана-Электронприбор» и ООО «Резонанс»
(г. Санкт-Петербург).

Научный консультант –
доктор технических наук, профессор Вендик Орест Генрихович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Акимов Валерий Петрович
доктор технических наук, профессор Малышев Виктор Николаевич
доктор технических наук, профессор Жиган Игорь Платонович

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

Защита диссертации состоится 16 февраля 2011 года на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.03. Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «___» _____ 2011 г.

Ученый секретарь
совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций

Баруздин С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Принципиальная возможность электронного управления лучом антенны была известна с 30-х гг. прошлого века, уже на самом начальном периоде развития антенной техники. Одна из первых антенн с управляемой диаграммой направленности была создана в 1937 г. для трансатлантической линии связи. Эта антенна, обладая высокой направленностью, определяла направление прихода лучей, наименее ослабленных при отражениях от ионосферы. Так как благодаря направленным свойствам системы излучателей антенны осуществлялся прием только одного отраженного луча, то замирания сигнала резко уменьшались. В данном случае электронное движение луча пришлось применить из-за невозможности механического управления антенной огромных размеров. Аналогичное положение получается при сооружении гигантских радиотелескопов в виде системы зеркал, имеющих размеры, измеряемые многими километрами. Иногда и при меньших размерах антенн масса конструкции, а также усилия по механическому управлению ей при сильном ветре, делают такое управление антенной очень сложным.

Первая в России следящая антенна с электронным сканированием для радара была разработана под руководством Ю.Я. Юрова в 1955 г., а в исследовательскую группу по ее разработке входили будущие профессора О.Г. Вендик и Ю.В. Егоров. Если в то время только предполагали, что в перспективе антенны с медленным и инерционным механическим движением должны уступить место антеннам с электронным управлением, «подобно тому, как диск Нипкова уступил место электронным трубкам», то сегодня можно утверждать, что развитие антенной техники за прошедшие годы подтвердило правильность высказанного предположения.

В начальный период фазированные антенные решетки (ФАР) находили применение исключительно в военной аппаратуре. В радиолокаторах во многих случаях нужна антенна с микросекундными временами переключения положения луча для сопровождения быстролетающих целей и для слежения за несколькими целями одновременно, а в системах связи – для удержания луча в направлении на спутник во время движения автомобиля или корабля. Новый класс приложений антенн с движением луча появился с внедрением в практику систем связи, в которых используются антенны с автопоиском направления на базовую станцию или с автоматической установкой на оптимальный луч в случае многолучевого распространения радиоволн.

Антенны с автопоиском направлений стали применяться в радиотехнических системах обзора территорий или при спасении на пожаре. Относительно новая, но бурно развивающаяся отрасль радарных сенсоров, использующих сканирование пространства, – разнообразные системы предотвращения столкновений автомоби-

лей: переднего и бокового обзоров, слепых («мертвых») зон. В таких системах требуются недорогие ФАР миллиметрового диапазона с малым потреблением мощности в цепях управления лучом. В настоящее время антенны с механическим сканированием широко используются в различных видах военной и гражданской радиоаппаратуры: это радионавигационные системы обеспечения движения внутри аэропортов, системы спутникового вещания и связи с искусственными спутниками Земли, системы связи с подвижными объектами (в ближайшие годы указанные антенны, очевидно, потребуются заменить на электронно-сканирующие). Таким образом, потребуются ФАР массового производства а, следовательно, решающим фактором в разработке ФАР становится минимизация себестоимости ее производства.

Если к середине 60-х гг. все основные принципы построения и оптимизации антенн с электронным управлением были сформулированы и в достаточной степени разработаны, то развитие техники управляющих устройств не завершилось ещё и сегодня. Первые ФАР были осуществлены на основе ферритовых фазовращателей, в конце 60-х гг. им на смену пришли фазовращатели на $p-i-n$ -диодах, затем появились фазовращатели на полевых транзисторах, сегнетоэлектрических элементах и, наконец, фазовращатели на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС). Среди возможных конструктивных решений ФАР следует выделить так называемые активные ФАР (АФАР), которые в цепях питания каждого излучателя содержат усилители мощности в режиме передачи или малошумящие усилители в режиме приёма. Естественно, что конструктивные решения АФАР имеют свои особенности, однако с точки зрения формирования диаграммы направленности и управления АФАР не имеет принципиальных отличий от ФАР с пассивными управляющими устройствами.

Основой как активных, так и пассивных ФАР является фазовращатель, и работы по созданию новых концепций построения высокотехнологичных устройств с малой себестоимостью в сантиметровом и, особенно в миллиметровом, диапазонах волн являются актуальной задачей. Решение этой проблемы чрезвычайно важно для создания нового поколения антенных решеток как военного, так и гражданского назначения.

В данной работе обобщены научно-технические и патентные исследования, выполненные автором на протяжении ряда лет в различных организациях по проблеме построения новых схем антенных решеток и фазовращателей.

Цель работы. Целью диссертационной работы является развитие теоретических основ и практики построения антенных решеток отражательного и проходного типов, а также новых типов СВЧ-фазовращателей для радаров и систем связи.

Для достижения указанной цели необходимо решить **следующие задачи**:

Задача первая: найти оптическую схему и концепцию микрополосковой отражательной антенны, при которой обеспечивается уменьшенное затенение отражательной панели облучателем и контррефлектором, малый уровень бокового излучения и повышение эффективности работы антенны.

Задача вторая: разработать и обосновать метод анализа и синтеза отражательного микрополоскового вибратора антенной решетки на слоистой диэлектрической подложке с использованием аналитической модели в виде эквивалентной схемы отражательного элемента в виртуальном волноводе. Метод ориентирован на применение к микрополосковым антенным решеткам с фиксированным и управляемым лучом, в которых фаза отраженной волны изменяется как за счет геометрического размера вибратора, так и за счет электрической длины вибратора.

Задача третья: разработать принципы построения фокальной решетки излучателей для радиотелескопа вместе с приемниками прямого усиления для сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн с максимально плотной упаковкой при расстоянии между излучателями $\lambda/2$ с их размещением в безаберрационной зоне для обеспечения многолучевого обзора пространства.

Задача четвертая: определить коммутационные коэффициенты качества для активных элементов фазовращателей следующих типов: сегнетоэлектрических конденсаторов на встречно-штыревых структурах; транзисторных ключей при их включении в микрополосковую линию; $p-i-n$ -диодов, включенных в круглый волновод.

Задача пятая: разработать принципы построения отражательной фазированной антенной решетки круговой поляризации в виде набора короткозамкнутых круглых волноводов с ключевыми элементами планарного расположения для реализации антенны сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн с электронным движением луча с большим количеством (несколько тысяч) элементов.

Задача шестая: оптимизировать конформную решетку излучателей, расположенную на параллелепипеде, цилиндре и сфере, для получения технологичной конструкции ФАР для серийного производства и сектора сканирования 4π .

Задача седьмая: развить методы расчета тепловых полей, вызванных потерями СВЧ-мощности в фидерных цепях диаграммообразующих схем антенных решеток с симметричным и несимметричным охлаждением, основанные на подобию электростатических и тепловых полей при использовании электротермического потенциала.

Методы исследований. Решение перечисленных выше задач выполнено с применением теории функций комплексной переменной, полноволнового анализа трехмерных электродинамических структур, метода моментов, метода наведенных

ЭДС, тензорных функций Грина, теоремы отсчетов в пространственной области, методов синтеза при помощи рядов Фурье и парциальных диаграмм Вудфорда–Лоусона, интегральных преобразований, решения интегрального уравнения с помощью проекционного метода Галеркина, дифференциальных уравнений в частных производных (телеграфных уравнений). Кроме того, в работе используются теория цепей, теория электромагнитного поля, различные методы оптимизации и аппроксимации.

Научная новизна. Научная новизна результатов работы состоит в следующем.

1. Предложена новая схема построения отражательной антенной решетки, имеющей специальное фазовое распределение по апертуре, совместимое с облучением в виде фокального кольца, которое обеспечивает малые боковые лепестки и большой коэффициент использования апертуры.

2. Разработан метод анализа и синтеза отражательного микрополоскового вибратора антенной решетки на слоистой диэлектрической подложке, основанный на аналитической модели, в виде эквивалентной схемы отражательного элемента в виртуальном волноводе. Метод использует феноменологическую модель возбуждения тока в проводнике, расположенном в волноводе, и определения коэффициента трансформации между вибратором и волной T_{00} . Этот же метод впервые позволил обеспечить синтез и анализ вибратора с управляемым конденсатором, обеспечивающим электронную перестройку фазы отражательного излучающего элемента антенной решетки.

3. Определены технологические погрешности в изготовлении многослойных структур, обеспечивающие формирование диаграммы направленности отражательной решетки с поворотом плоскости поляризации с заданной фазовой ошибкой в каждом элементе.

4. Впервые предложена концепция расположения управляемого конденсатора непосредственно в разрыве печатного вибратора, что позволило реализовать отражательную антенную решетку с электронным движением луча. Показано, что печатный отражательный фазовращатель-излучатель можно реализовать на одном управляемом конденсаторе, установленном в разрыве плоского вибратора, а управление фазой $0...335^\circ$ достижимо при приемлемых потерях мощности.

5. Предложена концепция отражательной фазированной антенной решетки круговой поляризации в виде набора короткозамкнутых круглых волноводов с мембраной, в радиальных сечениях которой имеются $p-i-n$ -диоды, для реализации антенны сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн с электронным движением луча с большим количеством элементов (несколько тысяч).

6. Предложена оригинальная террасная архитектура трехмерной решетки (до 500 элементов) сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн с размещением излучателей вместе с приемниками с шагом $\lambda/2$ в фокальной безаберрационной зоне двухзеркальной антенны радиотелескопа, благодаря чему обеспечивается многолучевой обзор пространства.

7. Определены коммутационные коэффициенты качества активных элементов фазовращателей:

- сегнетоэлектрических конденсаторов на встречно-штыревых структурах;
- транзисторных ключей;
- $p-i-n$ -диодов, включенных в диафрагму в сечении круглого волновода.

8. Показано, что оптимальное использование конформной поверхности решетки излучателей, расположенных на параллелепипеде, круговом и многогранном цилиндре, позволяет получить в предельном случае телесный сектор сканирования 4π , при этом реализация конформной антенной решетки возможна при разбиении поверхности на плоские грани в случае многогранных цилиндров или в виде слайсов в случае сферической поверхности.

9. Найдены методы расчета тепловых полей, вызванных потерями СВЧ-мощности в фидерных цепях диаграммообразующих схем антенных решеток с симметричным и несимметричным охлаждением, основанные на подобию электростатических и тепловых полей и использовании электротермического потенциала.

Практическая ценность. На основе предложенной автором концепции разработана антенная решетка для Q-диапазона (42 ГГц) с усилением 34 дБ, заменяющая параболический рефлектор и используемая для систем передачи телевидения высокой четкости. Данная антенна производится по печатной технологии и обладает невысокой себестоимостью, высокой повторяемостью в серийном производстве, что особенно важно в диапазоне миллиметровых волн.

Разработаны и экспериментально исследованы новые типы отражательных ФАР с единственным управляемым конденсатором в плоском микрополосковом вибраторе, позволившие создать высокотехнологичную конструкцию антенны с электрическим движением луча для диапазонов 12 и 33 ГГц. Эту технологию можно использовать для разработок недорогих антенных решеток в диапазонах от 1 до 100 ГГц в радарх обзора территорий, системах связи и т. д., так как предложенные схемотехнические решения успешно используют технологию поверхностного монтажа и производство многослойных печатных плат.

С использованием концепции поляризационного $p-i-n$ -диодного фазовращателя создана конструкция антенной решетки для радара X-диапазона, содержащего 3700 фазовращателей. Три новых типа фазовращателей, исследованных в данной

работе, – на сегнетоэлектрических варикондах, на транзисторных ключах и поляризациянные на $p-i-n$ -диодах – используются при конструировании модулей пассивных и активных ФАР наземных и корабельных радаров.

Предложена и исследована террасная архитектура приемной решетки K_a -диапазона рефлекторной антенны с вынесенным облучателем, являющаяся составной частью радиотелескопа. Микрополосковая трехмерная решетка (до 500 элементов) сантиметрового и миллиметрового диапазонов позволила разместить излучатели вместе с приемниками прямого усиления с шагом $\lambda/2$ в фокальной безаберационной зоне двухзеркальной антенны радиотелескопа РАТАН-600, что обеспечивает многолучевой обзор космического пространства.

Полученные методы расчета тепловых полей фидерных схем распределителей мощности позволили спроектировать и освоить в серийном производстве модуль корабельной ФАР на передаваемую мощность 350 Вт в микрополосковом исполнении.

Новые концепции построения конформных антенных решеток привели к созданию новой производственной линии недорогих антенн массового использования для систем связи – терминальных антенн с автопоиском направления на базовую станцию с сектором поиска 360° . Эти антенны успешно производятся в больших количествах для диапазонов 2.4 и 3.5 ГГц для протокола WiMax.

Новизна технических решений подтверждается отечественными авторскими свидетельствами, заявкой на патент США, а также актами внедрения на ряде предприятий в России и за рубежом, производящих электронную аппаратуру, системы связи и радары.

Реализация в науке и технике. Под руководством и при непосредственном участии автора созданы и внедрены следующие разработки.

1. Изготовлено более трех тысяч многослойных антенных решеток на частоту 24 ГГц в рамках Федеральной целевой программы «Повышение безопасности дорожного движения в 2006–2012 годах» для стационарных и передвижных автоматических комплексов фоторадарных датчиков «КРИС» (ООО «Симикон», г. Санкт-Петербург, 2008–2009 гг.).

2. Изготовлено 100 комплектов 4-канальных антенных модулей корабельной ФАР на уровень входной мощности 350 Вт диапазона 1.5 ГГц системы Гос. Оповещения (ОАО «Морской НИИ РЭ «Альтаир», г. Москва, 2009 г.).

3. Спроектированы и серийно выпускаются проходные аналоговые электронно-перестраиваемые фазовращатели на основе сегнетоэлектрических элементов и управляемых емкостей для полуактивной ФАР на частоту 4 ГГц с управляющим напряжением 0...200 В (ОАО «НПО «ЛЭМЗ», г. Москва, 2010 г.).

4. Модули антенных постов микрополосковой отражательной ФАР для волны с круговой и линейной поляризациями и электронно-управляемым лучом X-диапазона на $p-i-n$ -диодных поляризационных фазовращателях для модернизации комплекса «Печора-2М» (ЗАО «Интеррадиосервис», г. Москва, 2009 г.).

5. Изготовлены и испытаны 6-разрядный фазовращатель и 5-разрядный аттенуатор на транзисторных ключах для модуля АФАР по технологии поверхностного монтажа на частоту 5,5 ГГц (ЗАО «Светлана-Электронприбор», г. Санкт-Петербург; ОАО «Радиофизика», г. Москва, 2010 г.).

6. Отражательная антенная решетка с электронно-управляемым движением луча на полупроводниковых варикапах для частоты 33 ГГц (ОАО «КБП», г. Тула, 2007 г.).

7. Изготовлено 10 000 двухполяризационных антенных решеток по многослойной технологии (12 ГГц) пользовательского терминала Интернет-связи. Изготовлена пробная серия (50 экземпляров) отражательных микрополосковых решеток Q-диапазона (42 ГГц) для приемо-передающего терминала Интернет-связи и телевидения высокой четкости HDTV (BluWan-Thales, Франция, 2003–2007 гг.).

8. Изготовлено более 30 000 многолучевых переключаемых антенных решеток абонентских терминалов с автопоиском базовой станции системы связи WiMax на частоту 3.5 ГГц (Alvarion, RunCom, Израиль, 2004–2006 гг.).

Документы о практическом внедрении разработанных устройств приведены в приложении к диссертационной работе.

Монография: Вендик О.Г., Парнес М.Д., Антенны с электронным сканированием. М.: Сайнс-Пресс, 2002, рекомендована Учебно-методическим объединением по образованию в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений по специальности «Радиотехника».

Научные положения, выносимые на защиту

1. Печатный отражательный фазовращатель-излучатель реализован на базе одного управляемого конденсатора, установленного в разрыве плоского вибратора. Расположение управляемого конденсатора непосредственно в разрыве печатного вибратора позволяет сформировать высокотехнологичную отражательную антенную решетку с шагом $\lambda/2$ для электронного движения луча, используя при этом печатную технологию и поверхностный автоматизированный монтаж.

Синтез отражательного печатного вибратора антенной решетки на слоистой диэлектрической подложке осуществляется на основе аналитической модели в виде эквивалентной схемы отражательного элемента в виртуальном волноводе.

Эта модель позволяет синтезировать и анализировать вибратор с управляемым конденсатором, обеспечивающим электронную перестройку фазы отражатель-

ного излучающего элемента антенной решетки. Метод основан на феноменологической модели возбуждения тока в проводнике, расположенном в виртуальном волноводе, и определении коэффициента трансформации между вибратором и волной T_{00} .

2. Специальное фазовое распределение по апертуре плоской отражательной решетки позволяет создать новый класс устройств, исключив металлическое зеркало, описываемое полиномом более высокого порядка, чем второй, и совместить отражательную решетку с облучателем в виде произвольного фокального кольца, что обеспечивает большой коэффициент использования апертуры и малый уровень боковых лепестков.

3. Фазированная антенная решетка, отражающая волну круговой поляризации и осуществленная в виде набора короткозамкнутых круглых волноводов с многослойной печатной платой в поперечном сечении, содержащем $p-i-n$ -диоды, служит основной высокотехнологичной многоэлементной (несколько тысяч) антенны с электронным движением луча для сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн.

4. Телесный угол сканирования 4π обеспечивается при использовании плоской решетки излучателей, изготовленных по многослойной технологии и питаемых через фазовращатели и переключатели. Такие же многослойные решетки могут быть использованы в качестве граней параллелепипеда и многогранного цилиндра для угла сканирования 4π .

5. Многослойная трехмерная (до 500 элементов) решетка террасной архитектуры сантиметрового и миллиметрового диапазонов осуществляется при размещении излучателей вместе с приемниками прямого усиления с шагом $\lambda/2$ в фокальной безабберационной зоне двухзеркальной антенны радиотелескопа, что обеспечивает многолучевой обзор пространства.

6. Мощность, излучаемая антенной решеткой на базе многослойной платы, связана с температурными полями и тепловыми потоками, образуемыми волноводными структурами. Синтез мощностных характеристик и тепловых полей, обусловленных потерями СВЧ-мощности в многослойных антенных решетках с симметричным и несимметричным охлаждением, выполняется на основе математического аппарата, использующего взаимосвязь волновых и тепловых сопротивлений рассматриваемых структур.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы были доложены на 9 международных и 4 Всероссийских конференциях, в том числе:

- International Conference "Perspective on Radio Astronomy: "Technologies for Large Antenna Arrays", The Netherlands, April, 1999;

- «Всероссийская астрономическая конференция», г. Санкт-Петербург, 2001;
- «Progress In Electromagnetics Research Symposium», Cambridge, USA, 26–28 March 2006;
- «IEEE COMCAS 2009, The International IEEE Conference on Microwaves, Communication, Antennas and Electronic Systems», Israel, November, 2009.

Публикации. Автор имеет 50 научных публикаций, из них 44 по теме диссертации. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 43 научных работах и одной монографии, включая 9 статей в центральных периодических журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России; в 2 статьях в ведущих иностранных и 10 отечественных научных периодических журналах; в 9 докладах в сборниках трудов международных и 4 Всероссийских конференций; в описаниях 7 авторских свидетельств на изобретения и заявки на патент США.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, трех приложений и списка использованных источников информации, включающего 173 названия. Основная часть диссертационной работы изложена на 262 страницах основного текста, иллюстрируется 195 рисунками, содержит 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1 «Фазированные антенные решетки и фазовращатели в их составе» является обзорной и посвящена анализу существующего состояния теории и практики построения ФАР, ее составляющих и узлов – волноводных и полосковых распределителей мощности принудительного, полупринудительного и оптического типов, а также сравнительным характеристикам всех основных типов фазовращателей, используемых в радиоэлектронной промышленности.

Приведена информация по основным теоретическим методам исследования параметров излучателей, фазовращателей и диаграммообразующих схем антенных решеток. Дается универсальная обобщенная характеристика, позволяющая прогнозировать основной параметр фазовращателя – коммутационный коэффициент качества управляющего элемента. Представлены данные по основным отечественным и зарубежным серийно выпускаемым фазовращателям, которые классифицированы по передаваемой мощности, потерям СВЧ-сигнала, мощности в цепях управления, надежности и стоимости.

Антенны со сканированием востребованы в системах радиолокации и радионавигации, а также операторами связи для различных систем беспроводного досту-

па в Интернет, для терминалов фиксированной и мобильной связи. Основным элементом, определяющим электрические свойства, а также основным ценообразующим компонентом сканирующих антенн, является фазовращатель. Однако все перечисленные потребности в современных антенных решетках сдерживаются отсутствием антенных решеток и фазовращателей нового поколения, удобных для высокотехнологичного массового производства, с малой мощностью управления и невысокой ценой, что особенно важно для ФАР гражданского применения.

Таким образом, исследование фазовращателей и антенных решеток является актуальной проблемой и требует дальнейшего обобщения и поиска новых концепций построения, а также создания новых методов анализа и синтеза.

Глава 2 «Планарные отражательные антенные решетки». В данной главе представлен результат оригинальной разработки конструктивных вариантов реализации отражательной антенны, состоящей из решетки планарных излучателей с изменяемой геометрической или электрической длиной за счет электрического изменения емкости, а также рассмотрена отражательная плоская ФАР для волны с круговой поляризацией и фазовращателями на $p-i-n$ -диодах. Предложенная отражательная схема не содержит цепей разводки питания излучателей. Отсутствие указанных цепей сильно упрощает и удешевляет конструкцию антенны в целом. Для передачи широкополосных сигналов, несущих цифровую информацию в сетях Интернет, или в системах связи между базовыми станциями сотовых телефонов необходимо использовать малогабаритные дешевые антенны, способные работать в миллиметровом диапазоне частот при коэффициенте усиления (КУ) не менее 30 дБ.

Сформулированным требованиям удовлетворяет планарная отражательная антенна, которая в своей конструкции объединяет свойства параболического зеркала и планарной структуры полосковых резонаторов. Подобно параболическому зеркалу, преобразующему сферический фронт волны, излученной первичным излучателем, в плоский фронт, формирующий остронаправленное излучение антенны, планарная структура полосковых резонаторов также выполняет главную задачу антенны – преобразование сферического фронта первичного излучателя в плоский фазовый фронт волны антенны. При этом планарная структура полосковых резонаторов имеет малую массу и малые габариты, проста в изготовлении. Антенну, выполненную в виде планарной структуры полосковых резонаторов, принято называть планарной печатной антенной.

Разработанная планарная отражательная антенна предназначена для использования в системах связи, сетях Интернета, в гражданских радарх (защита автомобиля от столкновений, ближняя навигация для малых судов и т. п.), работающих на волнах сантиметрового и миллиметрового диапазонов. Для производства отражающей

поверхности антенны используется стандартная технология, в которой применяется технологическое оборудование, освоенное в технологии печатных плат. Простота конструкции антенны и применение стандартной технологии обеспечивают низкую стоимость антенн при массовом производстве. Разработка антенны основана на оригинальных математических моделях и соответствующем программном обеспечении, которые охватывают полный цикл проектирования, завершающийся выдачей данных, необходимых для изготовления фотошаблона и проведения технологических операций фотолитографии. Разработано специализированное оборудование для тестирования электродинамических характеристик изготовленных отражающих поверхностей.

Планарные отражательные антенны, разработанные в содружестве с зарубежными фирмами, были изготовлены в условиях мелкосерийного производства, осуществленного на основе тонкопленочной печатной технологии. Полученные результаты показывают готовность разработки к переходу ее на массовое производство. В качестве элементарного отражателя использовался прямоугольный полосковый элемент длиной около половины длины волны, что значительно упрощает моделирование и дальнейшее изготовление антенны. Для построения электродинамической модели применен метод моментов. При использовании метода моментов задача моделирования многослойной структуры с поверхностью, на которой расположены проводники, сводится к расчету плотности поверхностного тока только в плоскости проводников.

Полученные в ходе моделирования зависимости фазы от геометрических параметров отражателя позволяют спроектировать отражательную решетку любого заданного диаметра. Нами был выбран диаметр 300 мм. В этом случае решетка состоит из более чем 400 отражателей (рис. 1). Отражатели сформированы травлением металлизированной лавсановой пленки, лежащей на пенополиэтилене.

Получение экспериментальных характеристик антенны, близких к теоретическим, показывает корректность созданной электродинамической модели и проведенных расчетов. Модель может быть использована при проектировании зеркальных планарных антенн в любом частотном диапазоне и без ограничений на число слоев диэлектрика.

Для определения допустимых технологических погрешностей геометрических размеров прямоугольных излучателей с поворотом плоскости поляризации был проведен анализ влияния фазовых ошибок. Рассмотрены два типа ошибок:

- фазовая ошибка, приводящая к снижению амплитуды сигнала в главном луче;
- ошибка, приводящая непосредственно к сдвигу фаз в отраженной волне.

Численные исследования показали, что фазовая ошибка в пределах $\pm 20^\circ$ допустима и не нарушит свойств зонированной зеркальной антенны с поворотом плоскости

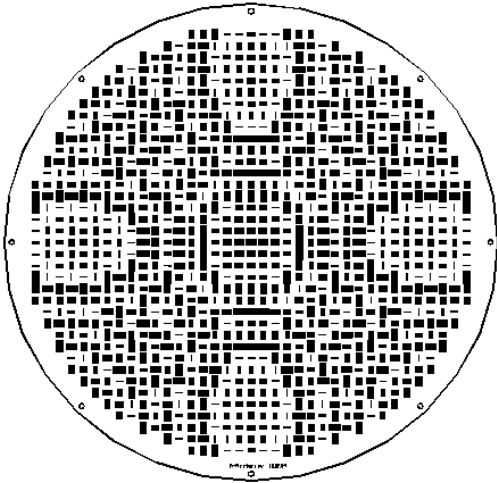


Рис. 1. Фотография планарной печатной структуры, обеспечивающей преобразование сферического фронта волны первичного излучателя с поворотом плоскости поляризации волны на 90°

поляризации, использующей систему прямоугольных отражателей. При этом на частоте 10 ГГц точность изготовления 35 мкм достаточна для изготовления таких отражателей.

ФАР с пониженной стоимостью может быть реализована в виде отражательной решетки, каждый элемент которой представляет собой излучатель, интегрированный с фазовращателем в виде предельно простой интегральной схемы. Самое простое и дешевое техническое решение данной интегральной схемы оказывается возможным при использовании фазовращателя, содержащего всего один активный элемент.

Таким активным элементом может быть полупроводниковый варактор. Показано, что фазовращатель, содержащий всего один активный элемент, по параметрам качества незначительно уступает известным типам многоэлементных фазовращателей, но при этом может быть использован в планарных ФАР с пониженной стоимостью изготовления.

Аналитическая модель позволяет провести расчет импеданса диполя в функции от частоты, размеров диполя и емкости включенного в него варактора. Модель обеспечивает весьма быстрый расчет при достаточно надежной аппроксимации полученных зависимостей. Она содержит подгоночные параметры, значения которых находятся сопоставлением аналитических расчетов с численными, сделанными на основе использования электродинамических методов описания изучаемой структуры. По найденному значению импеданса диполя находим комплексный коэффициент отражения плоской волны, падающей на диполь. Модуль коэффициента отражения определяет потери, которые испытывает волна при отражении, а аргумент коэффициента отражения определяет фазовый сдвиг отраженной волны.

Разработанная компьютерная программа обеспечивает быстрый и точный расчет. Проведена серия расчетов фазы коэффициента отражения от диполя без варактора. В качестве переменного параметра использовалась длина диполя. Расчет показал хорошее совпадение результатов, полученных по аналитической модели и по численной модели, использующей метод моментов. При этом удлинение вибратора, учитывающее вклад торцевой емкости Δl , и длина вибратора L_0 использовались как подгоночные параметры аналитической модели.

В качестве заключения по данному разделу сформулируем следующее.

1. Разработана аналитическая модель, позволяющая проводить точный анализ фазовращателя.

2. Осуществлен простой фазовращатель, содержащий один активный элемент, для использования в отражательной ФАР.

Полученные в эксперименте сдвиг фазы, потери и фактор качества фазовращателя хорошо совпадают с теми же параметрами, рассчитанными на основе аналитической модели. Для проведения экспериментальной проверки возможности управления лучом отражающей ФАР была изготовлена решетка из 48 (12×4) вибраторов, расположенных на расстоянии 15 мм один от другого (рис. 2).

Ширина луча антенны при центральном и при отклоненном положениях составляет, примерно, 8° , что соответствует оптимальному амплитудно-фазовому распределению на решетке излучателей. Отклонение луча без существенного ослабления амплитуды сигнала надежно осуществляется в пределах $\sim 40^\circ$.

Основным результатом раздела является демонстрация возможности реализации фазированной антенной отражательной решетки, используя при этом в качестве основного конструктивного элемента микрополосковый вибратор с включенным варактором в качестве перестраиваемого элемента.

Последний раздел главы посвящен отражательной решетке волноводных излучателей с круговой поляризацией и фазовращателями на $p-i-n$ -диодах. Такая волноводная конструкция вносит малые потери СВЧ-энергии и при этом обладает достаточно большой передаваемой мощностью. Представим себе, что каждый излучатель в составе ФАР образован раскрытием цилиндрического (круглого) волновода. В конце каждого круглого волновода, входящего в состав решетки, находится отражательный фазовращатель, который управляет фазой отраженной волны.

Основой фазовращателя служит диафрагма, расположенная в поперечном сечении круглого волновода. За диафрагмой находится проводящая стенка. Комбинацией диафрагмы и стенки обеспечивается отражение волны. Модуль коэффициента отражения волны близок к единице, а фаза определяется состоянием диафрагмы. В диафрагме сформированы щели, соединенные параллельно с $p-i-n$ -диодами. Управляя состояниями диодов, можно дискретно изменять фазу отраженного сигнала. Значительным преимуществом данной конструкции является ее технологич-



Рис. 2. Решетка из 48 управляемых вибраторов. В правом верхнем углу виден первичный облучатель

ность, так как подрешетка, состоящая из нескольких десятков фазовращателей, изготавливается по планарной технологии печатных плат с использованием поверхностного монтажа. Предлагаемая отражательная антенная решетка состоит из 61 модуля по 61 элементу (рис. 3). Всего решетка содержит 3721 элемент. В левой части рисунка показано размещение элементов решетки, а в правой – размещение облучателя. Отражательная схема не содержит цепей разводки питания излучателей. Отсутствие таких цепей сильно упрощает и удешевляет конструкцию антенны в целом.

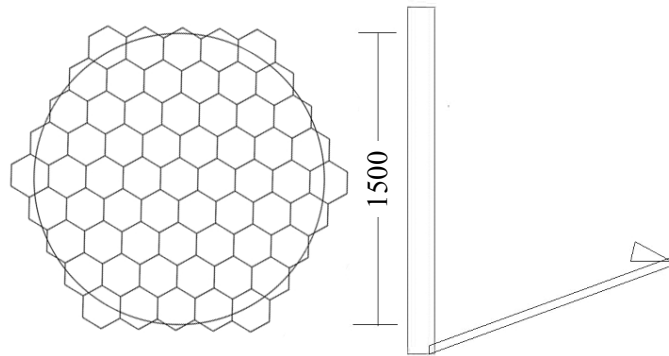


Рис. 3. Схема отражательной антенной решетки

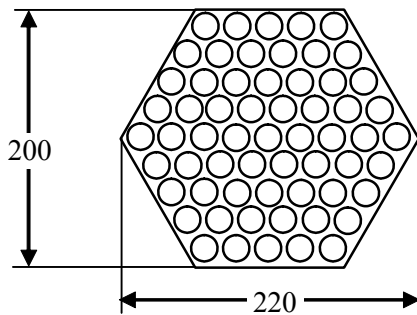


Рис. 4. Модуль антенной решетки, содержащий 61 элемент



Рис. 5. Внешний вид модуля ФАР на 37 фазовращателей со стороны излучателей

Элементы антенной решетки предлагается расположить по системе шестигранников. При этом удастся реализовать решетку излучателей при двумерном сканировании с минимальным числом элементов. Решетка разбита на модули, каждый из которых содержит 61 элемент (рис. 4) или 37 элементов (рис. 5).

На основании топологических и конструкторских исследований было принято решение реализовать блок антенной решетки, состоящий из 37 элементов, каждый из которых включает в себя элементарный излучатель и волноводный элемент,

обеспечивающий согласование излучателя и отражательного фазовращателя. Антенная решетка в законченном виде должна состоять из 100 блоков и содержать 3700 активных элементов. Фотография одного собранного блока антенной решетки приведена на рис. 5.

Для управления фазовым сдвигом фазовращателя необходимо обеспечить задание управляющих токов, проходящих через $p-i-n$ -диоды. С этой целью разработана компьютерная программа, дающая возможность получить фазовое распределение на всех элементах блока антенной решетки, соответствующее требуемому положению луча антенны.

Проведена оценка фазовых ошибок для разрабатываемой антенны при следующих данных:

1. Разработанный фазовращатель обеспечивает дискретный фазовый сдвиг с шагом 45° .

2. Испытания фазовращателя показали, что он допускает случайные фазовые ошибки при среднеквадратичном отклонении 8° . Это можно оценить как максимально допустимую ошибку задания фазы $\pm 15^\circ$.

3. Неискаженное фазовое распределение приводит к естественному уровню бокового излучения -25 дБ.

Можно оценить уровень дополнительного бокового излучения, возникающего вследствие квантования фазового распределения и случайных фазовых ошибок:

$$\xi = \lg(S_0) = -22 \text{ дБ.}$$

Оценка суммарного уровня бокового излучения может быть сделана на основе следующей формулы:

$$\xi_\Sigma = \sqrt{\xi^2 + \xi_0^2};$$

при $\xi = -22$ дБ и $\xi_0 = -25$ дБ получим $\xi_\Sigma = -21.5$ дБ.

Основные результаты, полученные в гл. 2, состоят в следующем:

- Представлен результат оригинальной разработки отражательной антенны, состоящей из решетки планарных отражателей.

- Выполнен анализ влияния фазовой ошибки при отражении плоской волны от прямоугольного отражателя с поворотом плоскости поляризации волны.

Таким образом, в гл. 2 приведены способы моделирования одиночного отражателя, а также результаты конструирования и серийного производства антенны. Разработанная планарная отражательная антенна предназначена для использования в системах связи, сетях Интернет, в гражданских радарх, работающих на волнах сантиметрового и миллиметрового диапазонов. Простота конструкции антенны и применение стандартной технологии обеспечивают низкую стоимость антенны при массовом производстве.

Разработка антенны основана на оригинальных математических моделях и соответствующем программном обеспечении, которые охватывают полный цикл проектирования.

Во втором разделе главы рассмотрен элемент решетки, содержащий в своем составе варактор, емкость которого изменяется под действием приложенного управляющего напряжения. Показано, что фазовращатель, включающий всего один активный элемент, по параметрам качества незначительно уступает известным типам многоэлементных фазовращателей, но при этом может быть использован в планарных ФАР с пониженной стоимостью изготовления. Основным полученным результатом является демонстрация возможности реализации фазированной антенной отражательной решетки в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн с использованием в качестве излучательного элемента микрополоскового вибратора с варактором как перестраиваемого элемента.

В третьем разделе исследована отражательная фазированная антенная решетка в виде набора короткозамкнутых круглых волноводов с мембраной, в радиальных сечениях которой имеются $p-i-n$ -диоды. Такая концепция может быть успешно использована для реализации ФАР с большим количеством элементов (несколько тысяч) для сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн.

Глава 3 «Многоэлементная решетка излучателей в фокальной плоскости радиотелескопа». В главе исследованы антенные характеристики трехмерной решетки террасной архитектуры в составе радиотелескопа РАТАН-600 в многолучевом режиме и некоторые специальные приложения разработанной системы в радиоастрономии.

Для решения задач радиовидения и построения изображений широкоугольного рефлекторного радиотелескопа с вынесенным облучателем предложена конструкция приемной решетки, выполненной на основе монолитных интегральных схем (МИС),

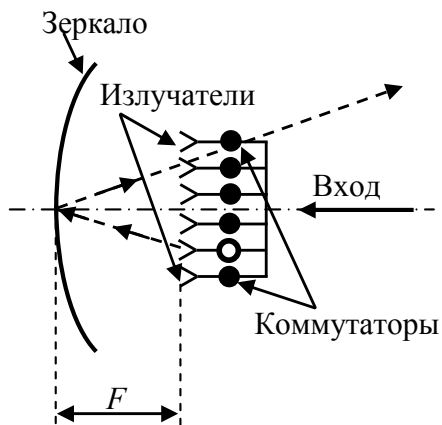


Рис. 6. Схема зеркальной антенны с коммутуруемыми лучами

являющаяся составной частью радиотелескопа. На рис. 6 показана схема предложенной зеркальной антенны, в которой под действием управляющих устройств (коммутаторов) переключаются излучатели, расположенные в фокальной плоскости параболического зеркала.

Фокальная приемная решетка является единственным решением для существующего и последующего поколений радиотелескопов, основная задача которых – высокочувствительный и широкоугольный многопиксельный прием для целей радио-

видения и построения изображений. Наибольшая трудность конструирования многоэлементной фокальной решетки (МФР) для радиотелескопа состоит в необходимости максимально плотной компоновки, поскольку технически трудно расположить все необходимые элементы МФР в фокальной плоскости и при этом эффективно освещать рефлектор. Для такой фокальной решетки найдена концепция, представляющая собой многоуровневую «террасную» архитектуру с горизонтально ориентированными печатными излучателями, работающими на прием. Эта конструкция, как показали исследования, является наиболее выигрышной для радиотелескопа с несимметричным вторичным зеркалом с внеосевым облучателем. Фактически, совместно с технологическими преимуществами это дает наименьшие aberrации и наилучшую апертурную эффективность антенны по сравнению с плоской МФР.

Согласно теореме выборки для полного отображения распределения излучения космического источника следует снимать отсчеты с интервалом, равным полуширине диаграммы направленности (ДН) радиотелескопа. В фокальной области можно воспользоваться следующим критерием:

$$dl = 0.5 \lambda f_a / D,$$

где f_a – фокусное расстояние зеркальной антенны; D – размер апертуры антенны.

Этот критерий подходит для распределения поля на апертуре антенны, близкого к равномерному. В случае спадающего распределения поля критерий dl возрастает пропорционально квадратному корню из падения напряжения поля на краю апертуры в децибелах. Для длиннофокусных антенн $f_a / D \geq 1$.

Данная технология может быть использована для самокоррекции широкоугольного радиотелескопа с внеосевым облучением. Для перехвата 80 % мощности, падающей на рефлектор, со средней квадратичной ошибкой поверхностной точности порядка $\lambda/8$ полное число элементов должно составлять 2000. «Террасная» технология МФР вполне приемлема для решения этого типа задач, поскольку она не ведет к потере фазовой информации или снижению отношения «сигнал/шум».

Основные результаты, полученные в гл. 3, состоят в следующем:

- Исследована конструкция приемной решетки, выполненной на основе МИС, для широкоугольного рефлекторного радиотелескопа с вынесенным облучателем, являющаяся составной частью радиотелескопа.

- Показано, что микрополосковая трехмерная решетка (до 500 элементов) сантиметрового и миллиметрового диапазонов может быть сформирована при размещении излучателей вместе с приемниками прямого усиления с шагом $\lambda/2$ в фокальной безабберационной зоне двухзеркальной антенны радиотелескопа с помощью террасной архитектуры.

Предлагаемая концепция позволяет обеспечить многолучевой обзор пространства и существенно увеличить чувствительность радиотелескопа РАТАН-600 за счет использования многоэлементной приемной решетки, размещенной вдоль фокальной плоскости.

Глава 4 «Исследование фазовращателей для использования в фазированной антенной решетке». В главе рассмотрены фазовращатели трех типов: поляризационные отражательные на основе $p-i-n$ -диодов (на волнах с круговой поляризацией); проходные фазовращатели на основе сегнетоэлектрических управляемых конденсаторов; фазовращатели с дискретным управлением на основе транзисторных ключей.

Фазовращатель в составе фазированной антенной решетки является основным компонентом, обеспечивающим ее функционирование. Теория ФАР показывает, что для нормального функционирования ФАР должна содержать от 100 до 10 000 излучающих элементов, каждый из которых содержит в своем составе фазовращатель с независимым управлением. Поэтому фазовращатель для использования в составе ФАР должен обладать малой мощностью в цепях управления, высоким быстродействием, высокой надежностью и умеренной стоимостью изготовления при массовом производстве.

Представим, что каждый излучатель в составе ФАР образован раскрытом цилиндрического (круглого) волновода. В каждом из волноводов распространяются по две взаимно ортогональные волны с типом поля H_{11} . Эти волны могут излучать внешние волны с вертикальной или горизонтальной поляризацией. Если в каждом из волноводов возбуждены две взаимно ортогональные волны, сдвинутые во времени на 90° , то в волноводах распространяются волны с круговой поляризацией. Эти волны в волноводах излучаются и переходят во внешние волны с круговой поляризацией, а падающие на антенну волны с круговой поляризацией возбуждают волны с круговой поляризацией в волноводах.

Рассматриваемая антенная решетка является отражательной. В конце каждого круглого волновода, входящего в состав решетки, находится отражательный фазовращатель, который управляет фазой отраженной волны. В качестве отражательного фазовращателя для волны с круговой поляризацией используется поляризационный полосковый фазовращатель. Его схема показана на рис. 7.

Основой фазовращателя служит диафрагма, расположенная в поперечном сечении круглого волновода. За диафрагмой в волноводе находится проводящая стенка. Комбинацией диафрагмы и стенки обеспечивается отражение волны. Модуль коэффициента отражения волны близок к единице, а фаза определяется состоянием диафрагмы.

В диафрагме сформированы щели, соединенные параллельно с $p-i-n$ -диодами. Параллельный контур, образованный параллельным соединением отрезка щели и $p-i-n$ -диода, может находиться в двух состояниях, которые определяются малым или большим активным сопротивлением, т. е. контур находится в состояниях короткого замыкания или холостого хода. Короткое замыкание или холостой ход контуров создают разный коэффициент отражения для волны, падающей на диафрагму со щелями, шунтированными $p-i-n$ -диодами.

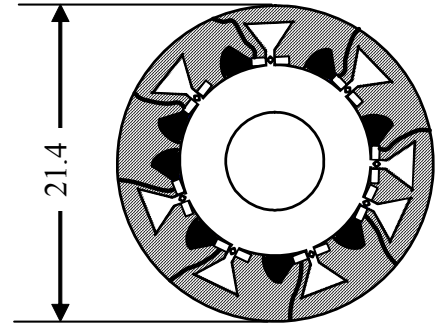


Рис. 7. Схема поляризационного полоскового фазовращателя

Поляризационный фазовращатель, использующий в качестве коммутируемого элемента $p-i-n$ -диод, может управлять достаточно большой мощностью СВЧ-сигнала. При этом на каждый элемент ФАР может приходиться 10...30 Вт импульсной мощности.

Анализ результатов измерения фазовых сдвигов в диапазоне частот 9.1...9.6 ГГц в восьми фиксированных дискретных точках:

$$0, -45^\circ; -90^\circ; -135^\circ; -180^\circ; -225^\circ; -270^\circ; -315^\circ$$

показал, что во всем исследованном диапазоне частот среднеквадратичная ошибка задания фаза не превышает 8° .

Оценка поглощения энергии СВЧ-волны в фазовращателе показывает, что потери в исследованных фазовращателях лежат в пределах 1.5...2.0 дБ. Таким образом, качество фазовращателя оценивается как $F = 200...240$ °/дБ.

Целесообразность применения сегнетоэлектриков при конструировании фазированных антенных решеток (ФАР) (на частотах 3...10 ГГц) обосновывается следующими факторами.

1. Управление диэлектрической проницаемостью сегнетоэлектрического элемента обеспечивается приложением управляющего напряжения при ничтожно малом токе. Это обеспечивает малую мощность управляющих цепей, которая оказывается на 1–2 порядка меньше, чем в случае применения ферритовых управляющих устройств или устройств на основе $p-i-n$ -диодов. Уровень мощности в цепях управления определяется напряжением смещения $U = 200$ В при среднем токе $I = 0.01...0.1$ мА; ток в момент коммутации не более 1 мА.

2. Уровень СВЧ-мощности достаточно высок (до 20 Вт в импульсе и до 2 Вт средней мощности).

3. При обеспечении высокого качества сегнетоэлектрических и проводящих слоев следует ожидать высокого качества фазовращателя в виде характеристики,

полученной как отношение управляемого сдвига фазы в градусах к потерям сигнала на проход в децибеллах: $150...200^\circ/\text{дБ}$.

4. Преимуществом сегнетоэлектрического конденсатора по сравнению с полупроводниковым варактором на основе GaAs является меньшая стоимость материала и меньшее количество технологических операций при массовом производстве.

К настоящему времени отечественными разработчиками были существенно улучшены СВЧ-параметры сегнетоэлектрических компонентов в отношении уменьшения диэлектрических потерь и увеличения управляемости.

В диапазоне $3...10$ ГГц целесообразно осуществлять сегнетоэлектрический фазовращатель в виде интегральной схемы, состоящей из дискретных управляемых конденсаторов (варикондов), включенных в цепь, изготовленную из проводников с достаточно высокой проводимостью.

Скорость переключения фазовращателя (время установки фазового сдвига) в основном определяется скоростью изменения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической пленки, входящей в состав вариконда, при изменении управляющего напряжения. Экспериментальные исследования показывают, что это время для пленок сегнетоэлектрика $(\text{Ba,Sr})\text{TiO}_3$, которые используются в разработанном фазовращателе, не превышает 30 нс.

На рис. 8 приведена фотография проходного фазовращателя, его конструкция соответствует блок-схеме фазовращателя, в котором использованы гибридные мосты и отражательные управляемые фазовращатели.

Управляемый фазовый сдвиг измерялся с использованием измерителя комплексных коэффициентов передачи и отражения ФК2-18. Результаты измерения приведены в таблице и показаны на рис. 9 и 10.

Диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика является функцией температуры, а следовательно, и свойства фазовращателя сильно зависят от температуры.

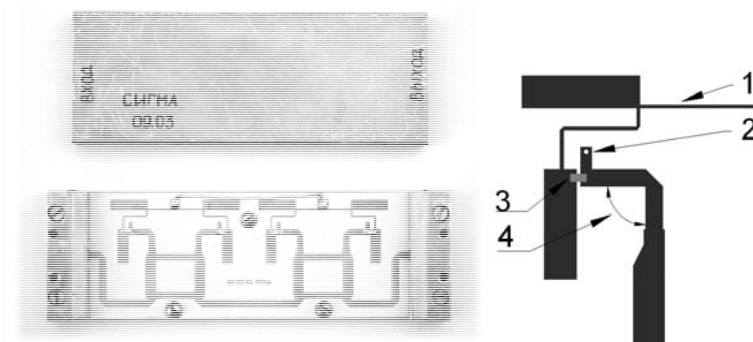


Рис. 8. Проходной фазовращатель: 1 – постоянное управляющее напряжение; 2 – контакт на землю; 3 – управляемый конденсатор; 4 – четвертьволновый трансформатор

Характеристики, требуемые ТЗ	Характеристики, полученные на образцах				
	300	302	303	304	305
Диапазон изменения фазы, ...°	0...360	0...340	0...335	0...330	0...360
КСВН	1.3	1.5	1.5	1.5	1.4
Потери, дБ	3.4	3.2	3.3	3.4	3.5

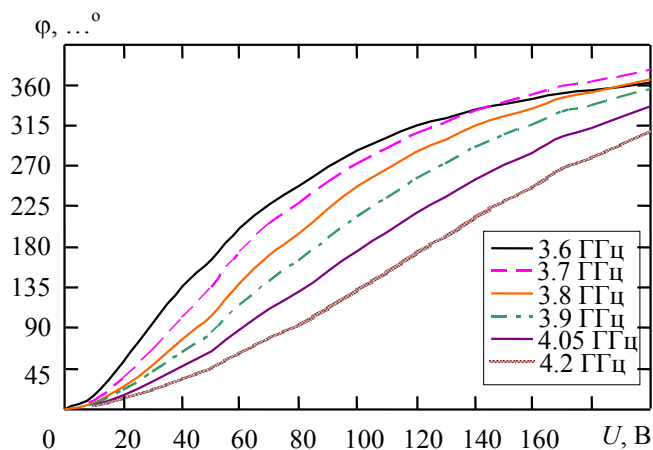


Рис. 9. Зависимость сдвига фазы от управляющего напряжения на различных частотах

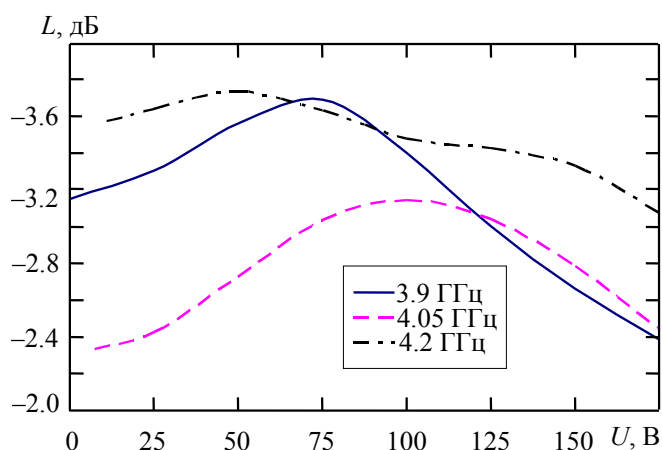


Рис. 10. Зависимость потерь от управляющего напряжения на различных частотах

В данном разделе представлены результаты расчета S -параметров одиночного отражательного фазовращателя, который должен обеспечить управляемый фазовый сдвиг до $(180 \pm 10)^\circ$ при различных рабочих температурах. Рабочий интервал температур, в котором должен быть обеспечен требуемый фазовый сдвиг, составляет $-50 \dots +50^\circ\text{C}$. Основная концепция этого метода состоит в подаче на вариконды напряжения смещения, значение которого корректируется в зависимости от температуры, т. е. изменение температуры компенсируется изменением управляющего напряжения.

Проведенное исследование подтверждает принципиальную возможность разработки СВЧ-сегнетоэлектрических фазовращателей (ФВ) с использованием отечественных материалов и комплектующих изделий. Разработан, изготовлен и испытан проходной сегнетоэлектрический ФВ с электронным аналоговым управлением, обеспечивающий фазовый сдвиг $0 \dots 360^\circ$ в диапазоне частот $3.9 \dots 4.2$ ГГц.

В устройствах, рассчитанных на малый уровень мощности, широкое распространение получили монолитные фазовращатели с полевыми транзисторами, работающими в режиме ключа. Для того, чтобы выполнить требование миниатюризации, в качестве ключа в разработанном устройстве был применен миниатюрный серийно выпускаемый переключатель 1:2 (Single Port Double Throw – SPDT-ключ), модель uPG2214TK фирмы NEC.

Миниатюризация ФВ приводит к отказу от использования отрезков линий передачи и замене их на сосредоточенные эквиваленты. Перспективным вариантом ФВ на сосредоточенных элементах является ФВ на переключаемых низкочастотной (НЧ) и высокочастотных (ВЧ) цепях. Как правило, такие схемы используются при разработке монолитных ФВ. Нами была разработана схема широкополосного ФВ на переключаемых линиях с использованием отрезков искусственных линий с положительной и отрицательной дисперсиями на LC -элементах.

В соответствии с изложенным предложена электрическая схема (рис. 11) старших разрядов ФВ. ФВ, соответствующий схеме рис. 11, удобно реализуется на основе сосредоточенных LC -элементов по технологии поверхностного монтажа с использованием коммерчески доступных элементов. Младшие разряды, формирующие сдвиг фазы 5.625 ; 11.25 ; 22.5° , реализованы по схеме, представленной на рис. 12. При такой реализации реактивные цепи — «цепь 1» и «цепь 2», имеющие различную электрическую длину, подключаются попеременно.

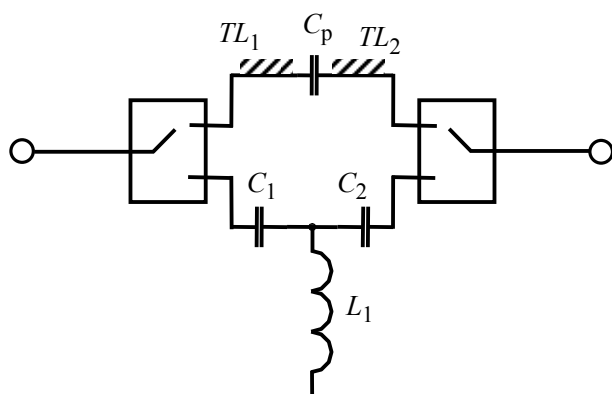


Рис. 11. Электрическая схема старших разрядов фазовращателя

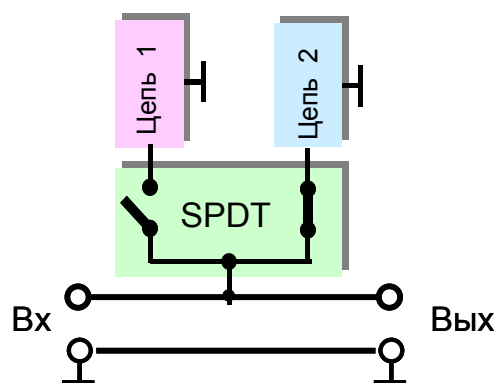


Рис. 12. Эквивалентная схема младших разрядов фазовращателя

Представлены результаты разработки и экспериментального исследования 6-разрядного фазовращателя диапазона $5 \dots 6$ ГГц. Разработанное устройство выполнено с применением технологии печатных плат с поверхностным монтажом элементов. Данная технология позволяет выпускать легковоспроизводимые и недорогие в случае серийного производства миниатюрные СВЧ-устройства широкого диапазона частот.

Получен параметр качества фазовращателя $F \cong 60$ °/дБ. Большие потери сигнала в фазовращателе допустимы в случае использования фазовращателя в составе активной ФАР. В активной ФАР применяются малозумящие СВЧ-усилители, которые компенсируют потери в фазовращателях. Необходимость использования усилителя оправдывается малыми габаритами фазовращателя и малой мощностью в цепях управления.

Основные результаты, полученные в гл. 4, состоят в следующем:

- Показано, что важнейшей характеристикой активного элемента любого типа является коммутационный коэффициент качества. Современный уровень технологии позволяет получить:

- в случае сегнетоэлектрических варикондов на встречно-штыревых структурах в микрополосковой линии значение коэффициента $K = 1000$;
- на транзисторных ключах в микрополосковой линии значение $K = 200$;
- на $p-i-n$ -диодах, расположенных на дифрагме в поперечном сечении круглого волновода, значение $K = 2500$.

- Определены погрешности измерительной схемы поляризационного фазовращателя и исследованы фазовые ошибки в частотном диапазоне.

- Выполнено моделирование зависимости диэлектрического отклика сегнетоэлектрической пленки от напряжения и температуры. Полученные модели являются базисом и для вывода функциональной зависимости смещающего напряжения от температуры, и для требуемой емкости вариконда в составе сегнетоэлектрического фазовращателя.

- Показана возможность успешного применения печатной технологии с поверхностным монтажом для разработки миниатюрных фазовращателей.

- Предложена схема широкополосного фазовращателя на переключаемых линиях с использованием отрезков искусственных линий с положительной и отрицательной дисперсиями на LC -элементах. При этом зависимости фазового отклика от частоты для таких линий практически параллельны в широком частотном диапазоне, что обуславливает постоянство фазового сдвига в этом диапазоне при переключении каналов.

Глава 5 «Различные варианты фазированных антенных решеток». Материал данной главы посвящен проектированию микрополоскового излучателя (антенны), работающего в диапазоне 59...61 ГГц. Такая антенна очень проста в изготовлении, недорога и компактна, может быть использована в приемопередатчике 60 ГГц системы связи WLAN (Wireless Local Network). Высокоскоростной WLAN внутри помещений получает все большее и большее распространение.

Описано конструирование микрополосковой антенны на 76.5 ГГц с простым волноводным распределителем. Данная антенна позволяет реализовать диаграмму направленности специальной формы и может быть использована в составе приемопередающего модуля в компактных и относительно дешевых радарах.

Разработана и испытана многоэлементная ($N = 2300$) антенна, выполненная по дешевой микрополосковой технологии, с шириной луча порядка 1° и низким уровнем боковых лепестков.

Найдено конструкторское решение простого и удобного в процессе производства волноводного распределителя мощности с малыми вносимыми потерями в рабочем диапазоне. Разработана методика расчета конструкции.

Представлена информация о возможностях адаптивных антенн для базовых станций и для пользовательских терминалов. Приводятся сравнительные характеристики однолучевых антенн и адаптивных антенн с точки зрения пропускной способности канала связи. Показаны преимущества адаптивных антенн, а также порядок внедрения в практику адаптивного приема. В такой антенной решетке достигаются следующие технические результаты:

1. С помощью плоской печатной антенны создаётся многолучевая переключаемая диаграмма направленности, полностью охватывающая 360° по азимутальной плоскости (рис. 13).

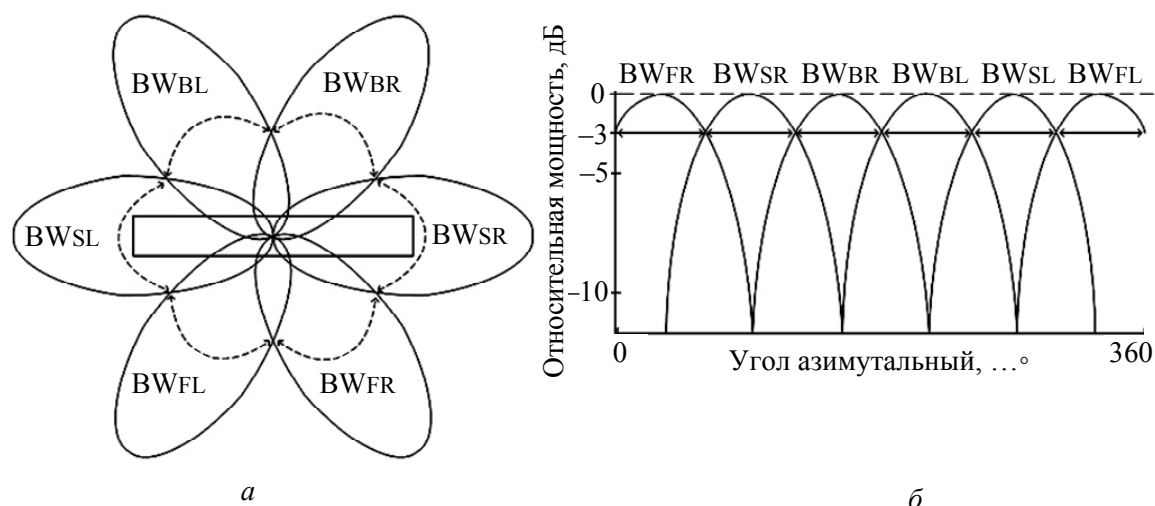


Рис. 13. Диаграммы направленности шестилучевой решетки:
a – в полярных координатах; *б* – в декартовых координатах

2. Для изготовления сканирующей антенной решётки с сектором покрытия 360° используется стандартная технология плоских печатных многослойных плат.

3. Двукратное использование апертуры фронтальной печатной платы и задней печатной платы позволяет создать четыре луча с диаграммами направленности как у двухэлементной антенной решетки, что дает выигрыш по усилению и сужает фронтальные лучи по сравнению с аналогичными характеристиками одиночного излучателя.

4. Полупроводниковый *p-i-n*-диодный переключатель СВЧ-сигналов используется одновременно и в качестве одноразрядного фазовращателя для фазового сканирования луча, и для переключения мощности между излучателями.

Плоская печатная антенна обладает малым аэродинамическим сопротивлением, что позволяет ее устанавливать на крыше легкового автомобиля или поезда.

В последнее время стали особенно актуальными антенные системы излучателей, расположенных на неплоской поверхности (в англоязычной литературе *conformal antenna*). Неугасающий интерес к конформным антеннам связан с возможностью их широкого применения как в военных, так и в коммерческих радиосистемах для связи, навигации, обзора территории, а также гипертермии. Особенно быстро развивается в настоящий момент направление, связанное с оборудованием движущихся объектов (автомобилей, автобусов, яхт и т. п.) системами приема спутникового телевидения.

Применительно к сферической антенне была предложена конструкция, приведенная на рис. 14. Рассматривается наиболее общий случай полной сферы, когда $\alpha_{\max} = 180^\circ$. Значение α_{\max} может быть выбрано из конструкторских соображений. Одним из наиболее практичных и конструктивно удобных вариантов подключения излучателей, находящихся на сферической поверхности, является так называемая дольная схема, когда поверхность сферы разбивается на отдельные секции, или «дольки» (см. рис. 14).

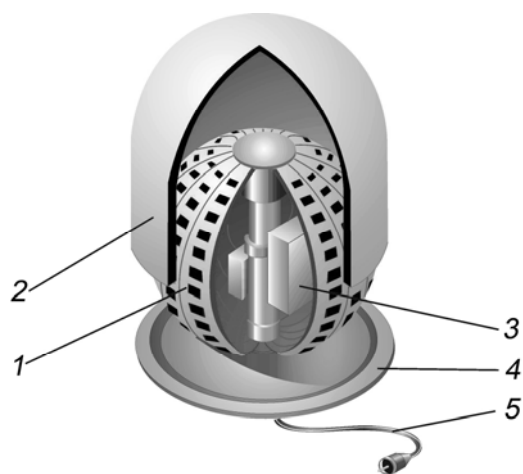


Рис. 14. Конструкция конформной антенной решетки с электрическим управлением: 1 – «долька» с элементами антенны; 2 – защитный колпак; 3 – передатчик (приемник); 4 – основание антенны; 5 – кабель питания

Последний раздел главы посвящен проблеме тепловых расчетов СВЧ-фидеров. Достаточно полного обобщения для тепловых сопротивлений фидеров, насколько нам известно, в литературных источниках не имеется. В литературе приводятся, как правило, выражения для расчета теплового сопротивления от тепловыделения в полоске $R_{\Pi(\Pi)}$ и отсутствуют данные о тепловых сопротивлениях в диэлектрике $R_{\Pi(д)}$.

Настоящий раздел в значительной степени восполняет указанный пробел. Покажем, что для определенного (часто встречающегося) вида условий охлаждения фидерных линий точно выполняются простые соотношения между тепловыми сопротивлениями $R_{\Pi(\Pi)}$, $R_{\Pi(д)}$ и волновым сопротивлением Z_0 . Для основной волны в области S поперечного сечения, занятой диэлектриком, электрическое поле описывается уравнением Лапласа

$$\Delta\varphi = 0,$$

где Δ – оператор Лапласа; φ – мгновенное значение электрического потенциала в любой точке сечения S .

Несмотря на широкий диапазон геометрических и теплофизических параметров численные решения не могут претендовать на полноту и носят ограниченный характер по сравнению с аналитическим подходом. Однако сама программа является достаточно точным и универсальным инструментом, и с ее помощью можно выполнить расчет температурного поля практически для любой линии. Программа может служить инструментом исследования, с помощью которого следует изучить основные закономерности тепловых режимов фидера и разработать инженерную методику, обладающую удовлетворительной точностью.

Основные результаты, полученные в гл. 5, состоят в следующем:

- Исследованы компоненты антенных решеток: микрополосковый излучатель с круговой поляризацией на примере антенны 60 ГГц для системы связи WLAN, а также линейка микрополосковых излучателей с косекансной диаграммой направленности на частоту 76 ГГц как часть решетки аэропортового радара с волноводным распределителем мощности.

- Исследованы вопросы предельной средней мощности фидерных линий диаграммообразующих схем ФАР, и созданы методы их расчета.

- Показана связь между тепловым и волновым сопротивлениями фидерной линии с симметричным охлаждением на основании подобия электрического и теплового полей.

- Рассмотрены некоторые практически важные случаи. Электрические и тепловые поля схем с несимметричным охлаждением рассчитаны численными методами. Результаты представлены в виде зависимостей тепловых сопротивлений от основных обобщенных физико-геометрических параметров.

Один из разделов данной главы посвящен сканирующим антеннам для систем связи в качестве базовых и пользовательских. Предложена и исследована концепция конформной антенны, использующей излучатели, расположенные на параллелепипеде и на круговом и многогранном цилиндре, которая позволяет получить в предельном случае телесный сектор сканирования 4π . Приведены примеры антенных решеток, реализующих данную концепцию на частотах 2.4, 3.5 и 12 ГГц. Практическая реализация конформной антенной решетки возможна при разбиении поверхности на плоские грани в случае многогранных цилиндров или в виде слайсов в случае сферической поверхности. Антенны, спроектированные по результатам данного исследования, нашли практическое применение в системах спутниковой связи и беспроводного доступа к сети Интернет.

В заключении диссертации сформулированы основные научные результаты:

1. Создана концепция и выполнены исследования микрополосковой отражательной решетки с фокальным кольцом и эллиптической образующей контррефлектора.

2. Создан метод анализа и синтеза микрополоскового элемента на слоистой диэлектрической подложке отражательной антенной решетки по аналитической модели в виде эквивалентной схемы отражательного элемента в виртуальном волноводе, основанный на феноменологической модели возбуждения тока в проводнике и определении коэффициента трансформации между вибратором и волной T_{00}

3. Выполнен расчет фазовых сдвигов отраженной волны от микрополоскового отражателя произвольных длины и ширины с поворотом плоскости поляризации, расположенного на слоистом диэлектрике.

4. Найдены концепция и метод синтеза электронно-управляемого фазовращателя-переизлучателя на основе эквивалентной схемы вибратора и электрически управляемого конденсатора в виртуальном волноводе фазированной антенной решетки отражательного типа с фазовращателем-переизлучателем на базе управляемого конденсатора, расположенного в разрыве полоскового вибратора.

5. Установлены предельно достижимые значения параметров отражательного фазовращателя-переизлучателя с одним управляемым элементом – коммутационного коэффициента качества и передаваемой мощности.

6. Создана и экспериментально проверена концепция построения отражательной фазированной антенной решетки на волноводных $p-i-n$ -диодных фазовращателях круговой поляризации.

7. Предложена концепция построения и исследована трехмерная активная антенная решетка K_a -диапазона с архитектурой террасного типа, предназначенная для создания многолучевого режима (до 500 каналов) радиотелескопа РАТАН-600.

8. Установлены значения предельно достижимых значений коэффициента коммутационного качества для трех типов фазовращателей:

- сегнетоэлектрических конденсаторов на встречно-штыревых структурах в микрополосковой линии передачи;

- на транзисторных ключах в микрополосковой линии передачи;

- $p-i-n$ -диодных фазовращателях круговой поляризации на базе волноводных линий передачи.

9. Найдена концепция построения многолучевых сканирующих антенных решеток на различных конформных поверхностях: параллелепипед, круговой цилиндр, восьмигранный цилиндр, а также плоских антенных решеток с сектором сканирования 360° .

10. Создана концепция построения сферической антенной решетки с архитектурой типа «слайса», и создан математический аппарат для анализа и синтеза диаграмм направленности решетки с различным типом размещения излучателей.

11. Разработан метод анализа тепловых полей, вызванных потерями СВЧ-мощности диаграммообразующих схем антенных решеток с симметричным и несимметричным охлаждением, основанный на теории подобия электростатических и тепловых полей, использующий электротермический потенциал.

СПИСОК РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Вендик, О.Г. Отражательная антенная решетка с микрополосковыми излучателями миллиметрового диапазона [Текст] / О.Г. Вендик, М.Д. Парнес, В.Д. Корольков, Р.Г. Шифман // Радиотехника. Радиосистемы, радиолокация и связь. – 2007. – № 4. – С. 22–27.
2. Парнес, М.Д. Проходной фазовращатель на основе сегнетоэлектрических управляющих элементов для работы в составе фазированной антенной решетки [Текст] / М.Д. Парнес, О.Г. Вендик и др. // Радиотехника. Радиосистемы, радиолокация и связь. – 2009. – № 10. – С. 128–133.
3. Вендик, О.Г. Плоская отражательная антенна на основе печатной технологии [Текст] / О.Г. Вендик, М.Д. Парнес, Р.Г. Шифман // Антенны. – 2007. – № 6 (121). – С. 51–57.
4. Вендик, И.Б. Фазовращатель для отражательной антенной решетки [Текст] / И.Б. Вендик, О.Г. Вендик, М.Д. Парнес, Р.Г. Шифман // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2006. – Т. 11. – № 12. – С. 63–69.
5. Парнес, М.Д. Моделирование элементов отражательной антенной решетки [Текст] / М.Д. Парнес, О.Г. Вендик // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. – 2008. – Вып. 3. – С. 3–9.
6. Парнес, М.Д. Предельная средняя мощность, передаваемая фидерной линией [Текст] / М.Д. Парнес, С.С. Дымков, А.И. Кайданов // Изв. Вузов России. Радиоэлектроника (Киев). – 1990. – № 5. – С. 66–68.
7. Parnes, M. The correlation between thermal resistance and characteristic impedance of microwave transmission lines [Текст] (Корреляция между тепловым сопротивлением и характеристическим импедансом СВЧ-линий передачи) / M. Parnes // Microwave Journal. – 2000. – P. 84–92.
8. Parnes, M. A low cost pencil-beam microstrip antenna at 76.5 GHz [Текст] (Недорогая микрополосковая антенна на 76.5 ГГц с карандашным лучом) / M. Parnes etc. // Microwave Journal. – 2003. – P. 110–120.

9. Vendik, O.G. A phase shifter with one tunable component for a reflectarray antenna [Текст] (Фазовращатель с одиночным управляемым элементом для отражательных антенных решеток) / O.G. Vendik, M. Parnes // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2008. – Vol. 50. – No. 4. – P. 53–65.

Патенты и авторские свидетельства

10. Vendik, O.G., US Patent and Trademark Office, December 15, 2005. O.G.Vendik, M. Parnes, Scanning Reflector Antenna Array (Сканирующая отражательная антенная решетка), Provisional Patent Application Transmittal, Registration No 43,328, US Patent and Trademark Office, December 15, 2005.

11. А.с. 298519, МКИ³ Н 01 Q 1/21. Специальная тема [Текст] / М.Д. Парнес, М.Г. Попов; приоритет 28.09.87; зарегистрировано в Гос. реестре изобретений СССР 1.08.89.

12. А.с. 325651, МКИ³ Н 01 Q 1/21. Специальная тема [Текст] / М.Д. Парнес, М.Г. Попов; приоритет 5.10.87; зарегистрировано в Гос. реестре изобретений СССР 5.05.91.

13. А.с. 222588, МКИ³ Н 01 Q 1/21. Специальная тема [Текст] / М.Д. Парнес, Е.Ф. Белов, А.М. Курас и др.; приоритет 18.04.83; зарегистрировано в Гос. реестре изобретений СССР 1.08.85.

14. А.с. 187678, МКИ³ Н 01 Q 1/21. Специальная тема [Текст] / М.Д. Парнес, Е.Ф. Белов, И.М. Хургин и др.; приоритет 28.06.82; зарегистрировано в Гос. реестре изобретений СССР 5.05.83.

15. А.с. 196998, МКИ³ Н 01 Q 1/21. Специальная тема [Текст] / М.Д. Парнес, Е.Ф. Белов, Н.И. Поздняк и др.; приоритет 4.10.82; зарегистрировано в Гос. реестре изобретений СССР 2.01.84.

16. А.с. 188226, МКИ³ Н 01 Q 1/21. Специальная тема [Текст] / М.Д. Парнес, Е.Ф. Белов, С.Н. Шаров; приоритет 16.08.82; зарегистрировано в Гос. реестре изобретений СССР 6.05.83.

Другие статьи и материалы конференций:

17. Вендик, О.Г. Антенны с электрическим сканированием (Введение в теорию) [Текст]: монография / О.Г. Вендик, М.Д. Парнес. – М.: САЙНС-ПРЕСС, 2002. – 232 с.

18. Парнес, М.Д. Планарная печатная зеркальная антенна [Текст] / М.Д. Парнес, В.Д. Корольков, М.С. Гашинова, И.А. Колмаков, Я.А. Колмаков, О.Г. Вендик // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. – 2005. – Вып. 1. – С. 56–59.

19. Parnes, M. Design of a steerable reflect-array antenna with semiconductor tunable varactor diodes [Текст] (Проектирование управляемых отражательной антенной решетки с управляемыми полупроводниковыми варакторными диодами) / M. Parnes,

- O. Vendik // Progress In Electromagnetics Research Symposium, March 26–29, 2006, – Cambridge, USA.
20. Parnes, M. A circularly polarized 60 GHz microstrip antenna [Текст] (Микрополосковая антенна с круговой поляризацией на 60 ГГц) / M. Parnes // Applied Microwave and Wireless. – 1999. – Vol. 11. – P. 34–41.
21. Vendik, O. Low cost ferroelectric phase shifter for a higher microwave power level [Текст] (Сегнетоэлектрический фазовращатель на повышенный уровень мощности с низкой стоимостью) / O. Vendik, A. Vasiliev, M. Parnes // IEEE COMCAS 2009, The International IEEE Conference on Microwaves, Communication, Antennas and Electronic Systems. – 2009. – Tel-Aviv, Israel.
22. Vendik, O. Phased-array antenna ferroelectric phase shifter for a higher microwave power level [Текст] (Сегнетоэлектрический фазовращатель для фазированной антенной решетки на повышенный уровень мощности) / O. Vendik, A. Vasiliev, M. Parnes and ctr. // Progress In Electromagnetics Research Symposium, August 18–21, 2009. – Moscow, Russia.
23. Vendik, O. Microwave reflect-array antenna based on tunable capacitors [Текст] (СВЧ-отражательная антенная решетка на основе управляемых конденсаторов) / O. Vendik, M. Parnes // 20th IEEE S-AP/MTT Joint Chapter Symposium, 8 May, 2006. – Tel-Aviv, Israel.
24. Вендик, О. Фазовращатели сканирующих антенн для радаров обзора территорий [Текст] / О. Вендик, М. Парнес // Беспроводные технологии. – 2006. – № 2. – С. 26–28.
25. Parnes, M. Phase shifter: low cost for high technology radar [Текст] (Фазовращатель: низкая стоимость для высокотехнологичного радара) / M. Parnes // Wave Tech. 2007. – P. 22–26.
26. Khaikin, V. MMIC focal receiver array for radio telescope applications [Текст] (СВЧ МИС фокальная приемная решетка для применения в радиотелескопах) / V. Khaikin, M. Parnes, R. Shifman, V. Dobrov // URSI/Convention on Radio Science, October 4–5, 1999. – Turku. – P. 44–45.
27. Khaikin, V.B. Multi-element focal array for a radio telescope [Текст] (Многоэлементная фокальная антенная решетка для радиотелескопа) / V.B. Khaikin, E.K. Majorova, Yu.N. Parijskij, R.G. Shifman, M.D. Parnes, V.A. Dobrov, V.A. Volkov, V.D. Korolkov, S.D. Uman, N.A. Esepkina, S.K. Kruglov // VIII Russian–Finnish Symposium on Radio Astronomy, Pulkovo, – St. Petersburg, June 1999. – P. 129–132.
28. Khaikin, V. 7×8 element MMIC array at 26–30 GHz for radio astronomy applications [Текст] (СВЧ МИС антенная решетка, состоящая из 7×8 элементов для применения в радиоастрономии) / V. Khaikin, E. Majorova, Yu. Parijskij, M. Parnes, R. Shifman, V. Dobrov, V. Volkov, S. Uman // International Conference «Perspective on Radio As-

- tronomy: «Technologies for Large Antenna Arrays», The Netherlands, April 1999. – P. 171–182.
29. Khaikin, V. Multi-element MMIC array technologies for a radio telescope [Текст] (Технология СВЧ МИС антенных решеток для применения в радиотелескопе) / V. Khaikin, M. Parnes, R. Shifman, V. Dobrov, V. Volkov, V. Korol'kov, S. Uman // *Astronomy & Astrophysics Transactions*. – 2000. – Vol. 19. – No. 3–4. – P.596–611.
30. Khaikin, V. Multibeam array receiver modules of linear and circular polarization at 26-31 GHz [Текст] (Приемные модули многолучевой антенной решетки с линейной и круговой поляризацией на 26-31 ГГц) / V. Khaikin, M. Parnes, M. Shifman, V. Dobrov, A. Golovkov, D. Kalinikos, M. Sugak // *XXVII URSI GA, Maastricht*. – 2002. – P. 900–903.
31. Khaikin, V. Multi-channel array receiver modules for a radio telescope at 26-30 GHz [Текст] (Приемные модули многоканальной антенной решетки для радиотелескопа на 26-30 ГГц) / V. Khaikin, V. Dobrov, M. Parnes, V. Volkov, A. Golovkov, Yu. Rybakov // *URSI/IEEE XXVII Convention on Radio Science*, – Espoo, Finland. – October, 2002. – P. 176–178.
32. Khaikin, V.B. MMIC solution for multipixel reception in RATAN-600 aberrationless focal zone [Текст] (СВЧ МИС для многопиксельного приема в безабберационной фокальной зоне РАТАН-600) / V.B. Khaikin, E.K. Majorova, R.G. Shifman, M.D. Parnes, V.A. Dobrov // *Proceedings ESA Workshop on Millimeter Wave Technology and Applications*. – Espoo, Finland, 1998.
33. Хайкин, В.Б. О возможности построения активной ФАР для реализации режима длительного сопровождения космических источников на РАТАН-600 [Текст] / В.Б. Хайкин, Е.К. Майорова, М.Д. Парнес, В.Д. Корольков, А.А. Головков, Д.А. Калиникос, М.И. Сугак // *Материалы Всероссийской астрономической конференции*. – Санкт–Петербург, 2001. – С. 183.
34. Хайкин, В.Б. Активные модули фокальной решетки радиотелескопа линейной и круговой поляризации на 26–30 ГГц [Текст] / В.Б. Хайкин, М.Д. Парнес, Р.Г. Шифман, В.А. Добров, В.Д. Корольков, В.А. Волков, С.Д. Уман, Г.Н. Голубчин, А.А. Головков, Д.А. Калиникос, М.И. Сугак // *Всероссийская астрономическая конференция*. – Санкт-Петербург, 2001. – С. 183.
35. А.с. №250030 / М.Д. Парнес, // Приоритет 4 ноября 1985. – Зарегистрировано в Гос. реестре изобретений СССР 2 марта 1987.
36. Парнес, М. Смарт-антенны в системе WiMax [Текст] / М. Парнес // *Беспроводные технологии*. – 2007. – № 2. – С. 48–50.
37. Парнес, М. Адаптивные антенны для системы связи WiMax. [Текст] / М. Парнес // *Компоненты и технологии*. – 2007. – № 4. – С. 156–158.
38. Парнес, М. Применение радарных датчиков в автомобиле [Текст] / М. Парнес // *Компоненты и технологии*. – 2007. – № 12. – С. 6–9.

39. Парнес, М.Д. Плоская отражательная печатная антенна или параболическая антенна – что технологичнее? [Текст] / М.Д. Парнес, О.Г. Вендик // Беспроводные технологии. – 2007. – № 1. – С. 26–29.
40. Парнес, М. Фазированные антенные решетки в системах спутникового телевидения [Текст] / М. Парнес // Теле-Спутник. – 1997. – С. 58–60.
41. Parnes, M. Phased array antennas for satellite TV [Текст] (Фазированные антенные решетки для спутникового телевидения) / M. Parnes, R. Shifman // Satellite business forum for Russia and CIS. – St.-Petersburg, 9–10 December, 1998.
42. Дымков, С.С. Тепловые сопротивления симметричной полосковой линии с несимметричным охлаждением [Текст] / С.С. Дымков, А.И. Кайданов, М.Д. Парнес // Судостроительная промышленность. – Сер. Общетеchnическая. – 1989. – Вып. 19. – С. 27–35.
43. Дымков, С.С. Связь тепловых и волновых сопротивлений фидерных линий СВЧ [Текст] / С.С. Дымков, А.И. Кайданов, М.Д. Парнес // Судостроительная промышленность. – Сер. Общетеchnическая. – 1989. – Вып. 19. – С.37–43.
44. Парнес, М.Д. Опыт автоматизированного проектирования печатной антенной решетки [Текст] / М.Д. Парнес // Судостроительная промышленность. – Сер. Общетеchnическая. – 1989. – Вып. 19. – С. 43–47.