

11 коп.

Индекс 70077

НОВОЕ
В ЖИЗНИ, НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

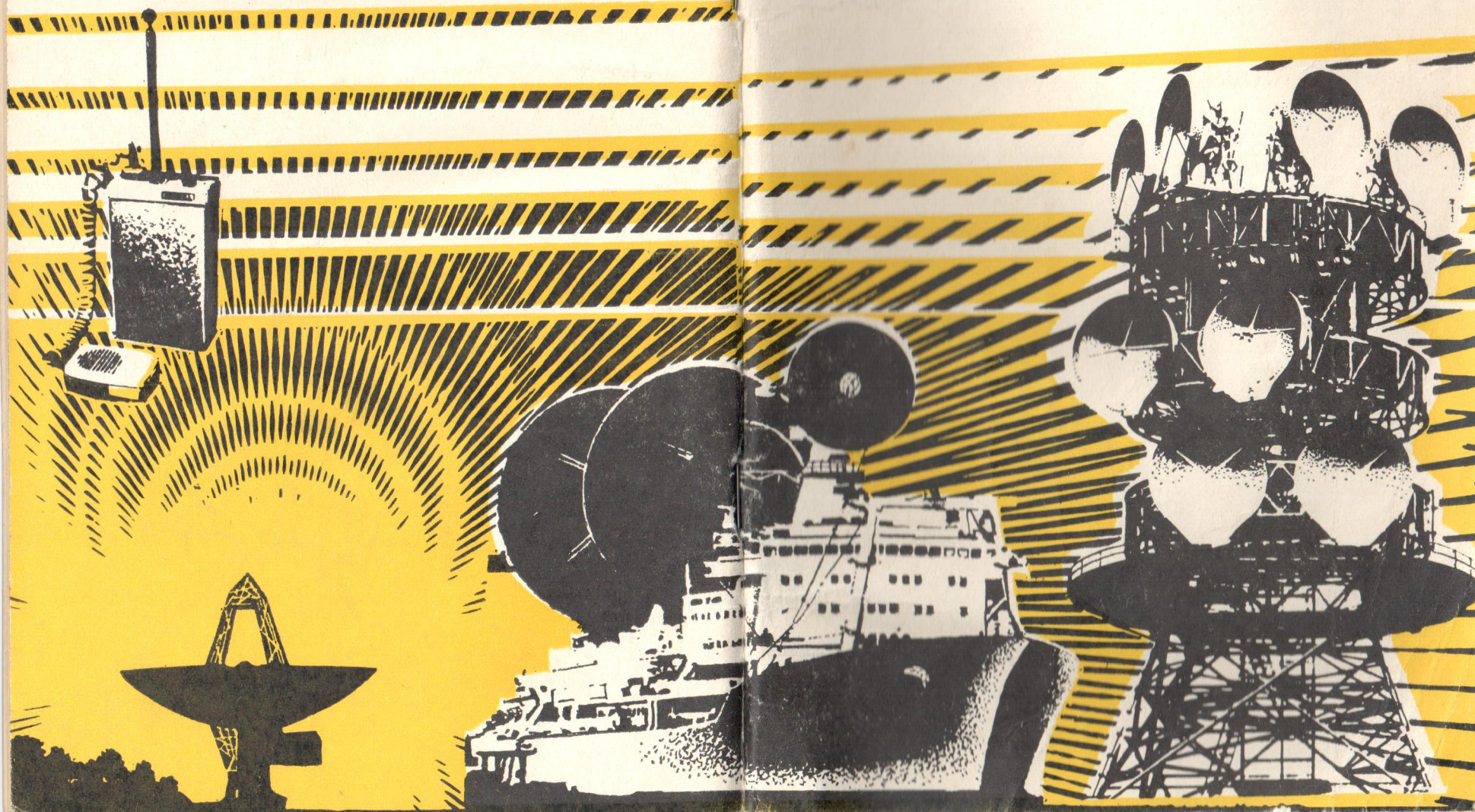
ЗНАНИЕ

10/1978

Г.Г. Бубнов

СЕРИЯ
РАДИОЭЛЕКТРОНИКА
И СВЯЗЬ

АНТЕННЫ
РАДИОУСТРОЙСТВ



НОВОЕ
В ЖИЗНИ, НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

Серия «Радиоэлектроника и связь»
№ 10, 1978 г.
Издается ежемесячно с 1966 г.

Г. Г. Бубнов,

доктор технических наук,
профессор

**АНТЕННЫ
РАДИОУСТРОЙСТВ**

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»
Москва 1978

32.845
Б 90

Георгий Григорьевич Бубнов

АНТЕННЫ РАДИОУСТРОЙСТВ

Гл. отраслевой редактор *В. П. Демьянов*
Редактор *Б. М. Васильев*
Мл. редактор *Н. А. Львова*
Обложка художника *А. Е. Григорьева*
Худож. редактор *Т. С. Егорова*
Техн. редактор *Л. А. Кирякова*
Корректор *В. И. Гуляева*

ИБ № 1073

Т — 16643. Индекс заказа 84610. Сдано в набор 18.07.78 г. Подписано к печати 6.09.78 г. Формат бумаги 84×108¹/₂. Бумага типографская № 3. Бум. л. 1,0. Печ. л. 2,0. Усл. печ. л. 3,36. Уч.-изд. л. 3,48. Тираж 41 670 экз. Издательство «Знание», 101835, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Заказ 1421. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.
Цена 11 коп.

Бубнов Г. Г.

Б 90 Антенны радиоустройств. М., Знание», 1978.
64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Радиоэлектроника и связь», 10. Издается ежемесячно с 1966 г.)

В брошюре рассказано о наиболее перспективных разработках антенной техники. Описаны основные проблемы в создании фазированных антенных решеток, куполообразных антенн с качанием в полусфере, космических и др. Затронуты вопросы технологии антенн и применения новых материалов.
Брошюра рассчитана на широкий круг читателей.

30404

32.845
6Ф2.12

© Издательство «Знание», 1978 г.

Основные этапы развития антенной техники за 60 лет

Немногим более 60 лет прошло с того момента, когда Владимир Ильич Ленин подписал и отдал для передачи по радио историческое обращение «К гражданам России», в котором сообщалось, что власть перешла в руки Военно-революционного комитета — органа Петроградского Совета рабочих и солдатских депутатов, а Временное правительство низложено. Это сообщение было передано радиостанцией крейсера «Аврора» и принято не только русскими приемными станциями, но и за рубежом. Мощная Царскосельская передающая станция в районе теперешнего г. Пушкина в то время была еще в руках Керенского и перешла в руки Советской власти 30 октября. Кроме нее до революции существовали мощные радиопередатчики в Москве (на Ходынском поле), в Ташкенте и Николаеве. Их антенны представляли собой большие полотна, составленные из проводов, подвешенных на мачтах высотой 150—200 м. Главные требования к этим антеннам — возможно большая электрическая емкость. Специальный удаленный от передатчиков приемный центр, созданный в Твери (ныне Калинин), имел Г-образную антенну с длиной горизонтальной части 80 м, подвешенную на двух мачтах высотой 160 м. Работа велась на волнах 2000—3000 м.

Первая советская антенна для радиовещательной станции мощностью 12 кВт разработана в Нижегородской радиолоборатории (НРЛ) под руководством выдающегося ученого и инженера Михаила Александровича Бонч-Бруевича и сооружена в 1922 г. в Москве в районе Курского вокзала. Это была Т-образная антенна на двух мачтах высотой 150 м.

Однако вскоре в Нижегородской радиолоборатории началась интенсивная разработка техники совершенно новых антенн — для коротких волн.

В 20-х годах нашим правительством был поставлен

вопрос об обеспечении связи Москвы с Дальним Востоком и Америкой. За рубежом подобные линии радиосвязи осуществлялись тогда на волнах порядка 10 000 м, требовавших создания огромных горизонтальных антенных полотен, подвешиваемых на мачтах высотой 250—300 м. Бонч-Бруевич предложил исследовать возможность применения для этой цели коротких волн, которые использовались радиолюбителями, но без гарантии устойчивой и регулярной радиосвязи. Законы распространения коротких волн в то время были неизвестны. В 1925—1926 гг. Нижегородская радиолaborатория поставила целый ряд опытов по установлению подобных коротковолновых линий связи и излучению мощных коротковолновых сигналов, снимаемых с 25 кВт-ной лампы и подаваемых на ненаправленную антенну «с верхним светом», представляющую собой высоко поднятый проволочный цилиндр диаметром 1 м, питаемый от длинного провода. Передача велась на волнах 83, 40 и 23 м. Естественно, что при такой мощности квитанции о приеме сигналов приходили издалека. Общее руководство этими работами осуществлялось М. А. Бонч-Бруевичем, а непосредственное — профессором Владимиром Васильевичем Татаринным.

В. В. Татаринному в то время принадлежал ряд статей, посвященных теоретическому и экспериментальному исследованию незатухающих колебаний связанных полуволновых вибраторов; им же была предложена схема первой синфазной антенны из восьми полуволновых вертикальных вибраторов для связи с Ташкентом и проведена ее настройка, потребовавшая в то время большого искусства. Под его непосредственным руководством проводились сеансы связи с Ташкентом по опытной коротковолновой линии, завершившиеся в сентябре 1926 г. официальным введением этой линии в эксплуатацию.

В НРЛ А. А. Пистолькорс — в то время студент МВТУ — под руководством М. А. Бонч-Бруевича выполнял свою дипломную работу. Она была посвящена (основанной на телеграфных уравнениях) разработке теории длинных линий применительно к технике коротковолновых питающих линий и антенн. Были рассмотрены режимы стоячих волн и бегущей волны, линии с потерями, вопросы согласования с помощью отрезков короткозамкнутых и разомкнутых двухпроводных линий.

Введено характеризирующее нагружку, сейчас уже общепринятое, понятие коэффициента бегущей волны. Результаты анализа были применены к расчету и настройке антенны с верхним светом и других антенн и заинтересовали сотрудников лаборатории Татариннова.

В 1925—1926 гг. М. А. Бонч-Бруевичем были опубликованы статьи, посвященные расчету диаграмм направленности коротковолновых антенн и их мощности излучения. А. А. Пистолькорсу удалось применить предложенный Л. Бриллюэном и Д. А. Рожанским и развитый применительно к одиночному проводу И. Г. Клячкиным метод наводимых электродвижущих сил к многовибраторным коротковолновым антеннам, что позволило вычислять сопротивление излучения каждого вибратора и распределение мощности излучения между ними (эта работа была опубликована у нас в 1928 г. и в США в 1929 г.).

В дальнейшем В. В. Татариннов применил этот метод к расчету реактивного сопротивления полуволнового вибратора, объяснив непонятную ранее необходимость укорачивать полуволновой вибратор при настройке в резонанс. Эти работы опережали аналогичные зарубежные.

В 1929 г. в связи с ликвидацией Нижегородской радиолaborатории часть сотрудников НРЛ, включая А. А. Пистолькорса, была переведена в Ленинград, в Центральную лабораторию Треста заводов слабого тока. Здесь работал Михаил Самойлович Нейман, сыгравший заметную роль в развитии теории и техники антенн. Достаточно указать на введенный им в теорию приемных антенн принцип взаимности, обосновывающий идентичность параметров антенны при работе на прием и передачу. Ему принадлежит фундаментальная монография «Передающие антенны», вышедшая в свет в 1934 г. В своей докторской диссертации, посвященной полым резонаторам, в 1939 г. он впервые ввел понятие щелевых антенн и исследовал их основные параметры. Одновременно с Борисом Вульфвичем Брауде он руководил разработкой ряда передающих антенн для мощных радиовещательных станций, созданных А. Л. Минцем (позже академик АН СССР). Сюда относится сооруженная в 1936—1938 гг. антенна коротковолновой радиовещательной станции РВ-96 мощностью 120 кВт, которая должна была обеспечить возможность переме-

щения по азимуту диаграммы направленности, обслуживающий широкий сектор. Такой сектор потребовал относительно небольшое число полуволновых вибраторов, которые во избежание перенапряжений было предложено выполнить в виде алюминиевых цилиндров диаметром в 1 м с закругленным концом. Отдельные вертикальные вибраторы возбуждались с тем или иным сдвигом фаз, необходимым для обеспечения заданного сектора.

Для сооруженной в 1931—1933 гг. под руководством А. Л. Минца радиовещательной станции имени Коминтерна мощностью 500 кВт была создана антенна с большой горизонтальной частью, подвешенной на четырех двухсотметровых мачтах, и тремя одинаково настраиваемыми снижениями, наводящими друг на друга электродвижущие силы, позволяющие поднять сопротивление излучения антенны до 80 Ом.

Антенна самой мощной в мире радиовещательной станции (1200 кВт), построенной в тяжелых условиях военного времени в районе г. Куйбышева, представляет собой две системы, каждая из четырех изолированных от земли стальных башен высотой 200 м (в системе для более длинных волн) и 150 м (для коротких). Когда все башни питаются синфазно, антенна работает как всенаправленная. Для направленного излучения питание подают на две башни, а две другие выполняют роль пассивного рефлектора. Диапазон волн 750—1500 м, управление настройкой дистанционное.

Вопросами теории и техники приемных антенн в предвоенный период занимался в основном А. А. Пистолькорс и ряд его сотрудников. Были освоены различные антенны зарубежных типов и, в частности, коротковолновая антенна бегущей волны. Ими оборудованы приемные центры магистральной связи, сооруженные в Москве, Иркутске и Комсомольске-на-Амуре, сыгравшие большую роль для поддержания магистральной связи в период Великой Отечественной войны.

В 1933 г. вышла книга В. В. Татарина «Коротковолновые направленные антенны», позже вышли две книги А. А. Пистолькорса по приемным антеннам. Следует отметить также работы Александра Евгеньевича Сузанта, посвященные строгой теории симметричного вибратора; их автор был призван в армию и погиб смертью храбрых в начале Великой Отечественной войны.

В 20-х годах, параллельно с работами по антеннам, советскими учеными разрабатывалась теория электрически связанных длинных линий. Был найден ряд интересных зависимостей, приведших к созданию новых оригинальных типов антенн, а также схем для измерения параметров длинных линий, так называемых рефлектометров, разработанных совместно М. С. Нейманом и А. А. Пистолькорсом.

В частности, на базе этой теории А. А. Пистолькорсом была предложена конструкция так называемого шлейф-вибратора, запатентованного в 1938 г. и получившего в настоящее время широкое распространение в качестве приемной телевизионной антенны. Эта антенна эквивалентна двум синфазным вибраторам, что делает ее входное сопротивление излучения вчетверо больше сопротивления одиночного вибратора, т. е. порядка 290 Ом, а это удобно для согласования с двухпроводной линией. Кроме того, в середине шлейф-вибратора расположен узел напряжения, что позволяет использовать эту точку для крепления вибратора к опоре без изолятора.

Собственно говоря, к началу Великой Отечественной войны первый этап освоения техники КВ антенн был закончен. С появлением радиолокации начался переход к созданию антенн метровых, а потом и сантиметровых волн. Лишь в последнее время к теории и технике КВ антенн вновь возник значительный интерес. Были сооружены остронаправленные широкополосные приемные коротковолновые антенны, предназначенные для горизонтальной радиолокации, использующие однократное отражение волн от ионосферы. Предназначены они для зондирования объектов, находящихся на расстоянии 2000—3000 км и более. Кроме того, возникла и получает развитие техника так называемых активных антенн, позволяющая в ряде случаев сократить геометрические размеры вибраторов.

В 40-х годах появились новые тракты для передачи энергии электромагнитных волн — волноводы. Теоретическому изучению их свойств были посвящены работы Бориса Алексеевича Введенского, а в дальнейшем эти вопросы получили развитие в ряде исследований, выполненных Борисом Захаровичем Каценелленбаумом, Максимом Васильевичем Персиковым, Андреем Леоновичем Микаэляном и рядом других советских уче-

ных и инженеров. Следует отметить также независимое от Запада внедрение у нас ферритовых высокочастотных устройств, открывших совершенно новые возможности в деле согласования и коммутации волноводных трактов и фазирования колебаний СВЧ.

За истекшие 30 лет мы были свидетелями постепенного появления все новых принципов в сооружении антенн. Первоначально в сантиметровом диапазоне применялись преимущественно зеркальные антенны, использующие для концентрации излучения, подобно прожекторам, отражающее параболическое зеркало или систему зеркал. Потом стали получать распространение рупорные, а затем щелевые антенны в виде системы щелей, прорезанных в стенках волноводов.

В 50-х годах группой советских ученых в составе Льва Давидовича Бахраха, Льва Николаевича Дерюгина и других были предложены антенны поверхностных волн, получившие применение в системах частотной радиолокации, когда сканирование производится путем изменения частоты при непрерывном излучении. Последние 10—15 лет были посвящены разработке теории и внедрению в практику так называемых фазированных антенных решеток (сокращенно ФАР), состоящих из очень большого числа идентичных излучателей, непосредственно связанных с устройствами, позволяющими регулировать амплитуду и фазу принимаемых или излучаемых колебаний. Управление этими устройствами, в основном фазовращателями, осуществляемое с помощью ЭВМ, позволяет быстро формировать один или даже одновременно несколько остронаправленных лучей, перебрасываемых в то или другое направление. Особый подкласс фазированных антенных решеток составляют так называемые адаптивные антенны, позволяющие автоматически изменять направленные свойства приемной антенны так, чтобы подавить неожиданно возникающую помеху, приходящую с заранее неизвестного направления, отличного от направления главного луча.

Особенностью развития антенной техники последних десятилетий явилось также то, что радиотехника получила самое разностороннее развитие в связи с использованием ее во вновь возникающих областях науки и техники. Развивалась авиация, появились и авиационные антенны различного назначения: радиолокацион-

ные, радионавигационные, связные, системы опознавания принадлежности самолетов и т. д. Современный боевой самолет оснащен более чем пятьюдесятью антеннами различного назначения. Одновременно развилась техника диэлектрических или металлических (с прорезями) радиопрозрачных антенных укрытий или обтекателей, призванных защищать антенны от разрушительного потока воздуха. Обтекатель должен не только вносить минимальные искажения в диаграмму направленности антенн, но и выдерживать нагрев в сотни градусов, возникающий при больших скоростях современных самолетов. Решается также проблема стабилизации антенны независимо от крена самолета.

На современных военных кораблях число антенн доходит до 100—150. Приходится решать задачи устранения их взаимного влияния, создания для подводных лодок антенных обтекателей, выдерживающих гидростатическое давление до 80 атм и ряд других.

Появились спутники и космические корабли — потребовалась разработка специальных антенн, выдерживающих большой нагрев при проходе через атмосферу, способных работать в условиях невесомости, а также в поле тяготения или атмосферах других планет и луны. Особое место занимают развертываемые в космосе антенны, предназначенные для связи с Землей или для радиоастрономии.

Эти и другие примеры показывают, с одной стороны, все многообразие современной антенной техники, а с другой — комплексный и с радиоэлектронной точки зрения очень сложный характер современных антенных систем. Достаточно указать на выпускаемые нашей промышленностью ФАР, в которых тысячи излучателей связаны с ферритовыми или полупроводниковыми фазовращателями, управляемыми ЭВМ. На ЭВМ возлагается еще обязанность рассчитывать фазовые сдвиги, необходимые для установки луча в заданном направлении.

Рассказать о всех антеннах невозможно, но даже ограничиваясь рассмотрением лишь некоторых антенн, применяемых для целей связи, телевидения и радиоастрономии, можно отметить некоторые важные направления развития прикладной электродинамики.

В первую очередь необходимо упомянуть об антеннах для радиорелейных линий связи, устанавливаемых

на мачтах, обеспечивающих прямую видимость между станциями. Распространенные у нас так называемые рупорно-параболические антенны разработаны в 60-х годах под руководством Григория Захаровича Айзенберга. Они представляют собой несимметричную вырезку трапециевидальной формы из параболоида вращения, облучаемого непосредственно связанным с ней рупором. Для получения синфазного распределения поля в раскрыве антенны профиль зеркала выбирается таким, чтобы фокус параболоида совпадал с фазовым центром рупора. Плавный переход от волновода к рупору обеспечивает хорошее согласование. Коэффициент отражения в широкой полосе частот не превосходит 1%. Много труда пришлось затратить на разработку волноводных фильтров, обеспечивающих одновременный прием и передачу сигналов нескольких сотен высококачественных телефонных и десятков телевизионных каналов, обслуживаемых радиорелейной линией. В успешное решение этой задачи значительный вклад внес Арнольд Маркович Модел.

Большое значение имела также разработка пассивных ретрансляционных пунктов, принимающих сигналы радиорелейной станции и излучающих их дальше. Такие ретрансляторы целесообразно ставить на горных хребтах и на других возвышенностях, которые (в противном случае) нарушают прямую видимость между двумя смежными активными радиорелейными станциями. Заметный вклад в механику пассивных трансляторов внес Всеволод Григорьевич Ямпольский.

Исключительно важную роль играют разработанные под руководством члена-корреспондента АН СССР Алексея Федоровича Богомолова приемные системы «Орбита», служащие для приема телефонных и телевизионных передач из Москвы через спутники связи типа «Молния». Свыше 50 таких антенн рассеяны по всей территории Советского Союза. Они представляют собой 12-метровое зеркало с облучателем, работающим на волне 30 см. Смена волноводного тракта и облучателя с добавлением малого гиперболического зеркала диаметром 2 м обеспечивает работу в международном диапазоне (на волне около 7 см).

Требования, предъявляемые к телевизионным передающим антеннам, заключаются в обеспечении широкополосности и предельно точном согласовании с питаю-

щими антенны линиями, что исключает появление фидерных эхо-сигналов, искажающих телевизионное изображение. В 40-х и 50-х годах получили большое распространение так называемые Ж-образные плоскостные широкополосные вибраторы, предложенные Б. В. Брауде. Несколько этажей таких вибраторов сжимают луч в вертикальной плоскости. Направленное излучение в горизонтальной плоскости достигается тем, что в каждом этаже две пары таких вибраторов располагаются взаимно перпендикулярно и питаются со сдвигом фаз в 90° . Эта так называемая «турникетная схема» была предложена А. А. Пистолькорсом и П. Н. Рамлау еще в 1930 г.

В 1967 г. был введен в эксплуатацию Останкинский телевизионный центр с его уникальной башней высотой 544 м. В верхней ее части на высоте от 385 до 525 м расположены антенны ЧМ вещания и телевизионные. Ввиду сравнительно большого диаметра башни на высоте до 475 м (от 4 до 2,6 м) нельзя было применить турникетную схему. Давидом Матвеевичем Трускановым были разработаны для 1-го и 3-го каналов телевидения и ЧМ вещания оригинальные антенны, представляющие собой систему рационально расположенных вибраторов. Помимо радиотехнических преимуществ, такая конструкция обеспечивает значительное уменьшение массы и ветровых нагрузок на опору, а также облегчает условия эксплуатации и обслуживания, так как вся фидерная система антенны размещается внутри цилиндрической опоры в башне.

Для развития знаний о Вселенной большое значение имеют антенны, применяемые в радиоастрономии и космической радиосвязи. Первая крупная радиоастрономическая антенна РТ-22 была построена в 1958 г. в г. Пущине на Оке, вблизи Серпухова, на радиоастрономической станции Физического института АН СССР под руководством Александра Ефимовича Соломоновича. Этот радиотелескоп представляет собой параболическое зеркало диаметром 22 м чрезвычайно жесткой конструкции, предложенной Павлом Дмитриевичем Калачевым, обеспечивающей отклонение от заданного профиля зеркала всего на 1 мм.

В 1966 г. подобная антенна с еще меньшим допуском была сооружена в Крыму на берегу моря, в районе Симеиза. Она находится в ведении Крымской астрофизиче-

ской обсерватории АН СССР. До последнего времени эти две антенны были единственными в мире антеннами таких размеров, позволявшими производить наблюдения на волнах 8—4 мм, чем и пользовались приезжавшие сюда зарубежные астрономы. Лишь в 1967 г. в Швеции введена в эксплуатацию зеркальная антенна диаметром 20 м, работающая на волнах 2—4 мм.

В 1963 г. в СССР была сооружена уникальная по тому времени зеркальная антенна диаметром 32 м для сантиметровых волн, предназначенная для космической связи и радиоастрономии. Это — двухзеркальная антенна касегреновского типа, радиотехническая часть которой разработана под руководством члена-корреспондента АН СССР Л. Д. Бахраха. В ней облучатель, расположенный в центре главного зеркала, освещает расположенное впереди небольшое вспомогательное зеркало, распределяющее поле оптимальным образом по поверхности этого зеркала и в пространстве.

Сейчас в СССР продолжается создание зеркальных антенн, среди них две антенны диаметром 64 и 70 м. Первая, близкая к завершению, расположена под Москвой и сооружается под руководством Алексея Федоровича Богомолова по проекту профессора Александра Георгиевича Соколова, вторая — под общим руководством Михаила Сергеевича Рязанского при кооперации большого количества институтов и заводов. Основная задача при создании больших антенн — обеспечить их работоспособность с учетом воздействия ветра, силы тяжести и др. дестабилизирующих факторов, для чего необходимо сохранять форму зеркала в пределах $1/16$ длины самой короткой принимаемой волны (5—3 см).

В СССР недавно вошел в строй радиотелескоп РАТАН-600 в станции Зеленчукской на Северном Кавказе. Его прообразом явился большой пулковский радиотелескоп (БПР), сооруженный в 1955 г. по проекту Семена Эммануиловича Хайкина и Наума Львовича Кайдановского. Радиотелескоп составлен из ряда отражающих щитов, способных передвигаться и менять угол наклона к горизонту. Особенность конструкции так называемой антенны переменного профиля состоит в следующем: нужно было получить ленточную вырезку из параболоида вращения, концентрирующую принятую энергию в направлении на облучатель, стоящий на земле и могущий передвигаться. В этой антенне стало возможно

избежать деформации зеркала за счет привязки конструкции к земле.

РАТАН-600 состоит из 900 отражающих щитов размером $2 \times 7,4$ м, расположенных приблизительно по окружности диаметром 588 м. Он рассчитан на прием волн до 8 мм и дает исключительно высокое мгновенное разрешение по азимуту, когда источник радиоизлучения проходит через неподвижный луч. Направление этого луча по углу места определяется соответствующей регулировкой положения щитов, которая может осуществляться полуавтоматически, по командам, задаваемым операторами, но с целью управления положением щитов по обеспечению сопровождения источников излучения при их передвижении вместе с вращением небосклона предусмотрена возможность использования ЭВМ. Этот радиотелескоп создан под руководством Юрия Николаевича Парийского и Дмитрия Викторовича Королькова.

В Армении под руководством Париса Мисаковича Геруни создается двухзеркальная сферическая антенна диаметром около 60 м, способная работать и в миллиметровом диапазоне волн.

Наблюдения на метровых волнах у нас ведутся на крупнейшем в мире Т-образном радиотелескопе ДКР-100 (авторы проекта В. В. Виткевич и П. Д. Калачев) и на большой синфазной антенне БСА (автор проекта Юрий Петрович Илясов), установленных в г. Пущине на Оке.

Плечо «восток-запад» первого представляет собой проволочное цилиндрическое параболическое зеркало с системой симметричных вибраторов, расположенных на его фокальной линии, вокруг которой зеркало может вращаться. Его размеры 40×1000 м, эффективная площадь 4000 м², диапазон частот 30—120 МГц. Линия Север—Юг состоит из 626 вибраторов. Перемножая сигналы, принятые обоими плечами с их взаимно перпендикулярными ножевыми диаграммами направленности, можно получить карандашный луч сечением 10×10 угловых минут на волне 3 м. Антенна БСА представляет собой фазированную антенную решетку из горизонтальных проводов, работающую на двух фиксированных волнах и предназначенную специально для исследования нейтронных звезд — пульсаров.

В 1974 г. вошел в строй построенный вблизи Харькова уникальный радиотелескоп коротких волн УТР-2,

работающий в диапазоне 10—25 МГц (или 30—12 м). Это тоже Т-образный телескоп. Плечо Север—Юг размером 1800×60 м состоит из шести рядов горизонтальных широкополосных вибраторов — 240 вибраторов в ряду (всего он содержит 1440 вибраторов, оси которых ориентированы вдоль линии Восток—Запад). Плечо Восток—Запад состоит из 900 таких же вибраторов, образующих шесть ориентированных вдоль параллели рядов по 100 вибраторов в ряду. Все вибраторы разбиты на 12 секций, сигналы которых усиливаются 12 антенными усилителями первого яруса и фазированы с помощью линий задержки с дистанционным управлением. После дополнительного усиления сигналов усилителями второго яруса и формирования на выходе плеча Север—Юг пяти ножевых лучей происходит их перемещение с выходными сигналами плеча Восток—Запад и получаются одновременно работающие пять остронаправленных лучей сечением порядка 1 кв. градуса. Число фиксированных положений луча составляет 2048 по склонению (по углу места) и 1024 по прямому выходению (приблизительно по азимуту). Колоссальная площадь антенны — 150 000 м² — обеспечивает прием слабого космического радиоизлучения.

Радиотелескоп УТР-2 разработан и сооружен сотрудниками ИРЭ АН УССР — А. В. Мень, Л. Г. Содиным, Ю. М. Брук и другими под руководством академика АН УССР Семена Яковлевича Брауде.

За послевоенные годы в СССР была проделана большая работа по разработке теории антенн. А. А. Пистолькорсу удалось обосновать и сформулировать принцип двойственности, сводящий расчет теории щелевых антенн к расчету аналогичных вибраторных антенн. С появлением полноповоротных зеркальных антенн с их неизбежным отклонением поверхности зеркала от расчетной возникла так называемая статистическая теория антенн, учитывающая влияние погрешностей конструкции на параметры антенн. В ее развитие внес большой вклад Яков Соломонович Шифрин.

Теория двухзеркальных и многозеркальных антенн разрабатывалась Л. Д. Бахрахом. Теории ФАР с учетом взаимного влияния их элементов посвящены оригинальные работы Григория Тимофеевича Маркова, Дмитрия Михайловича Сазонова и других авторов, а адаптивным антеннам — Якова Давидовича Ширмана и соавторов.

Существенный вклад в развитие различных разделов теории антенн и фидерных линий внесли А. Р. Вольперт, В. П. Шестопалов, Я. Н. Фельд, А. З. Фрадин. Выпущен целый ряд учебников и монографий по антеннам.

Особо важное значение для ряда прикладных задач имела проблема синтеза антенн, т. е. расчет схемы и возбуждения антенны по требуемой ее диаграмме направленности. В теории антенн показывается, что распределение тока в антенне и ее диаграмма направленности связаны прямым и обратным преобразованием Фурье. Однако методы расчета, основанные на этом соотношении, так же, как и другие методы синтеза (например, предложенный А. А. Пистолькорсом метод расчета с помощью функции Матье), отличаются той особенностью, что малые изменения исходных данных вызывают обычно большие вариации решений, так что сформулированные таким образом задачи относятся к классу математически неустойчивых или некорректно поставленных задач. Методы решения таких задач были указаны академиком А. Н. Тихоновым и в отношении синтеза антенн развиты Л. Д. Бахрахом, Е. Г. Зелкиным и рядом других авторов. Результат этой работы отражен в фундаментальной монографии «Синтез излучающих систем», написанной Л. Д. Бахрахом и С. Д. Кренициким, вышедшей в свет в 1974 г. Таким образом, проблему синтеза антенны по заданной диаграмме направленности можно считать решенной.

Нельзя не сказать несколько слов о людях, которые выполняли и выполняют огромную работу по созданию у нас самой современной техники в области антенн, — об антенных специалистах.

Выше назывались фамилии, связанные с теми или иными достижениями в нашей антенной технике, но конечно можно упомянуть фамилии еще многих и многих крупных ученых и инженеров, внесших достойный вклад в это дело и напряженно работающих в этой области, обеспечивая Советской Родине приоритет в области теории и оригинальные решения в области конструкции и технологии создания антенных устройств для любых задач, возникающих в современных условиях научно-технической революции.

Подготовлено по материалам доклада члена-корреспондента АН СССР А. А. Пистолькорса, посвященного развитию советской антенной техники за 60 лет со дня Великой Октябрьской социалистической революции.

Предисловие

В первой части настоящей брошюры на основе доклада члена-корреспондента АН СССР А. А. Пистолькорса, известного советского специалиста, работающего в области антенной электродинамики почти 60 лет, кратко изложена история развития отечественной теории и техники антенностроения. Остается к этому добавить, что по мере повышения энергетических или информационных потоков или и того и другого одновременно в радиотехнических системах, использующих в качестве рабочего канала свободное пространство, во многих отношениях доля антенных устройств возрастет, в том числе и в экономическом отношении. Ныне реализация ряда многообещающих проектов, вплоть до создания космических солнечных энергосистем и глобальных систем управления не только техническими, но и экологическими процессами, в значительной мере зависит от нашей способности создавать наземные и космические крупноразмерные (площадью порядка миллиона квадратных метров и более) антенные и аналогичные им сооружения с предельными электродинамическими характеристиками при экономических показателях, приемлемых для современной техники.

Естественно, создание подобных антенн пока что проблематично. Как представляется, даже формулировка некоторых общих проблем технологии антенностроения может привлечь к ним внимание не только радиофизиков и радиотехников, но и специалистов авиа- и машиностроения, материаловедения, механики, геодезии и других смежных областей, что, в свою очередь, в определенной мере способствовало бы решению предстоящих задач отечественной радиотехники.

Учитывая, что научно-техническая революция, повсеместное внедрение радио, электронных и других физических систем резко повысили уровень знаний специалистов всех направлений в области радиотехники, представляется возможным не приводить в брошюре сведения, известные из общего курса физики. Для более подробного рассмотрения отдельных положений или проблем можно обратиться к литературе, ссылки на которую даются в порядке изложения материала. Предпо-

лагается также, что читатель знаком с основами дифференциального и интегрального исчисления и векторной алгебры.

Общие сведения

Антенно-фидерные устройства (АФУ), иногда в случае сложности их структуры называемые системами (АФС), возбуждают в окружающем их пространстве электромагнитные волны или, отзвываясь на стороннее поле, принимают их. Как правило, искусственно возбуждаемые электромагнитные поля несут определенную информацию, либо вносимую тем или иным способом модуляции (радиовещание, телевидение, связь, процессы передачи телеметрических данных или сигналов управления), либо характеризующую особенности распространения поля (отражения от окружающей среды, различных объектов, находящихся в секторах обзора радиолокационных станций и т. п.).

Электромагнитные поля естественного происхождения (их частота, структура, направление распространения) характеризуют различные физические природные процессы, в том числе и не только близкие по времени к моменту наблюдения, но и происходившие в любой предшествующий период времени.

Изучение естественных электромагнитных полей с помощью направленных антенн, радиоприемной, регистрирующей и обрабатывающей аппаратуры расширяет знание о мире, в котором мы существуем как часть природы.

Большинство изученных электромагнитных процессов может быть математически описано с помощью различных соотношений, предложенных в прошлом веке английским ученым Максвеллом и несколько позднее канонизированных рядом известных ученых.

Напомним, что в ныне принятой для гармонически изменяемого электромагнитного поля форме уравнения Максвелла связывают зависящие от времени и пространственных координат магнитное поле \vec{H} и электрическое поле \vec{E} через параметры среды, в которой идет процесс распространения. В общем случае среда может

быть охарактеризована комплексными диэлектрической проницаемостью ϵ^* , магнитной проницаемостью μ^* и проводимостью σ^* , которые являются функциями координат точек пространства и времени. Для воздуха и большей части космического пространства уравнения Максвелла можно представить в виде системы двух векторных уравнений¹ [1].

$$\epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \text{rot } \vec{H},$$

$$\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\text{rot } \vec{E}.$$

Здесь ϵ_0 — диэлектрическая, а μ_0 — магнитная проницаемости, которые в системе единиц СИ приняты:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36} \cdot 10^{-9} \text{ Ф/м}, \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Г/м}.$$

Напряженность электрического поля в этой системе выражается в вольтах на метр (В/м), напряженность магнитного поля в амперах на метр (А/м), расстояние — в метрах (м), а время — в секундах (с).

Известная физическая трактовка уравнений Максвелла гласит, что если в некоторой точке пространства меняется во времени электрическое поле \vec{E} , то это изменение сопровождается процессом, приводящим к изменению в перпендикулярной вектору \vec{E} плоскости вихревого магнитного поля \vec{H} и наоборот (рис. 1). Такая трактовка позволяет осуществлять математические расчеты распространения описываемых уравнениями электромагнитных полей путем решения дифференциальных уравнений при различных граничных условиях.

В курсе электродинамики определено, что совместное решение уравнений Максвелла при учете некоторых

¹ Следует, по-видимому, не углубляясь в пока еще далеко не вполне ясную физическую сущность явлений, часть из которых мы отождествляем с электромагнитными, отметить, что, по мнению ряда авторов, использование канонизированных уравнений Максвелла корректно не для всех случаев, и для более полного описания интересных нас процессов больше пригодно представление через так называемые «четыре векторы», или «потенциалы», или решения интегральных уравнений. Все, кого интересует эта проблема, могут более подробно ознакомиться с ней, обратившись к источникам [2, 3].

дополнительных условий приводит к так называемому волновому уравнению, которое в простейшем случае имеет вид:

$$\epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial x^2}.$$

Из курса математики известно, что подобные уравнения имеют решения в виде функции:

$$H = F(t - \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} x),$$

которую принято называть волновой функцией. Здесь F определяется характером первоначального изменения величины H (или, в аналогичной записи для электрического поля, E).

В практике радиотехники чаще всего первоначальное возмущающее воздействие принимается как периодическое. Функция \vec{H} (\vec{E}) носит синусоидальный характер. В этом случае решение волнового уравнения может быть записано в форме

$$H_Y = -H_M \sin 2\pi(f - x/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}),$$

где H_M — амплитуда магнитного поля (в А/м), а f — частота колебаний (в Гц). Индекс «Y» указывает, что поле направлено вдоль оси «Y» декартовой системы координат. Волновая функция отражает, таким образом, гармонически распределенное в пространстве поперечное поле, продвигающееся в направлении координатной оси «X» с фазовой скоростью

$$c^* = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}.$$

Для вакуума и, практически, для воздуха $c^* \approx c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

В общем случае, когда ϵ , μ и σ отличаются от ϵ_0 , μ_0 и σ_0 для вакуума, c^* зависит от частоты и пространственного распределения среды. Это явление широко используется для построения фокусирующих, преломляющих и возбуждающих устройств.

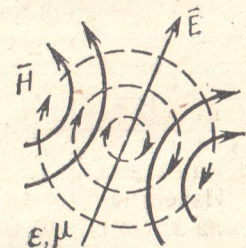


Рис. 1. Возникновение магнитного поля \vec{H} при изменении электрического поля \vec{E}

В теории колебаний широко применяются понятия групповой и фазовой скорости распространения волн. Групповая скорость характеризует быстроту передачи энергии; фазовая, как это и соответствует ее названию, — путь, пройденный в среде, и фазу волны в данной точке пространства относительно некоторой начальной.

Возвращаясь к уравнениям Максвелла, отметим, что чем быстрее во времени меняется первичное магнитное поле заданной амплитуды, тем интенсивнее наводимое электрическое поле. В принципе, же обычные промышленные электросети (50 Гц) излучают, но для большинства информационных систем целесообразно применение частот 10^4 — 10^{12} Гц.

Кроме этого, для возбуждения энергетических колебаний в пространстве необходима специальная конфигурация возбуждающего поля, достигаемая несколькими способами. Например, на рис. 2, а изображена схема

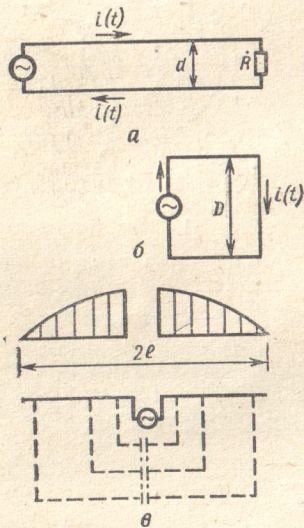


Рис. 2. Возбуждение поля в пространстве
вращаемые переменные (рис. 2, б).

Антенна, подобная изображенной на рис. 2, в, носит название диполя, или вибратора. Степень ее излучения

двухпроводной линии, замкнутой на нагрузку, а на рис. 2, в — схема такой же линии, но разомкнутой. Поля, порождаемые протекающим в первой линии током, при малых d взаимно нейтрализуются, и излучение слабо. Во втором случае при переменных во времени токах емкости, которыми обладают провода относительно друг друга и окружающего пространства, порождают излучение из-за нескомпенсированности магнитных полей.

Аналогично при значительном расстоянии D между замкнутыми проводами (так называемые рамочные или кольцевые антенны) также появляются взаимно нескомпенсированные переменные поля, порождающие излучение

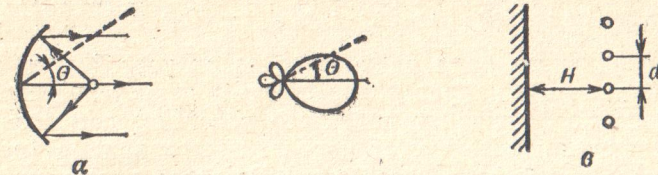


Рис. 3. Направленные свойства решеток и зеркальных антенн

(или чувствительность приема колебаний) зависит от соотношения между размерами и частотой колебаний. В свободном пространстве максимум излучения (приема) энергетического поля у такого вибратора лежит в плоскости, перпендикулярной оси проводов, и минимум — в направлении этой оси.

В практике нужны как всенаправленные антенны, так и антенны, обладающие селективными (по углам) характеристиками. Последнее достигается путем придания АФУ направленных свойств. Например, вибратор, помещенный в фокус цилиндрического параболического зеркала, в плоскости, перпендикулярной его оси (рис. 3, а), будет обладать избирательной чувствительностью. В созданной такой комбинации зеркальной антенне вместо вибратора можно применять другой, иногда весьма сложный возбуждающий линейный элемент — излучатель. Диаграмма направленности зеркальной антенны изображена на рис. 3, б.

Аналогичного направленного эффекта можно достичь и другими путями, например, если расположить на определенных расстояниях несколько вибраторов и параллельно плоскости их расположения — плоское зеркало (рис. 3, в).

Естественно, геометрическое расположение элементов таких антенных систем и электродинамические характеристики каждого элемента должны быть надлежащим образом рассчитаны.

В антенной технике разработано большое количество излучающих устройств. Различают вибраторные, спиральные, щелевые, рупорные антенны, направленные свойства которых усиливаются с помощью различного рода так называемых апертурных систем (линз, зеркал, решеток и т. д.). Классификация антенн и их элементов

в целом пока не устоялась, и желающие более подробно изучить этот вопрос могут обращаться к специальным изданиям.

В различного рода радиотехнических устройствах к антеннам, кроме направленности, предъявляются требования по коэффициенту полезного действия, помехозащищенности, полосе частот неискаженного приема (передачи), способности достаточно быстрого управления диаграммой направленности в пространстве, а часто и во времени.

Наиболее сложными антенными системами являются так называемые многоэлементные, особенно различные фазированные антенные решетки с быстрым управлением положением луча в пространстве, а также другие АФС, обеспечивающие аналогичные внешние характеристики.

Проблемы создания фазированных антенных решеток

Появление фазированных антенных решеток (ФАР) в различных радиотехнических системах стало весьма значительным научно-техническим достижением. Разработка ФАР прошла достаточно длинный путь, и в настоящее время уже можно подвести некоторые итоги и наметить проблемы и направления развития теории и техники ФАР.

ФАР уже применяются на практике и доказали свою эффективность при выполнении функций, которые не могут быть реализованы с помощью обычных антенн. ФАР в основном применяют в радиолокации, где они расширили возможности радиолокационных станций благодаря значительному увеличению количества обнаруживаемых и сопровождаемых объектов. Последнее объясняется большой гибкостью и быстротой управления диаграммой направленности ФАР, благодаря чему изменение направления луча (сканирование), а также его расширение или сужение может происходить за несколько микросекунд. Благодаря отсутствию движущихся механизмов и возможности широкого применения твердотельных компонентов, а также из-за наличия большого числа параллельно работающих каналов мо-

жет быть существенно повышена надежность системы. Возможно также обеспечить чрезвычайно высокий уровень излучаемой мощности, генерируемой большим числом отдельных источников.

Необходимо отметить, что от момента появления идеи ФАР до ее практической реализации прошло достаточно много времени, что объясняется отсутствием на начальном этапе двух ключевых компонентов ФАР:

1) электронного быстродействующего фазовращателя, обеспечивающего управление фазой излучения каждого элемента решетки; и 2) электронного вычислительного устройства (управляющей ЭВМ), которое могло бы управлять положением луча ФАР в соответствии с заданной программой. Разработка этих двух компонентов стала решающим событием, после чего оказалось возможным практически создать ФАР. Несомненно также, что появление ФАР тесно связано с современным прогрессом в области генерации мощности на СВЧ, теории приема и обработки сигналов, с развитием радиофизики и радиотехники в целом.

На протяжении последних 20 лет ФАР с электронным сканированием луча служит предметом всестороннего изучения и исследования. Вопросам теории, расчета и конструирования ФАР посвящено огромное число статей и монографий, что связано со сложностью и многогранностью этих устройств, большим числом затрагиваемых взаимосвязанных проблем радиотехнического, математического, информационного, конструкторского, экономического плана. Однако ФАР не получили еще широкого практического применения. Основным препятствием этому является их пока еще относительно высокая стоимость, причем в нее входят затраты не только на создание антенной решетки, но также и на ее эксплуатацию.

Наметившиеся в настоящее время проблемы, разрешение которых приведет к существенному прогрессу ФАР и расширению возможностей их практического использования, можно условно разделить на три группы: электродинамические, информационные, экономические.

Первая группа проблем связана с оптимальным проектированием ФАР с точки зрения электродинамических и радиотехнических характеристик: излучаемой мощности, ширины луча, диаграммы направленности,

уровня боковых лепестков, углового сектора сканирования луча. Электродинамическое проектирование ФАР связано с решением ряда внешних и внутренних электродинамических задач теории антенн. Внутренние — это задачи о получении требуемого амплитудно-фазового распределения электромагнитного поля на излучающей апертуре ФАР. Внешние — задачи о формировании диаграммы направленности ФАР.

Строгое решение этих задач, а также учет их взаимосвязи позволят рассчитывать характеристики антенны и находить оптимальные варианты конструкции антенны, наиболее соответствующие поставленным требованиям. При разработке ФАР весьма сложны как внутренние, так и внешние задачи. Внутренние задачи осложнены еще и высокими требованиями к устройствам, которые должны уже не просто обеспечивать требуемое фиксированное амплитудно-фазовое распределение электромагнитного поля в апертуре, а управлять распределением по определенному закону. Внешние задачи имеют дело с диаграммой направленности, которая представляет собой функцию не только углов, но и управляющего воздействия. В ФАР происходят сложные явления взаимодействия отдельных излучателей, проявляющиеся в изменении направленности и входного сопротивления излучателя при включении его в решетку. В настоящее время теория учета взаимного влияния элементов в ФАР интенсивно разрабатывается.

Важной задачей является выбор геометрии ФАР. Наибольшее распространение получили плоские ФАР, с помощью которых можно обеспечить сканирование луча в пределах части сферы. При дальнейшем увеличении сектора сканирования, в частности до полусферы, необходимо применять несколько плоских ФАР или ФАР с более сложной геометрией: кольцевые, сферические, конические и в общем случае так называемые конформные, в том числе совпадающие с формой объекта, например самолета, на котором они размещаются.

В целом все задачи, связанные с выбором оптимальных параметров ФАР, получили название задач синтеза антенных решеток. Теория и методы их решения получили в последнее время значительное развитие.

Можно с уверенностью сказать, что в области проблем оптимального электродинамического проектирова-

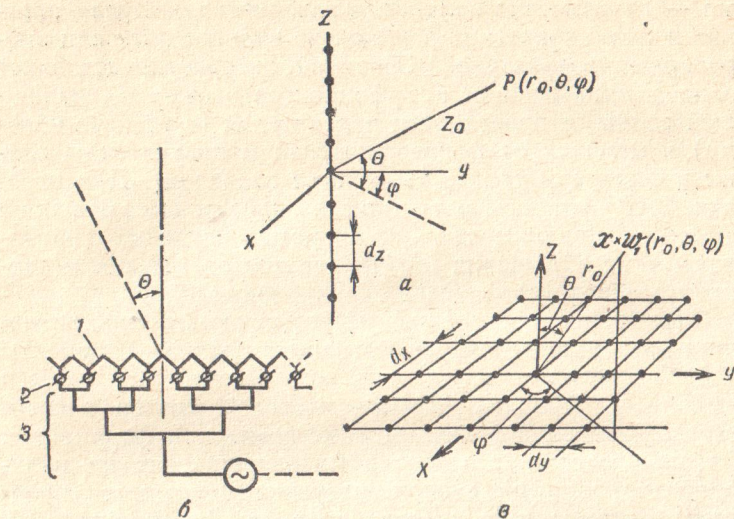


Рис. 4. Линейная (а, б) и плоская (в) фазированные решетки

ния ФАР уже сейчас получены некоторые фундаментальные результаты и сделан ряд открытий, однако нет сомнений и в том, что антенные решетки все еще представляют обширное поле деятельности для исследователей. Целесообразно отметить некоторые конкретные достижения и выделить проблемы дальнейшего развития применительно к трем основным функциональным частям ФАР (рис. 4): решетке излучателей 1, фазовращателям 2 и системе возбуждения 3.

Решетка излучателей представляет собой систему элементов, излучающих или принимающих сигналы в режимах передачи и приема соответственно. Лицевая поверхность этих элементов составляет границу раздела со свободным пространством. С противоположной стороны элементы соединяются с фазовращателями. Основная проблема при проектировании этих частей ФАР заключается в эффективной передаче энергии через излучающие элементы. В режиме приема решетка излучателей должна идеально (т. е. с высоким КПД и без отражений от лицевой стороны) передавать на вход фазовращателей энергию падающих волн. В настоящее время анализ процесса передачи через решетку излучателей — эта главная и сложная теоретическая пробле-

ма — практически полностью завершен для случая плоских и цилиндрических решеток из волноводных или вибраторных излучателей. Основным интерес представляет задача минимизации коэффициентов отражения падающей волны от поверхности излучателей (в режиме приема) и бегущей от фазовращателей к излучателям волны в фидерном тракте (в режиме передачи). Для плоских ФАР удалось, в частности, достаточно подробно выяснить причины так называемых «нулевых провалов», т. е. обращения коэффициентов отражения в единицу для некоторых углов сканирования [6].

Проблемы построения эффективно функционирующих фазовращателей рассмотрены в разделе «Элементы ФАР». Следует отметить, что, хотя в настоящее время и выполнены фундаментальные исследования по распространению волн в ферритовой среде и в ферритовых фазовращателях, а также в фазовращателях на полупроводниковых *pin*-диодах, насущными остаются проблемы оптимального проектирования фазовращателей, удовлетворяющих целому ряду технических требований, например работе в полосе частот, выдерживании заданной точности фазового сдвига, надежности, температурной стабильности и т. п.

Как следует из модели ФАР, представленной на рис. 4, роль системы возбуждения сводится к обеспечению формирования амплитудно-фазового распределения поля на лицевой поверхности излучателей, выбранного с целью получения оптимальной диаграммы направленности. Анализ существующих систем возбуждения ФАР показывает, что в ходе эволюционного процесса конструирования и поисков новых технических решений роль возбуждающих устройств усложнилась и возросла, функции этих систем расширились. В настоящее время и в будущем для работы в широкой полосе частот предусматриваются возможности использования большого числа передатчиков, распределенных в системе возбуждения, применения системы многоходового возбуждения, обеспечивающей одновременное формирование перекрывающихся лучей, охватывающих все пространство перед раскрытием ФАР.

Информационные проблемы ФАР связаны с вопросами оптимальной обработки сигналов в приемных антенных решетках. Приемные ФАР функционируют обычно в составе различных радиосистем, в первую оче-

редь радиолокационных, к которым в настоящее время предъявляются повышенные требования по таким характеристикам, как дальность обнаружения, разрешающая способность, помехозащищенность, быстродействие и т. п. Совместная реализация предельных (или почти предельных) значений перечисленных характеристик недостижима без совершенствования методов обработки сигнала, излучаемого и принимаемого антенной системой. Поскольку сигналы в этом случае изменяются как во времени, так и в пространстве, обработка должна быть пространственно-временной. Из-за наличия случайных шумов, принимаемых совместно с полезным сигналом, обработка должна носить характер фильтрации, т. е. выделения полезного сигнала на фоне шумов, и использовать методы и приемы математической статистики, теории информации, теории статистических решений. Благодаря пространственно-временной фильтрации при обработке сигналов, принимаемых элементами ФАР, возможности выделения сигналов на фоне внешних шумов и помех существенно расширяются.

Пространственно-временная обработка сигналов в ФАР заключается, согласно общей схеме ее построения, приведенной на рис. 4, в, в суммировании принимаемой элементами ФАР смеси сигналов и шумов x_i с весами w_i :

$$y = \sum_{i=1}^n x_i \cdot w_i,$$

где n — число элементов ФАР. Задача состоит в выборе такого набора комплексных весовых коэффициентов ($w_1 \dots w_n$), который оптимизировал бы радиосистему в смысле некоторого критерия качества. При известных характеристиках полезного сигнала, собственных шумов системы, внешних шумов и помех оптимальное решение для практически интересных критериев качества методами теории информации может быть найдено в конечной форме. Однако вычисление оптимального набора весовых коэффициентов оказывается весьма громоздким: количество необходимых для этого арифметических операций пропорционально третьей степени числа элементов ФАР. Поэтому при большом числе излучателей вычисления не могут быть выполнены в реальном масштабе времени, даже при использовании сверхбыстродействующих ЭВМ.

Этот факт главным образом и объясняет тот значи-

тельный интерес, возникший в последнее время, к так называемым адаптивным антенным решеткам, способным автоматически подстраиваться к изменяющимся внешним условиям, изменяя в процессе функционирования диаграмму направленности, частотные характеристики или другие параметры с помощью цепей обратной связи. Адаптация производится с помощью специальных устройств, представляющих собой управляемые адаптивным процессом или отдельными цепями обратной связи фазовращатели и аттенюаторы. Адаптация позволяет осуществлять как сканирование диаграммы направленности, так и оперативно подбирать ее оптимальную форму: главный луч устанавливается в заранее определенном направлении для приема ожидаемых сигналов, в то время как в направлениях на источники мешающих сигналов формируются нули диаграммы направленности. Важно отметить, что при этом не требуется априорного знания характеристик мешающих сигналов (это могут быть как организованные, так и естественные источники шумов); важно лишь, чтобы они отличались от полезных сигналов по спектральному составу или по направлению прихода. Условно адаптивные антенные решетки могут быть разделены на решетки, повышающие отношение сигнал/шум как при пространственно распределенных, так и при пространственно сосредоточенных (точечных) помехах; решетки, осуществляющие самофокусировку в направлении принимаемого сигнала (самофокусирующиеся ФАР [5] — исторически первый тип адаптивной антенной решетки), и решетки, осуществляющие адаптивное слежение за движущейся целью.

Развитие адаптивных антенных решеток находится еще на начальной стадии, и многие проблемы как теоретического, так и практического характера пока остаются нерешенными. Выполненные до настоящего времени работы относятся к решеткам с относительно небольшим числом элементов, что связано со сложностью и высокой стоимостью адаптивных систем. Однако развитие этой области идет быстрыми темпами, и будущее таких систем представляется весьма перспективным. В настоящее время и в ближайшем будущем работы по адаптивным антенным решеткам отмечаются в СССР и за рубежом в числе наиболее актуальных направлений исследований в области ФАР. Ожидается, что значи-

тельному расширению возможностей адаптивных антенных решеток будет способствовать внедрение новых быстродействующих ЦВМ, позволяющих существенно улучшить адаптивные характеристики, например снизить время адаптации. Более высокое быстродействие и значительный объем памяти ЭВМ позволят реализовать на практике новые алгоритмы адаптации и методы цифровой обработки информации, в настоящее время не применяющиеся из-за чрезмерно больших объемов требуемых вычислений.

Альтернативой антенным решеткам с цифровыми процессорами для обработки информации являются антенные решетки с обработкой сигналов методами когерентной оптики и голографии — так называемые радиооптические антенные решетки. Известно, что угловое распределение интенсивности излучающих объектов и амплитудно-фазовое распределение в плоскости апертуры ФАР, принимаемых от них сигналов, связаны двумерным фурье-преобразованием. Подобным же преобразованием связаны распределения комплексной амплитуды света в передней и задней фокальной плоскостях собирающей линзы в параксиальном приближении. Этот факт и выражает сущность обработки сигналов в приемных ФАР с помощью методов когерентной оптики: для пространственной обработки информации, принятой плоской ФАР, достаточно перенести комплексное распределение амплитуды радиосигнала по апертуре ФАР (которое можно трактовать как радиоголограмму) с помощью модулятора света в оптическое изображение. Поместив последнее в переднюю фокальную плоскость собирающей линзы, получим в задней фокальной плоскости распределение света, воссоздающее угловое распределение излучающих радиоцелей. Достоинством подобной обработки информации является ее гибкость и быстродействие (определяемое, по существу, скоростью света). В оптической области можно легко выполнить и многие другие интегральные преобразования (преобразования свертки, Френеля и др.), служащие основным звеном в решении многих задач пространственно-временной обработки сигналов в ФАР.

В настоящее время уже известен ряд радиосистем с ФАР, использующими оптические методы обработки информации (например, РЛС бокового образа), основные же технические и многие теоретические проблемы пред-

стоит решать в будущем. В целом, видимо, цифровые и оптико-голографические методы в ФАР будут взаимно дополнять друг друга.

Одной из основных тенденций развития ФАР, направленной на создание недорогих и простых в эксплуатации систем, является применение полностью твердотельных антенных решеток с началом обработки (оцифровыванием) сигнала уже на этапе приемного элемента антенны, т. е. по высокой частоте. Уменьшение габаритов может быть достигнуто использованием полосковых линий и компонентов в интегральном исполнении. К большому снижению стоимости ФАР приведет существенный шаг по пути создания компактных, дешевых и простых в эксплуатации СВЧ-приборов, в первую очередь фазовращателей.

Другой характерной тенденцией можно считать применение гибридных схем питания ФАР. В таких системах сочетается достижение нужных характеристик, обеспечиваемых при наличии нескольких питающих фидеров, с более низкой стоимостью. В некоторых случаях с помощью гибридных систем питания удается удовлетворить специальные требования, не достижимые другими способами. Например, вместо большой ФАР может быть предложена система, состоящая из решетки ограниченных размеров, возбуждающей большую параболическую антенну. Решетка обеспечивает возможность получения многих лучей и управления положением луча, в то время как параболоид дает повышение коэффициента усиления системы (в ущерб угловому перекрытию). Такие гибридные системы в ряде случаев выгоднее «классических» ФАР, так как они позволяют получать несколько ухудшенные, но приемлемые (с точки зрения конкретных условий и требований) технические характеристики при меньшей стоимости. Очевидно, что и в будущем сохранится тенденция к использованию гибридных систем питания ФАР, удовлетворяющих специфические требования конкретного применения при минимальной стоимости.

Не менее важна проблема снижения затрат на эксплуатацию ФАР и контроль работоспособности ее элементов. ФАР в целом присуща чрезвычайно высокая надежность. Несмотря на то, что вероятность выхода из строя одного из тысяч отдельных излучающих элементов очень высока, вероятность появления катастрофиче-

ских отказов в ФАР незначительна. Это объясняется тем, что каждый отдельный излучающий элемент и фазовращатель в ФАР с большой апертурой играет лишь незначительную роль в формировании луча и на него падает лишь небольшая доля общей энергии излучения. Таким образом, выход из строя небольшого процента этих элементов не ухудшает серьезно общих характеристик антенны.

Парадоксально, но это преимущество ФАР сильно затрудняет диагностирование в них неисправностей. Подчас бывает весьма затруднительно выявить выход из строя одного или нескольких излучающих элементов и определить, в каком именно элементе произошел отказ. В настоящее время ведутся широкие исследования, направленные на выработку методики и построение функциональных схем устройств для выявления отказов элементов ФАР в процессе их эксплуатации. Основная задача применения всех этих методов состоит в снижении эксплуатационных расходов при одновременном повышении надежности работы системы в смысле сохранения требуемых технических характеристик.

Значительное внимание уделяется в последнее время вопросам оптимального проектирования ФАР на ранних этапах их разработки. Техника проектирования ФАР достигла уже такого уровня, который позволяет выполнять предварительную оценку их стоимости и параметров (подобно тому, как определяется проектная стоимость, например, строительных объектов) и указать общие пути и методы снижения затрат. Современный уровень техники позволяет весьма уверенно прогнозировать дальнейшее совершенствование и расширение применения ФАР.

Куполообразные и комбинированные антенны с качанием в полусфере

Фазированные антенные решетки можно создавать не только на основе плоских структур, но и в виде криволинейных, в частности, выпуклых поверхностей (рис. 5), а также комбинированных устройств, в том числе с использованием в качестве основной или вспомогательной формирующей системы диэлектрических

или других видов линз. Подобные схемы антенных устройств в ряде случаев имеют преимущества по сравнению с традиционными [7].

В качестве примера рассмотрим комбинацию из пассивной преломляющей линзовой оболочки и управляемой плоской ФАР (рис. 6), которую будем называть купольной ФАР (КФАР).

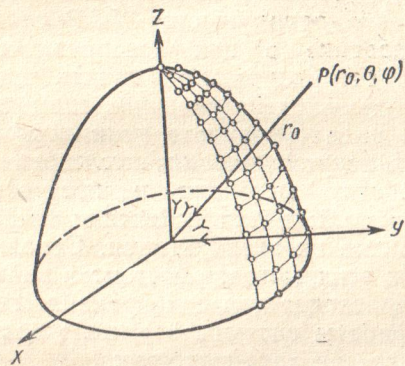


Рис. 5. Осесимметричная выпуклая фазированная антенная решетка

отрезков фидерных (волноводных или коаксиальных) линий. В последнем случае в лучевом приближении систему можно рассматривать как гнутую ФАР, у которой между управляемыми элементами (фазовращателями) и излучателями вместо принудительного распространения по фидеру организовано так называемое квазиоптическое [8].

Естественно, круг проблем, связанных с расчетом и анализом подобных систем, заметно сложнее, чем в случае плоских ФАР. Весьма условно, но полезно для практических расчетов, эти задачи можно разбить на такие, например, три группы: во-первых, связанные с расчетом и анализом линзы; во-вторых, с расчетом и анализом ФАР, облучающей оболочку, и, в-третьих, с взаимодействием ФАР и линзы. При подобной постановке в модель системы приходится вводить определенные априорные ограничения. Целесообразно для широкого круга задач задавать систему осесимметричной, а ось симметрии принимать совпадающей с нормалью к геометрическому центру ФАР.

Функциональное назначение линзовой оболочки — увеличить сектор сканирования плоской ФАР в 1,5—3 раза за счет дополнительного преломления лучей — достигается благодаря приданию оболочке свойств призмы, хорошо известной в оптике. Конструктивно линзовую оболочку выполняют как из диэлектрика, так и из

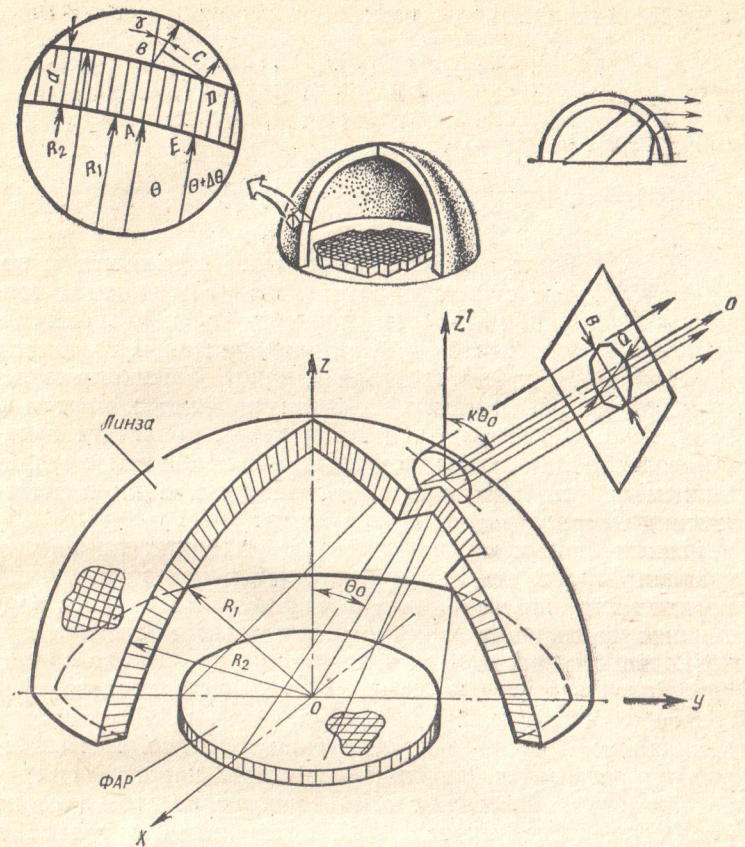


Рис. 6. Общая схема построения купольной ФАР

При поэтапных расчетах удобно сначала пользоваться лучевыми представлениями, считая, что линза согласована с пространством внутри и вне купола, что коэффициент редукции направления излучения задан, парциальные диаграммы излучателей известны, они плавные и не зависят от фазовых распределений и т. п.

Для полусферической купольной линзы с принудительным преломлением зависимость коэффициента преломления от угла θ (см. рис. 6) при коэффициенте ре-

дукции угла сканирования k и принятии ряда условий определяется соотношением:

$$n(\Theta) = \frac{R_2}{d} \int_0^{\Theta_0} \sin(\kappa-1)\theta d\theta,$$

при $k = \text{const}$

$$n(\Theta) = n_0 + \frac{R_2}{(\kappa-1)d} [1 - \cos(\kappa-1)\Theta_0].$$

Качественный анализ приведенного соотношения показывает, что n существенно зависит от отношения толщины оболочки к внешнему радиусу R_2 , и пределы изменения n при желательных в практике малых толщинах d весьма велики (до десятков единиц). Уменьшение перепадов до реализуемых величин привело к мысли о зонировании, которое, в свою очередь, облегчает задачи согласования линзы, но усложняет проблемы с сохранением формы диаграмм направленности и их положения в пространстве и в полосе частот.

Пассивная линза на отрезках фидерных линий достаточно просто реализуется, но, как и при зонировании из диэлектрика, имеет ряд отрицательных свойств (затенение части раскрыва, частотные зависимости и т. д.).

В любом варианте для получения на выходе оболочечной линзы плоского (или, точнее, квазиплоского) фазового фронта в раскрыве облучающей ФАР требуется нелинейное фазовое распределение, близкое, как показывают расчеты, к зависящей от угла θ каустике сферических зеркал. В связи с тем (качественно это видно из рис. 6), что возбуждаемая на оболочечной линзе зона меньше проекции действующего раскрыва ФАР, в рассматриваемом случае геометрические размеры активной ФАР должны быть больше плоской ФАР традиционного типа (без купольной линзы).

Отсылая заинтересованного читателя к более строгим научно-техническим материалам [8 и др.], целесообразно лишь привлечь внимание к ряду интересных задач, возникающих в подобных системах. Так, находя лучевым способом зависимость $n(\theta)$ и на ее основе зависимость $P(\theta)$ (рис. 5) в практических задачах получают лишь первое приближение. Далее необходимо построение более строгой модели, учитывающей амплитудные распределения, дифракционные эффекты, наличие у эле-

ментов линз и (особенно) ФАР направленных свойств, искажаемых взаимосвязью излучателей, отражениями от элементов, в том числе многократными и т. д. (рис. 7).

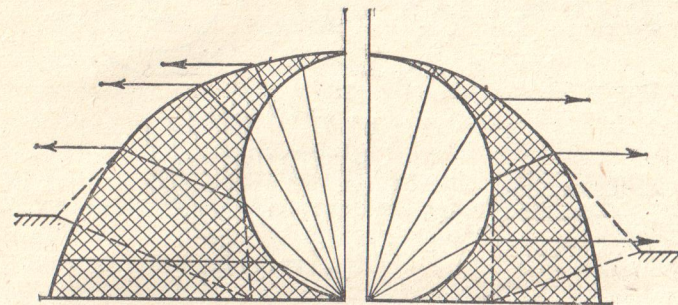


Рис. 7. Профили диэлектрических линз с коэффициентом редукции, равным двум для показателей преломления 1,5 (слева) и 2 (справа)

Определенный интерес для ряда антенных задач (в том числе и субмиллиметровом и, возможно, даже оптическом диапазонах) представляют также оболочечные схемы с размещением облучателей внутри оболочки на расстоянии F , меньшем среднего радиуса оболочки.

Подобная схема обладает рядом преимуществ, в частности, при качании в полной сфере не происходит затенения соседними облучателями.

Для реализации фокусирующих свойств показатель преломления оболочки должен обладать в общем случае двойной зависимостью: от радиуса ρ и угла φ с периодичностью φ_0 (рис. 8).

Задача отыскания искомой зависимости была решена В. Н. Сергеевым [9], и оказалось, что в природе имеется живой аналог такой схемы — суперпозиционный глаз насекомых, преимущественно ночных.

Предназначенный для функционирования в условиях пониженной освещенности, суперпозиционный глаз отличается от обычной схемы глаза крупных животных более сложной схемой построения и представляет собой совокупность множества одинаковых модулей (омматидиев), число которых может достигать десятков тысяч. Каждый модуль, в свою очередь, состоит из преломляющего цилиндра из неоднородного диэлектрика с про-

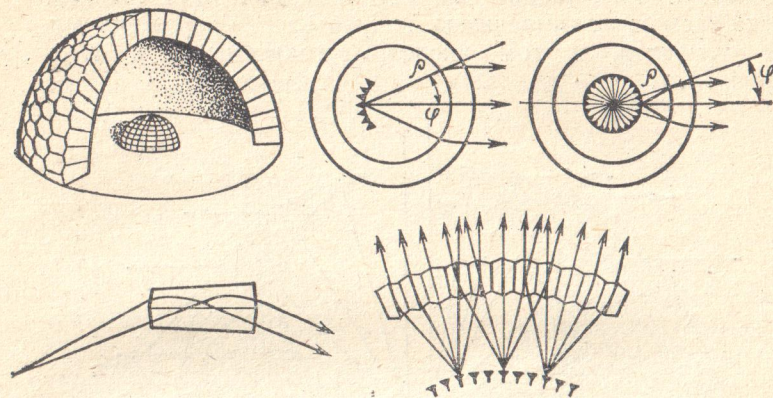


Рис. 8. Перископическая оболочечная линза

светленным хитиновым защитным покрытием и световода, окруженного зрительными клетками. Свет, войдя внутрь световода, возбуждает клетки-приемники, и при этом затухает.

Решение задачи об оболочечных линзах с фокусным расстоянием меньше радиуса кривизны оболочки еще раз подтвердило жизнеспособность предположения, что в природе всегда можно найти аналог техническим изобретениям.

Куполообразные линзовые системы имеют определенные недостатки. В частности, в перископической системе-аналоге суперпозиционного глаза — невелик коэффициент использования поверхности, в пассивной зонированной оболочке (КФАР) имеются ограничения по широкополосности, в осесимметричных решетках избыточно число активных элементов и т. п. Однако достигаемые в них параметры (равномерность потенциала в увеличенном секторе обзора, возможность одновременной видимости в полусфере и т. п.) приводят к мысли о желательности дальнейшего широкого изучения этого класса антенных устройств.

Элементы ФАР

Любая ФАР состоит из трех основных частей, определяющих ее описанные ранее замечательные свойства:

решетки излучающих элементов, набора фазовращателей и системы возбуждения.

Понятие «антенная решетка» означает совокупность любых излучающих элементов, и следовательно, все ранее известные антенны могут быть использованы в качестве элементов решетки.

Любая антенна выполняет две функции: преобразует подводимую энергию в энергию излучения электромагнитной волны (или наоборот) и создает определенную направленность этой волны, т. е. разную интенсивность излучения в разных направлениях. Все современные антенны можно разделить на два класса: проволочные и дифракционные. У проволочных антенн (дипольных, рамочных, логопериодических и т. д.) обе функции выполняются проводниками. У дифракционных антенн (зеркальных, линзовых, волноводно-рупорных, щелевых и т. д.) эти функции разделены.

Функцию излучения выполняет проволочный или щелевой элемент, так или иначе присутствующий в антенне, а направленные свойства излучению придают такие элементы антенны, как зеркало или линза, или волновод и т. д.

Какие же свойства отдельных элементов являются определяющими для всей ФАР и какими критериями следует руководствоваться при выборе элементов решетки? Во-первых, как и вне решетки, элементы должны выполнять основную функцию антенны — излучать или принимать электромагнитную энергию. С этой точки зрения отдельный излучающий элемент определяет такие основные свойства ФАР, как рабочая полоса частот и поляризация излучения. Так, в метровом и декаметровом диапазонах волн основными излучающими элементами ФАР являются различные виды вибраторов, а в сантиметровом и миллиметровом диапазонах — щелевые и рупорные (волноводные) антенны (рис. 9). Аналогично и с поляризацией — при горизонтальной поляризации электрического поля применяются горизонтальные вибраторы и щели, при вертикальной — вертикальные. При круговой поляризации используются комбинации скрещенных вибраторов, спиральные антенны, круглые волноводы. Во многом определяют отдельные элементы и широкополосность ФАР, т. е. максимально возможный диапазон



Рис. 9. Виды излучателей ФАР

(большой толщины, со встроенными нагрузками и активными элементами и т. д.). В таких антеннах с помощью различных физических и технических эффектов удается добиться того, чтобы при изменении рабочей частоты менялись размеры активно участвующего в излучении участка антенны, причем менялись таким образом, чтобы сохранялся принцип электродинамического подобия. Например, если при увеличении частоты сигнала вдвое, активный участок антенны в два раза уменьшится (т. е. размер излучающего участка в длинах волн останется неизменным), то электрические свойства антенны не изменятся.

В последние годы большое внимание уделяется конструированию активных антенн и созданию ФАР на их базе. В этих активных элементах для достижения широкополосности используют постоянно входного сопротивления, стабилизируемого с помощью транзисторного усилителя, встроенного непосредственно в излучающий элемент. Далее об этом направлении в антенной технике будет рассказано более подробно.

Наконец, немаловажную роль в параметрах ФАР играют масса и стоимость антенного излучателя. Проблема снижения массы вплотную встала перед разработчиками ФАР в настоящее время в связи с размещением РЛС на борту самолета или космического аппарата. Рядом с этой проблемой стоит и проблема снижения стоимости ФАР. Так как современные ФАР состоят из большого числа излучающих элементов (от ста до десятков тысяч), то естественно, что даже небольшое снижение

рабочих частот. Не возможно сконструировать ФАР, работающую в широком диапазоне частот, не имея широкополосных излучателей. В качестве таких излучателей в ФАР в настоящее время используют логопериодические, спиральные антенны и различного вида широкополосные вибраторы

массы и стоимости каждого элемента даст значительный эффект.

Эти две проблемы поставлены рядом не случайно. Они взаимосвязаны и, как показывает опыт, часто решаются одинаковыми путями. Одним из путей в настоящее время стала разработка антенн на микрополосковых печатных платах. Такие антенны представляют собой печатную плату с излучающим элементом в виде проводящей полоски — микрополосковой линии (рис. 10). И хотя такие антенны как излучатели ФАР имеют определенные недостатки, преимущества их при использовании в аэрокосмической технике очевидны. Это и малая масса, и хорошая сопрягаемость с современными интегральными схемами, и технологичность изготовления (позволяет применять фототравление), и, как следствие, малая стоимость, и возможность придания таким антеннам нужной формы (конформные антенны), что очень важно с точки зрения аэродинамических качеств летательного аппарата, на котором расположены такие антенны. Печатные конформные антенны уже начали применять на практике, и в качестве примера можно привести специальную антенну, предназначенную для работ по программе «Союз» — «Аполлон», которая была размещена на командном модуле корабля «Аполлон».

Пока при рассмотрении основных свойств излучающих элементов ФАР нигде не фигурировал тот факт, что эти элементы функционируют совместно, что они объединены в некоторую систему, называемую фазированной антенной решеткой. По существу, были рассмотрены лишь свойства, присущие излучателям независимо от того, являются ли они самостоятельными антеннами или входят в качестве элементов в состав ФАР. Но оказывается, что при объединении отдельных излучателей в антенные решетки возникают и специфические эффекты, и специфические требования к элементам. Диаграмма направленности (ДН) антенной решетки, как уже было сказано, зависит как от диаграммы направленности составляющих ее элементов, так и от пространственной структуры самой решетки и при определенных предположениях может быть выражена в виде произведения диаграммы элемента (если все они одинаковы) на множитель решетки. Множитель решетки имеет обычно во много раз большую направленность, чем ДН излучате-

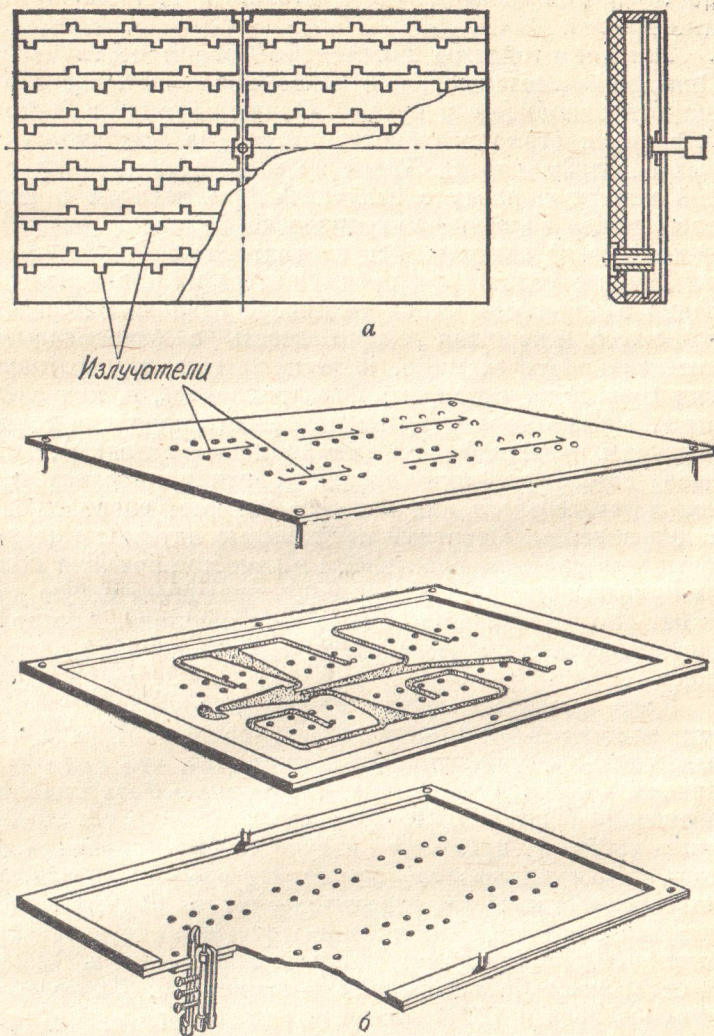


Рис. 10. Вариант печатного элемента с полосковой линией запитки и определяет ширину результирующей ДН ФАР. В свою очередь, при сканировании, когда меняется направление максимума множителя решетки, ДН элемента остается неизменной и определяет зависимость усиления ФАР от угла сканирования. Из этой простой формулы для ДН ФАР можно определить следующие требова-

ния к диаграмме элемента: во-первых, ДН элемента должна быть достаточно широкой в пределах сектора сканирования ФАР, чтобы не снижать в сильной мере усиление решетки (лучше всего, если бы она была в заданном секторе постоянной). Во-вторых, за сектором сканирования, где возможно появление паразитных максимумов решетки, диаграмма элемента должна быстро спадать (равняться нулю в идеальном случае), чтобы ослабить направленность ФАР в этих нежелательных направлениях. На практике никакой антенный элемент не может иметь такой диаграммы. В случае, когда элемент представляет собой плоский раскрыв, при изменении угла падения на него плоской волны падающая мощность изменяется как проекция площади раскрыва элемента на направление, перпендикулярное направлению прихода волны, т. е. при уменьшении угла падения волны ДН такого элемента уменьшается пропорционально косинусу дополнительного угла. Многие используемые на практике антенные элементы имеют диаграммы подобного вида и обычно их форму можно описать с помощью функции, представляющей собой косинус в какой-либо степени.

Рассмотренные выше характеристики вытекают из описания ФАР уже как единой совокупности излучателей, причем из формулы перемножения диаграмм не следует никаких новых физических эффектов.

В 50-х годах, на заре создания ФАР, разработчики излучающих элементов оказались перед совершенно новой проблемой. Излучатели в антенной решетке влияли один на другой, каждый излучатель ФАР оказывал влияние на все остальные. Часть излучаемой (или отражаемой при приеме) мощности от каждого элемента принималась всеми остальными, происходило перераспределение поля в раскрыве решетки. Все излучающие элементы ФАР оказались взаимосвязанными, и связь эта зависела как от свойств отдельных элементов, так и от их взаимного расположения, т. е. от структуры решетки. Взаимная связь приводила к изменению полного сопротивления излучателя в зависимости от угла отклонения луча, а следовательно, к нарушению условий согласования элемента и потерям мощности сигнала. В определенных направлениях, названных слепыми пятнами, ФАР вообще не излучала. Оказалась неверной формула перемножения диаграмм, так как диаграммы даже

одинаковых излучателей были различными при помещении их в решетку и зависели от места расположения в ней.

Проблемой взаимных связей занялись разработчики ФАР разных стран, но только начиная с 60-х годов появились первые работы, содержащие некоторые основы теории этого явления и практические рекомендации по его учету в разработках. Наиболее значительные успехи в области теоретического анализа элементов решетки основываются на моделировании практически больших решеток бесконечными решетками с такими же параметрами пространственной структуры. Основные характеристики элемента решетки, т. е. ДН, входное сопротивление, будучи рассчитаны для бесконечной решетки, оказываются пригодными для анализа реальной решетки конечных размеров. Так, например, по данным расчета входного сопротивления рассчитываются элементы схемы компенсации отражений, которые вводятся в фидерные линии излучателей и позволяют (правда, в узкой полосе частот) устранить влияние взаимных связей. Еще один используемый на практике способ ослабления взаимных связей состоит во введении между излучателями дополнительных экранов, уменьшающих отражение и переизлучение.

Теория бесконечных решеток объяснила также появление слепых пятен ФАР от поверхностной волны, распространяющейся вдоль раскрыта решетки, и позволила теоретически рассчитать условия появления слепых пятен, а следовательно, конструировать решетки, свободные от этого нежелательного явления. Наибольшие успехи были достигнуты в теории волноводных антенных решеток. При расчетах вибраторных ФАР в качестве основного метода анализа в настоящее время используются методы интегральных уравнений, составляемых относительно распределения тока в излучателе.

По сравнению с волноводными решетками эти методы менее разработаны и дают не столь достоверные результаты.

В первых разработках основным методом проектирования элементов ФАР был метод экспериментального подбора излучателей. В настоящее время в связи с развитием теоретических методов, особенно в части волноводных элементов, появилась возможность использовать

расчетный метод и создавать даже целые системы машинного проектирования, позволяющие по заданным требованиям к характеристикам ФАР вести проектирование автоматически, вплоть до создания рабочих чертежей элементов.

Наибольшими возможностями в этом плане обладают, как отмечалось выше, печатные микрополосковые ФАР. Для их построения можно, в принципе, создать не только систему машинного проектирования, но и такую систему, в которой после автоматического выбора конструкции излучающих элементов будет тут же производиться и автоматическое их изготовление методом фототравления.

Однако практически на нынешнем этапе такую технологическую установку создать трудно еще и потому, что теория микрополосковых ФАР в настоящее время разработана недостаточно, причем следует отметить, что микрополосковые элементы обладают сильной взаимной связью, а это существенный недостаток при их использовании в ФАР.

Говоря об элементах фазированных антенных решеток, нельзя не упомянуть об их остальных составных частях — о фазовращателях и системах возбуждения. Именно эти части определяют основные достоинства ФАР и, как оказалось, в значительной мере массу и стоимость всей решетки. В диапазоне СВЧ фазовращатели можно разделить на два основных типа — ферритовые и полупроводниковые. Они имеют различные параметры, так как действуют на разных принципах. Фазовый сдвиг в ферритовых фазовращателях связан с изменением магнитной проницаемости феррита под воздействием внешнего магнитного поля. В полупроводниковых фазовращателях, основным переключаемым элементом которых в настоящее время являются *pin*-диоды, сдвиг фазы создается из-за переключения реактивного сопротивления диода при изменении приложенного напряжения смещения и связанного с этим перераспределения СВЧ тока. Ток СВЧ протекает через цепи, содержащие диоды.

Ни один из этих двух типов фазовращателей не имеет абсолютного преимущества перед другим, и применение какого-либо типа зависит от многих факторов. Так, ферритовые фазовращатели могут работать при высоком уровне мощности, иметь достаточно малые потери,

легко могут быть согласованы с передающими трактами. В свою очередь, полупроводниковые фазовращатели имеют малую массу и габариты, большую скорость переключения фазы, простоту управляющих устройств, малую потребляемую мощность и достаточную термостабильность. В настоящее время существуют многочисленные схемы и конструкции фазовращателей и ведутся настойчивые исследования как в направлениях поиска новых схем фазовращателей, так и новых путей создания фазовращателей, работающих на иных принципах. Недавно, например, появилось описание так называемой спирафазной ФАР, в которой поворот фазы на элементах достигается путем электронного переключения вращения поля спирального излучателя отражательной антенной решетки. В спирафазной решетке ее элемент и фазовращатель образуют единое устройство. Такие элементы имеют скорость переключения как у диодных фазовращателей, но обладают меньшими потерями и значительной частотной независимостью, причем при их изготовлении можно пользоваться методом фототравления или вакуумного напыления.

Несколько слов следует сказать и о системах возбуждения ФАР. Задуманные вначале для обеспечения оптимального амплитудного распределения на раскрыве с целью получения оптимальной ДН, системы возбуждения значительно расширили свои функции. В настоящее время эти системы используют для компенсации отражений от фазовращателей при работе в широкой полосе частот, для перераспределения возбуждения от многих передатчиков, для формирования многих независимых лучей в одной ФАР. Все системы возбуждения разделяются на два общих типа: закрытое возбуждение, при котором сигналы распространяются от элементов решетки к центральной суммирующей точке по линиям передачи, и оптическое возбуждение, основанное на распространении волн в свободном или близком к нему пространстве. Каждый тип возбуждения имеет свои преимущества и выбирается в каждом конкретном случае, исходя из различных факторов. В настоящее время в разработке систем возбуждения имеются большие достижения, что связано с многочисленными оригинальными техническими схемными решениями.

В заключение отметим, что, хотя за последние годы в теоретических вопросах сделано немало, практические

задачи требуют совершенствования всех составных частей и элементов ФАР, и это направление представляет перспективное поле деятельности для исследователей.

Проблемы разработки активных антенн

Непрерывный рост требований к радиотехническим системам ведет к постановке задач о создании антенно-фидерных устройств с новыми свойствами, которые не могут быть реализованы традиционными средствами. К таким свойствам следует отнести большую широкополосность, возможность первичной обработки сигнала, быструю адаптацию к изменению внешних условий и повышенную чувствительность при уменьшенных габаритах.

Вторая серьезная проблема, стоящая перед разработчиками КВ, СВ, ДВ и СДВ антенн различного назначения и, в частности, фазированных антенных решеток, — уменьшение металлоемкости и габаритов, которые достигли в эксплуатируемых ныне устройствах, по видимому, практического предела.

Третий фактор, потребовавший разработки новых элементов, — невозможность сколь-нибудь заметного улучшения параметров радиотехнических комплексов путем модернизации существующих АФУ и аппаратуры.

С другой стороны, появился целый ряд предпосылок, способствующих созданию нового класса антенн. В первую очередь — это бурный процесс миниатюризации всех частей радиотехнических устройств и успехи твердотельной электроники и схмотехники.

Кроме того, внедрение в технику системного подхода, когда имеется возможность не только учесть все имеющиеся связи между отдельными функциональными частями комплекса, но и ввести новые, либо устранить нежелательные связи с целью получения желаемого результата приводит к идеям объединения ряда функций радиоприемных и антенных устройств.

Первые попытки создания антенн с электронными элементами были предприняты еще в 30-х годах, но впервые действующие экспериментальные образцы та-

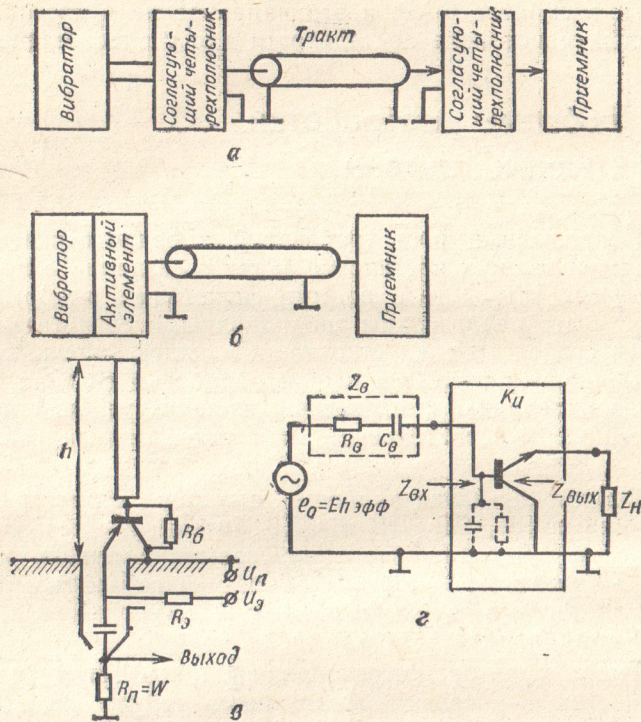


Рис. 11. Схема активной антенны

ких достаточно эффективных «интегральных» или «активных» антенн появились лишь в 1961—1966 гг., в частности в ФРГ, в Мюнхенском Высшем техническом училище высокочастотной техники, где работы велись под руководством профессора Г. Мейнке [10]. За последние годы в этой области советскими учеными проведен также значительный объем исследований [11, 12 и др.]. Полученные ими результаты позволили в известной мере сформулировать принцип работы активных антенн и рассмотреть возможные области их применения. К настоящему времени в разных странах запатентованы десятки конструкций активных антенн, резко увеличилось число публикаций по вопросам их теории и техники. Кроме того, в ряде стран ведется серийный выпуск автомобильных и телевизионных активных антенн.

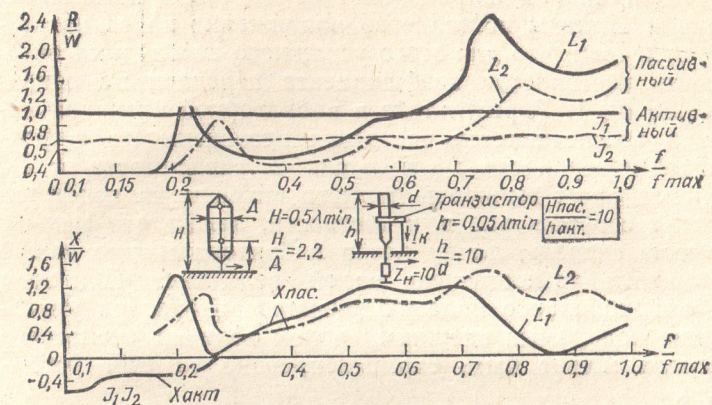


Рис. 12. Сравнительные характеристики активной и пассивной антенн

Коротко рассмотрим основные физические предпосылки создания активных антенн.

Решение задачи расширения полосы рабочих частот активной антенны удобно продемонстрировать на примере приемной вибраторной антенны (см. рис. 11). В этом случае поставленная цель достигается при некоторой модификации обычной структурной схемы построения элементарного канала приема (вибратор-фидер-приемник, рис. 11, а) посредством перенесения и подключения первого усилительного каскада-приемника широкополосного антенного усилителя (ШАУ) непосредственно на клеммы вибратора (рис. 11, б) и постановки вибратора в режим, близкий к «холостому» ходу. Другими словами, это режим возбуждения от источника тока за счет выбора высокоомного сопротивления усилителя $[Z_{вх}] \gg [Z_{в}]$ (рис. 11, г). Такой рассогласованный режим, в отличие от обычно принятого в пассивных антеннах режима комплексного согласования ($\hat{Z}_{вх} \approx \hat{Z}_{в}^*$), при длине плеча вибратора $l < 0,25$ минимальной длины волны, обеспечивает независимость ЭДС на входе усилителя от частоты, так как входная цепь вибратор-усилитель представляет в этом случае частотно независимый емкостной делитель, а вибратор, как известно, имеет постоянную действующую высоту (рис. 11, в и рис. 12).

Понимая под широкополосностью такой комбинированной антенны постоянство напряжения на ее нагрузке, отмечаем, что для этого усилителю необходимо обеспечить постоянство коэффициента передачи по напряжению (κ_u). В результате в вибраторной активной антенне обеспечивается частотная независимость эффективной поверхности $S_{эф}$ и ее слабая зависимость от Z_v , что позволяет выбирать диаметр антенны из конструктивных соображений и, в частности, делать его малым. В свою очередь, длину плеча вибратора можно также уменьшить до достаточно малой величины. При этом пропорциональное падению размеров вибратора уменьшение наводимых внешним полем величин полезного сигнала может быть скомпенсировано за счет усилителя.

Полученные и опубликованные результаты исследований позволяют оценить области техники и частотный диапазон, где применение таких активных антенн будет возможным и целесообразным. Прежде всего, такие активные антенны следует использовать в диапазоне частот от 10 кГц до 30—50 МГц, где, как известно, очень большие уровни внешних шумов дают возможность не предъявлять жестких требований по тепловым (электронным) шумам и допускают сильно рассогласованный режим на входе активных антенн.

Несомненно, введение дополнительного усилительно-го и поэтому шумящего каскада приводит к увеличению тепловых шумов, однако, если при этом шум-фактор (F) системы антенна плюс приемник не будет превышать двух, то в информационном смысле это вполне удовлетворительно. Однако закономерен вопрос о ряде других факторов, в том числе перекрестных и комбинационных помехах. Проблема состоит и в выборе корректного критерия и оценки (сравнения) выигрыша и проигрыша. И здесь оказывается, что практическое сравнение типичной приемной системы с пассивным и активным вибратором не в пользу пассивной. Например, активная двухметровая штыревая антенна превышает по чувствительности пассивную шестиметровую в полосе 10—30 кГц при использовании в обоих случаях приемника с фактор-шумом $F=10$ [10].

Сравнение со случаем пассивной антенны показывает предпочтительность активных антенн и по комбинационным и перекрестным помехам. Дело в том, что эти

помехи зависят от квадрата и куба амплитуды входных сигналов, которые обычно в несколько раз меньше (из-за укороченного плеча вибратора активной антенны), чем в случае пассивных антенн, имеющих размер порядка длины волны. Применение в активных антеннах усилителей с отрицательной обратной связью и низким коэффициентом передачи по напряжению ($\kappa_u \approx 1$) дает приемлемый уровень реальной чувствительности системы, определяемой на частотах ниже 30—15 МГц как раз комбинационными и перекрестными помехами.

И наконец, если в системе используется ШАУ с $\kappa_u \approx 20$ Дб, то замена пассивной антенны на активную с длиной плеча около 2 м может дать выигрыш в чувствительности на 10—20 Дб, включая комбинационные помехи. Отметим здесь, что во всех случаях рабочая полоса активных антенн должна быть минимально необходимой, что дополнительно снижает уровень помех.

Анализ уже опубликованных материалов позволяет утверждать о несомненной возможности и целесообразности применения вибраторных активных антенн в качестве элементов систем связи и радиоастрономии. Большое количество элементов (порядка тысячи штук), необходимых в таких системах, и малая металлоемкость и габариты активных антенн позволяют надеяться на заметный выигрыш за счет экономии металла как вибраторов, так и опорных сооружений.

Следует отметить, что рассогласованный режим на входе активной антенны приводит к малой величине отбираемой мощности из поля падающей волны и позволяет отнести ее к классу минимально рассеивающих антенн. Системы из таких антенн, как известно, обладают пониженной чувствительностью к взаимному влиянию между элементами. Это новое уникальное свойство активных антенн позволяет по-новому посмотреть на традиционные принципы построения ФАР и в ближайшем будущем открывает возможности создания так называемых «сверхнаправленных» антенн, позволяющих уменьшить габариты системы. Свойство минимального рассеивания вибраторной активной антенны делает ее практически неискажающим приемником поля и позволяет на ее основе использовать две ортогональные активные антенны, и создать систему с поляризационной селекцией сигналов (рис. 13 и 14).

Такая антенна при комбинации с управляющей сис-

темой представляет собой эффективное средство борьбы с поляризационными замираниями КВ-сигналов, позволяет реализовать первичную обработку информации и эквивалентное увеличение коэффициента усиления антенны на 10—20 Дб. Хотя принципы поляризационной селекции известны уже давно, однако они до настоящего

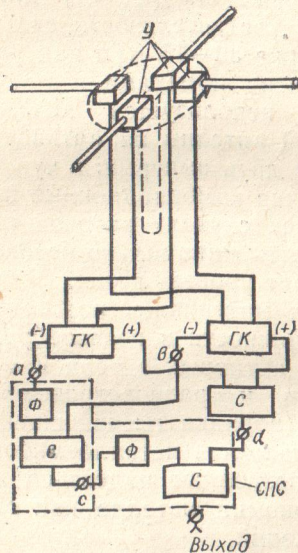


Рис. 13. Схема активной антенны с управляемой поляризацией

к увеличению числа свободных каналов.

Реальные проблемы в этом классе активных антенн состоят в обеспечении приемлемой идентичности характеристик отдельных активных антенн в меняющихся климатических условиях и достаточной надежности работы, т. е. практически разрешимые проблемы технологического характера.

Если в активной схеме сместить активный элемент (усилитель или одиночный транзистор) с клемм, включив его в тело антенны (вibratorа) на некоторой высоте при изменении конфигурации пассивной части, получается комбинация, названная рамочно-вibratorной антенной [12]. Она обладает рядом еще более интересных свойств, в сравнении с включением активного элемента

во времени в действующих системах дальней связи практически не применялись из-за отсутствия элементов с приемлемыми характеристиками.

Отметим здесь, что применение только сдвоенного поляризационного приема, т. е. суммы двух ортогональных компонент, в ряде задач энергетически эквивалентно пространственно разнесенному приему на 10—20 длин волн (при одной поляризации), что позволяет уменьшать площадь, занимаемую антенной системой.

Важным свойством системы с поляризационной селекцией сигнала (главным образом круговых компонент) является повышенная помехоустойчивость приема из-за наличия дополнительных фильтрующих свойств, приводящих

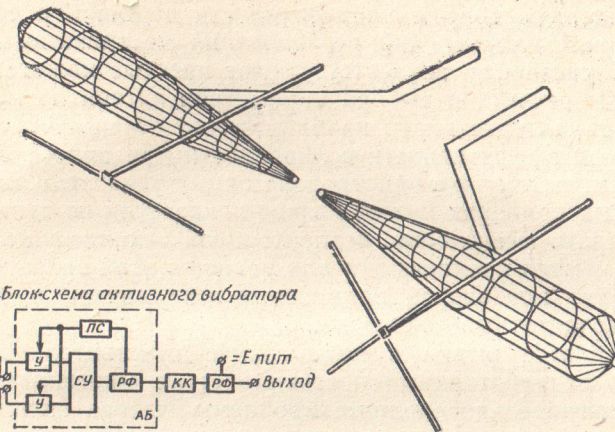


Рис. 14. Элемент фазированной решетки из активных vibratorов
У — усилитель, РФ — разделительный фильтр, ПС — параметрический стабилизатор напряжения постоянного тока, КК — коаксиальный кабель, П — пассивная часть активного vibratorа, АБ — активный блок, СУ — согласующее устройство

на клеммах, в частности, возможностью электронного управления распределением тока на проводниках антенны. Вследствие этого появляется возможность получения в широкой полосе частот однонаправленной диаграммы направленности, близкой к кардиоидной в обеих плоскостях, с управляемым положением нуля. Подбор точки включения, конфигурации проводников, типа и режима транзистора позволяет реализовать режим согласования по шумам и с питающим фидерным трактом в полосе частот от нескольких октав до декады. Открывается принципиальная возможность решения проблемы повышения чувствительности приемной системы в диапазоне частот выше 50 мГц, где внешние шумы низки, а потери в пассивных цепях недопустимо велики. Здесь следует еще раз отметить, что основной выигрыш в широкополосности согласования по шумам может быть достигнут за счет устранения дополнительных каскадов согласования и рассогласованного участка фидера при объединении антенны с усилителем. Проблемы миниатюризации в таких активных антеннах пока отодвигаются на второй план, так как они должны иметь размер, близкий к резонансному.

В этом классе активных антенн с управляемым распределением тока и направленности перечень и объем реальных направлений исследований несравнимо больше. В частности, пока отсутствуют простые инженерные методы расчета и выбора параметров антенн по заданным характеристикам, проблематично обеспечение приемлемой эффективности и линейности при полосе более октавы, к тому же однотранзисторные усилители на известных приборах имеют низкие показатели по этим параметрам. Безусловно, в электронной технике уже сейчас имеются предпосылки для решения этой задачи, что позволит продвинуть применение этих антенн в более высокочастотные диапазоны.

В классе антенн с повышенной чувствительностью перед разработчиками постоянно стоят многоплановые и исключительно сложные проблемы выбора оптимальных конфигураций проводников антенны, типа и режима транзистора, которые в большинстве случаев решаются эвристически, на уровне изобретений.

В этой связи исключительную важность для скорейшего широкого внедрения активных антенн данного вида приобретает разработка методов синтеза различного вида антенн (вibrаторы, щели, рамки и др.) по заданной области входного сопротивления и создание маломощных транзисторов с различным набором параметров для разных участков частот от 0,1 до $2 \div 3$ ГГц. Тем не менее, уже в настоящее время, базируясь на опубликованные результаты, можно создать маломощные антенные системы из пассивных антенн. Проблема с нелинейными эффектами в этом классе излучателей практически всегда решается, так как такие антенны имеют резонансный характер и мешающие сигналы могут быть отфильтрованы.

В противовес приемным активным антеннам, основные проблемы, связанные с широкополосностью характеристик передающих антенн с размещением транзисторов на клеммах, как это следует из опубликованных исследований, идентичны проблемам в пассивных антеннах. И здесь надеяться кардинально разрешить проблему ограничений на широкополосность согласования, вероятно, нет оснований. В то же время применение таких передающих антенн, отличающихся устранением промежуточного рассогласованного фидера в диапазоне УКВ и ДЦВ, позволяет существенно улучшить

КПД системы и заметно снизить мощность передатчика. Это важно, в частности, для радиосистем, устанавливаемых на летательных и космических аппаратах. Кроме того, в диапазоне СВЧ можно, по-видимому, получить увеличение широкополосности в пределах ограничений при заданной (постоянной) излучаемой мощности по сравнению со случаем пассивных согласующих устройств.

Существенно большая широкополосность передающих активных антенн может быть реализована при встраивании генератора (усилителя) в тело вibrатора (по аналогии с приемными антеннами с управляемым распределением тока). В этом случае понижение резонансной частоты антенны позволяет уменьшить ее габариты (длину) при сохранении высокого КПД и значительной широкополосности. Одним из важных обстоятельств при этом может оказаться повышенный уровень излучаемых гармоник вследствие нелинейности транзистора (усилителя), что, в свою очередь, ограничит предельную широкополосность. Однако возможно преодоление и этой проблемы, например, созданием набора относительно узкополосных (с перекрытием от нескольких десятков процентов до октавы) антенн со встроенными полосовыми фильтрами или специальных высоколинейных усилителей.

Космические антенны

Антенные устройства для космических систем по своим принципиальным схемам в основном мало отличаются от наземных, однако их конструктивное исполнение в силу специфики условий эксплуатации (невесомость, глубокий вакуум, повышенная радиация, жесткие требования по массе антенны, чрезвычайно важные при транспортировке на околоземные орбиты) имеет ряд особенностей.

На всех искусственных космических объектах имеются те или иные антенны, иногда их несколько видов. Чаще всего для связи применяют различные вibrаторы или штыри, раскладные зеркальные конструкции, в последнее время начали внедрять многоэлементные конструкции (рис. 15).

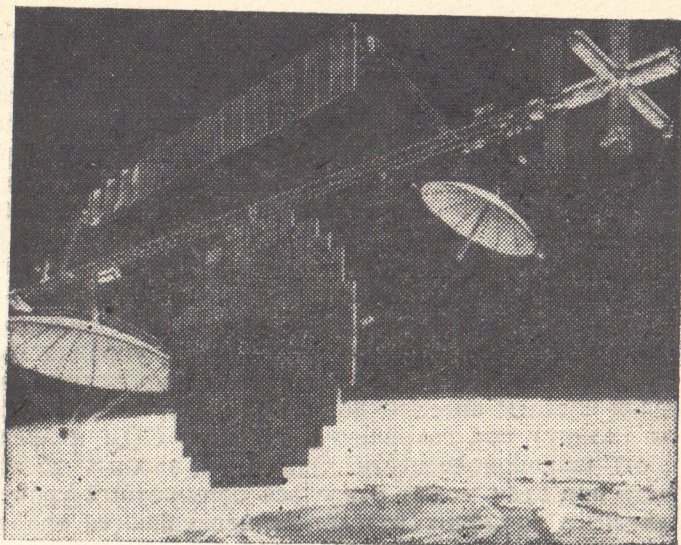


Рис. 15. Многоцелевая космическая станция с различными видами антенн (один из проектов США)

Для выполнения ряда задач, таких, например, как радиометрический контроль за загрязнением водных поверхностей, воздушной среды, геодезических и метеорологических наблюдений, радиоастрономических исследований, необходимы АФУ с геометрическими площадями до 400—1000 м² и более. Подобные антенны в большинстве случаев целесообразно выполнять в виде зеркальных систем, подобных, например, изображенным на рис. 16 и 17. К настоящему времени за рубежом и в СССР проработаны многие варианты раскрывающихся и собираемых из готовых панелей конструкций. Большинство из этих вариантов не свободны от недостатков, но подтверждает реализуемость в ближайшие годы проектов единичных АФУ с диаметром до 30 м [13—15].

В зависимости от используемого диапазона зеркальные АФУ должны иметь различную сохраняющуюся во времени точность отражающих поверхностей.

В случае необходимости несколько зеркальных АФУ можно собирать в систему, причем даже очень больших размеров (рис. 16, б), необходимых, например, для передачи энергии из космоса на Землю, что является весь-

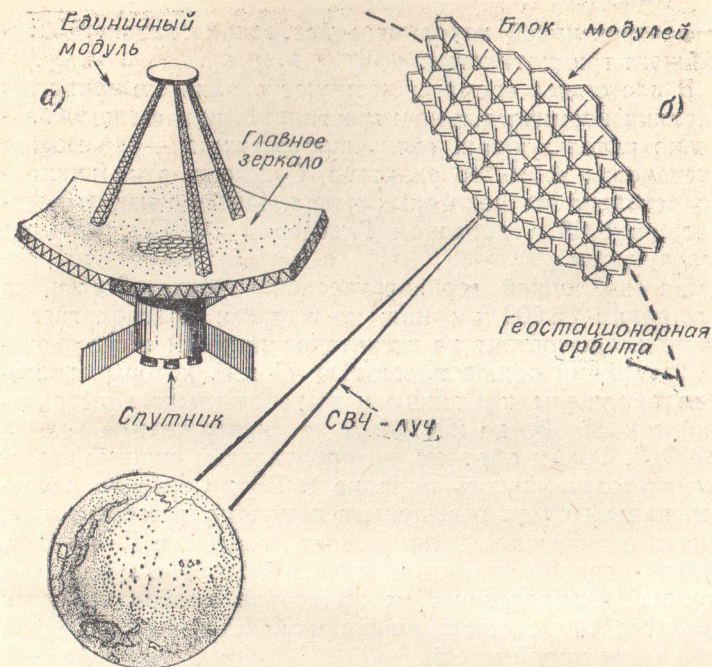


Рис. 16. Зеркальная антенна размером 30 м и решетки из зеркальных антенн

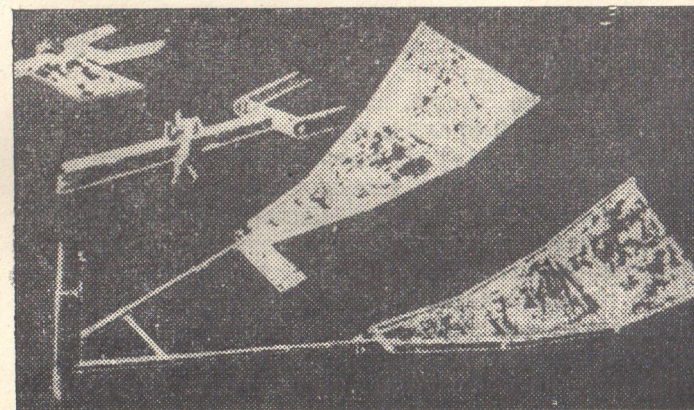


Рис. 17. Один из возможных вариантов сборки большой зеркальной антенны в космическом пространстве (проект США)

ма перспективной народнохозяйственной задачей ближайшего тридцатилетия.

В настоящее время существуют различные варианты создания космических электростанций, причем не обязательно использующих солнечную энергию — возможна и установка атомного реактора. Сущность этих вариантов основана на некоторых идеях, выдвинутых, в частности, в 1968 г. доктором Глейзером (США). Суть их в следующем.

На синхронной геоцентрической орбите Земли, на расстоянии 35 800 км над экватором, располагается спутник. Он состоит из гигантских панелей с солнечными батареями общей площадью 45 км², которые постоянно обращены к Солнцу и вырабатывают электрический ток силой до 200 000 А и напряжением около 40 000 В. Таким образом, на орбитальной системе вырабатывается мощность порядка 8 ГВт. Согласно расчетам, панели будут освещены в году 99% всего времени, причем освещенность превышает земную в 6—15 раз. Нулевая гравитация, отсутствие атмосферных ветров и других метеорологических факторов позволяют вести строительство с использованием конструкций большой площади и малой массы.

Электрическая мощность передается от батарей на блочную антенну — генератор, имеющую 1000 и более метров в диаметре. Могут быть применены, например, амплитронные генераторы с использованием в их конструкции окружающего вакуума, каждый из которых снабжен радиаторами для отвода избыточного тепла.

Передающая антенна формирует СВЧ-луч для передачи энергии на Землю, который сфокусирован на приемную антенну-выпрямитель, имеющую диаметр порядка 5—10 км (рис. 18). В американском проекте она содержит огромное число полуволновых диполей, присоединенных к диодам Шоттки. Выпрямленный ток поступает в наземную энергосистему, обеспечивая конечную мощность около 5 ГВт. Поскольку спутник, размещенный на геостационарной орбите, является неподвижным относительно соответствующих точек на Земле, то СВЧ-луч может быть направлен в приемные антенные устройства, расположенные на близком расстоянии от основных потребителей энергии, тем самым значительно сокращая длину линий передачи. Отношение массы к мощности для системы преобразования солнечной

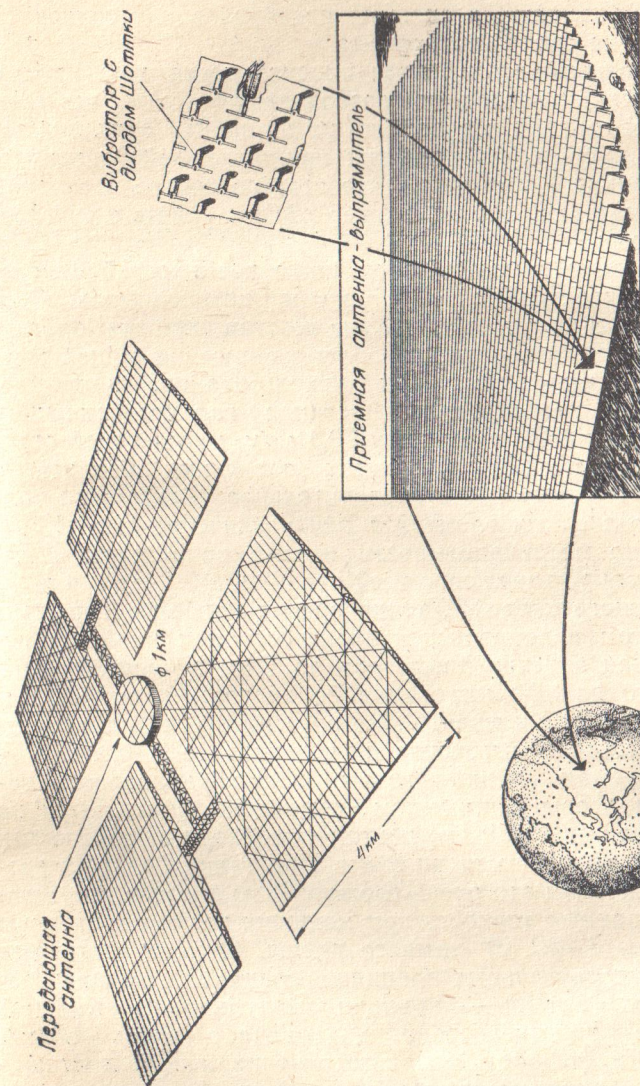


Рис. 18. Схематическое изображение космической солнечной электростанции

энергии в электрическую составляет 3,6 кг/кВт [16], т. е. относительно мало по сравнению с аналогичным показателем для наземных систем, и характеризует преимущества размещения системы преобразования солнечной энергии на синхронной орбите.

На первый взгляд идея проекта достаточно проста. Современная технология позволяет изготовить все компоненты станции и доставить их на орбиту Земли, однако стоимость электроэнергии при нынешней транспортной технике будет такой, что этот способ ее получения в ближайшее время не сможет конкурировать с другими способами.

Основные затраты на создание космической солнечной электростанции обусловлены необходимостью ее доставки в космос и далее, не геостационарную орбиту, и поэтому очень важна проблема снижения общей массы всего устройства. При использовании, например, солнечных элементов на арсениде галлия, имеющих КПД около 18% и толщину 50,3 мкм, масса такой станции составит 11 500 т, а самих солнечных батарей — 9600 т. Поэтому даже незначительное уменьшение толщины солнечных элементов или увеличение их КПД, снижение материалоемкости антенн приведет к существенному удешевлению всей станции.

С конструкторской точки зрения наиболее сложным элементом в космической электростанции является передающая антенна диаметром до 1 км и более. Дело в том, что для формирования ее диаграммы направленности, т. е. для концентрации энергии в узком луче, требуется точность изготовления поверхности $\lambda/16$; где λ — используемая длина волны. Окно радиопрозрачности атмосферы в приемном диапазоне приходится на длину волны $\lambda \approx 10$ см, поэтому необходимо обеспечить точность поверхности до 5 мм. При таких больших размерах антенны это очень сложно. В то же время обеспечить заданную точность при меньших размерах антенны (скажем, 8—10 м) намного проще. Отсюда вытекает один из краеугольных принципов создания больших космических антенн — принцип модульности. Каждый модуль работоспособен и передает часть общей мощности (точность его изготовления вполне достижима в необходимых пределах), а общее фазирование потока энергии обеспечивается системой автоматической межмодульной подстройки того или иного типа.

Один из важных вопросов, который во многом определит пути создания больших антенн в космосе, — это выбор материалов конструкции. Основные требования — малый тепловой коэффициент линейного расширения, малая плотность и достаточная жесткость и прочность. Подобными свойствами обладают композиционные материалы на основе бериллия, углепласты, боропласты и некоторые другие.

Отметим, что от необходимости высокоточного изготовления поверхностей зеркальных антенн можно было бы и отказаться, если бы удалось решить задачу временного синтеза диаграммы направленности облучателя (скорее всего, системы облучателей) по известному закону изменения профиля зеркала.

Можно с полной определенностью сказать, что в будущем в качестве «первокирпичиков» антенных модулей будут использоваться самые разнообразные типы конструкций: непрерывно вращающиеся после раскрытия, монтируемые космонавтами или манипуляторами, надувные, автоматически изготавливаемые ферменные конструкции и, наконец, формируемые на месте, например с помощью надувных форм и вакуумного напыления металлов.

Согласно прогнозам многих специалистов, в 90-е годы на стационарной орбите будут размещены платформы очень больших размеров, которые возьмут на себя функции множества малых ИСЗ. На такой платформе могут быть установлены самые разнообразные антенны, решающие задачи межконтинентальной, региональной и внутрисударственной связи, обслуживания морских судов, самолетов и наземных подвижных объектов, представления навигационной и метеорологической информации и многие другие. Сами платформы могут быть, в свою очередь, связаны информационными каналами, что еще больше расширит их возможности. Основное достоинство таких комплексов в том, что система питания, система ориентации и стабилизации, командно-телеметрическая, коррекции параметров орбиты обслуживают одновременно все антенно-радиотехнические системы платформы. Кроме того, значительно снижается сложность наземной аппаратуры, устраняются взаимные помехи, вызываемые большим скоплением ИСЗ на стационарной орбите, появляется возможность одновременного решения комплекса задач, достигается

существенная экономия за счет использования общего вспомогательного оборудования; на платформе, наконец, проще монтировать крупногабаритные антенные системы.

Рассмотрение возможности построения больших орбитальных платформ становится реальным благодаря разработкам многоцветных транспортных космических кораблей (МТКК) и космических буксиров для перевода полезной нагрузки с низких орбит на стационарные.

В ходе эксплуатации большие орбитальные платформы можно расширять, применяя наращивание фазированных антенных решеток [16]. При этом открываются новые возможности для радиоастрономических исследований. Наблюдения за космическими источниками радиополучения характеризуются двумя основными параметрами — чувствительностью антенн и их разрешающей способностью. Учитывая, что в настоящее время уже проводятся измерения с помощью радиоинтерферометров с базами, определяемыми диаметром Земли, дальнейшее увеличение разрешающей способности возможно только при вынесении хотя бы одной антенны интерферометра в космическое пространство. Чувствительность антенн в основном определяется их площадью, но дальнейшее увеличение ее на Земле имеет свои сложности из-за влияния неоднородностей атмосферы. Если в космическом проекте принять, что база радиоинтерферометра составит 10 астрономических единиц, а диаметр каждого космического радиотелескопа 1—10 км при λ от 1 мм до 1 м, то можно реализовать чувствительность до $3 \cdot 10^{-37}$ Вт/м² Гц и угловое разрешение до $1,5 \cdot 10^{-10}$ угловых секунд. Это в миллион раз превышает современный уровень радиоастрономии и позволит успешно решать задачи поиска внеземных цивилизаций, обнаружение и исследование новых звезд и планет, а также получения объемных изображений астрономических источников. Можно будет исследовать объекты на расстояниях, сопоставимых с радиусом кривизны нашей Вселенной.

Но такой радиоинтерферометр, конечно, дело далекого будущего. Более реальным представляется создание радиоастрономической космической системы апертурного синтеза (РАКСАС), проект которой рассматривается Советским Союзом и США в рамках международной программы «Салют-Шаттл», где предлагается

создать антенну диаметром 30 м и массой вместе с платформой точного наведения и приемной аппаратурой около 6—7 т.

На 1978 г. одним из последних достижений в создании больших космических антенн можно считать зеркало американского спутника ATS-6, имеющего диаметр 9,44 м и массу 83,9 кг [14].

Как уже было сказано, при создании космических антенн или комплексов антенн нельзя отдать предпочтение одному какому-либо типу антенной системы. Так, для тех же целей передачи энергии на Землю или на космические объекты, для слежения за мобильными объектами на Земле, в воздухе и в космосе предпочтение отдается антенным решеткам с электрическим изменением положения луча в пространстве. При создании таких систем важнейшими требованиями являются: вид стабилизации космического объекта, тип орбиты (с учетом радиационных поясов Земли), зона действия антенны, допустимые объем и масса, потребляемая мощность, надежность, коэффициент усиления. Стоит отметить связь между точностью ориентации спутника (или платформы) и точностью в управлении лучом. Очевидно, что бессмысленно при плохой системе ориентации и стабилизации требовать высокой точности в управлении положением луча.

Если речь идет о системах связи, то такие факторы, как уровень боковых лепестков антенны, безынерционность луча, ширина угла сканирования в двух плоскостях и точность слежения играют второстепенную роль. В то же время они имеют особое значение для целей обзора и измерений с Земли.

Технология изготовления антенных решеток быстро развивается. Учитывая специфику работы антенн в условиях космоса, можно указать на большую перспективность применения интегральных схем и микропроцессоров. Последние позволяют заменить обычные схемы управления системами автоматического контроля исправности антенны, управления лучом и обработки сигналов. Внедрение интегральных схем и микропроцессоров позволит перейти от структуры антенной системы с единой управляющей ЭВМ к более экономичной структуре.

Безусловно, любые новые системы для космоса требуют длительных отработок и испытаний конструкций на Земле.

Несколько слов о материалах и технологии («несколько» из-за недостатка места). В антенных конструкциях применяются практически все освоенные в машиностроении и радиотехнике материалы. Для больших силовых каркасных конструкций используются сталь [17], алюминиевые сплавы, медь и медесодержащие сплавы, различные токопроводящие и защитные покрытия, пластмассы многих видов, включая пенопласты, стеклопластики, керамики. В последние годы широко изучаются возможности так называемых композиционных материалов [20]. Весьма перспективными при этом представляются материалы на основе углеродных волокон — углепласты. Их главное достоинство в малой плотности (в 1,5—2 раза меньше алюминия). Коэффициент их линейного расширения может быть близким к нулю в практически достаточном температурном диапазоне, что принципиально важно для больших космических антенных конструкций ввиду их постоянно меняющегося и неравномерного солнечного нагрева.

Высокое отношение прочности к плотности у углеродных волокон позволяет создавать из них на основе прогрессивных технологических методов формования достаточно жесткие конструктивные элементы — трубчатые, фигурные, листовые и их комбинации. При этом необходимо учитывать, что в отличие от пластичности, однородности и практической изотропности большинства металлических сплавов, композиты характеризуются хрупкостью, неоднородностью и анизотропией. Неоднородная природа композиционных материалов влияет на их способность воспринимать напряжения, совмещаться по деформациям с другими функциональными элементами конструкций. Анизотропия параметров композитов, механические и физические свойства которых зависят от взаимных направлений приложения нагрузок и армирования, создает сложности при проектировании как самого материала, так и механических узлов и деталей. В то же время имеются определенные возможности управления физико-конструкционными свойствами деталей, что создает для конструкторов и технологов широкое поле для исследований в целях оптимизации АФУ по весовым и жесткостным параметрам. Например, для создания разворачивающихся в космосе устройств можно использовать саморасширяющиеся конструкции из волоконных компо-

зиций, предварительно пропитанных связующим составом. Компактно уложенные в транспортном корабле конструкции после разворачивания в условиях космоса (вакуум, полный спектр света, радиация и т. п.) твердеют.

В антенной технике, основанной на возбуждении на электропроводящих поверхностях токов требуемых амплитуд и фаз, проводимость материалов играет существенную роль. Поэтому в волноводно-фидерных системах применяют медь, серебро, в отражающих поверхностях — алюминий, медь, золото, но последние два материала из-за высокой стоимости и дефицитности применяются реже. Проблема обеспечения электропроводности при использовании в качестве силовых конструкций композиционных и диэлектрических материалов в настоящее время исследуется, но еще далека от решения.

При создании линз и антенных укрытий стоит противоположная проблема — повышение радиопрозрачности, что в значительной мере обеспечивается снижением потерь в материалах. Современная технология химической промышленности позволяет получать исходные продукты большой чистоты. Если при переработке этих продуктов (вспениванием, прессованием, выклеиванием и т. п.) не вносятся примеси, повышающие потери, можно получать весьма качественные узлы и детали.

Разнообразие требуемых характеристик диэлектрических материалов с наперед задаваемыми свойствами привело к изучению и созданию новых материалов на основе титаната бария, сегнетоэлектриков, кварца (включая кварцевые волокна и ткани).

Развитие техники фазированных антенных решеток стимулировало получение новых типов полупроводниковых приборов и устройств, а также фазосдвигающих элементов на основе разнообразных ферритов, свойства которых в значительной мере зависят от совершенствования технологических процессов на всех этапах их изготовления — от исходного продукта до окончательных операций установки деталей и узлов в функциональное устройство.

Многие проблемы антенностроения смыкаются с проблемами, решаемыми в авиационной, космической технике, химии и т. д. Антенная техника стимулирует исследования в машиностроении и радиотехнике, а достижения в них позволяют находить новые пути при разработке антенных конструкций.

Литература

1. Тамм И. Е. Основы теории электричества. М., ГИТТЛ, 1956.
2. Фейнман Р. и др. Фейнмановские лекции по физике. М., «Мир», 1966.
3. Авраменко Р. Ф. и др. Электропунктура и проблемы информационно-энергетической регуляции деятельности человека. М., 1976.
4. Вендик О. Г. Антенны с немеханическим качанием луча. М., «Советское радио», 1965.
5. Сканирующие антенные системы СВЧ. Перевод с английского под редакцией Г. Т. Маркоса и А. Ф. Чаплина. М., «Советское радио», 1969.
6. Амитей Н., Галиндо В., Ву Ч. Теория и анализ фазированных антенных решеток. М., «Мир», 1974.
7. Зелкин Е. Г., Петрова Р. Г. Линзовые антенны. М., «Советское радио», 1974.
8. Линза-обтекатель для ФАР — «Радиоэлектроника за рубежом», № 1 (791), 1976. [«Microwaves», 1975, VIII, N 7].
9. Сергеев В. Н. Фокусирующие линзы из неоднородного диэлектрика. — «Радиотехника и электроника», 1975, т. XX, № 11.
10. Мейнке Н. Н. и др. Исследование антенн. Труды института ВЧ-техники. Мюнхен, декабрь 1970.
11. Буйвол-Кот Ю. И., Цыбаев Б. Г., Чупров М. Е., Романов Б. С., Сельский В. Л. Малогабаритная симметричная антенна с активным элементом. Авторское свидетельство № 352597, 1970.
12. Воскобойник Б. И., Кульцеп В. П., Махина О. М., Помченко В. В. Активная приемная антенна. — «Вопросы радиоэлектроники», серия «Техника радиосвязи», 1972, № 7, с. 106—111.
13. Lindenmeier Heinz. Die transistorierte Empfangsantenne mit kapazitiv hochohmigem Verstärker als optimale Lösung für den Empfang niedriger Frequenzen. — NTZ, 1974, N 11. S. 411—418.
14. Бубнов Г. Г., Трошко О. Р. Направленная антенна с круговой поляризацией. Авторское свидетельство по заявке № 2359479/09 от 6.06.76 г.
15. Мейнке Н. Н. и Линденмейер Н. Активная вибраторная антенна. Патент ФРГ № 1541482. Заявлено 29 июля 1966 г., опубликовано 30 июля 1970 г.
16. Перспективы развития космической техники на 1980—2000 годы. — «Astronautics and Aeronautics», VII—VIII, 1976.
17. Антенна ИСЗ ATS—F. — «Microwaves», 1971, N 2, 10, 14.
18. Сборка больших орбитальных конструкций. — «Astronautics and Aeronautics», V, 1976.
19. Буякас В. И. и др. Неограниченно наращиваемая антенная конструкция космического радиотелескопа. Тезисы доклада на XXVIII конгрессе МАФ, Прага, 1977.
20. Савицкий Г. А. Основы проектирования антенных конструкций. М., «Связь», 1973.
21. Композиционные материалы в конструкции летательных аппаратов. Перевод с английского под редакцией А. Л. Абибова. М., Машиностроение, 1975.