

Теория и техника многозеркальных антенн

Шишлов А.В.

Изложены основные результаты, достигнутые в области теории и техники многозеркальных антенн, становление и развитие которой связано с именем Л.Д. Бахраха. Представлены ключевые теоретические достижения и наиболее значимые практические разработки по осесимметричным и неосесимметричным многозеркальным антеннам. Наряду с однолучевыми антеннами, рассмотрены многолучевые и сканирующие антенны.

Введение. В 1953 году в сборнике «Труды НИИ-17» (ныне ОАО «Концерн радиостроения «Вега») была опубликована статья Л.Д. Бахраха, посвященная многозеркальным антеннам и их использованию в самолетных радиолокаторах [1]. Это была первая публикация, в которой обсуждается широкий круг основополагающих вопросов, относящихся к проектированию многозеркальных антенн, рассматриваются области применения многозеркальных антенн и даны примеры опытных разработок. Сборник трудов был закрытым, поэтому со статьёй мог ознакомиться лишь ограниченный круг специалистов СССР, имеющих соответствующий допуск. Следует отметить, что до середины 50-х годов исследования по многозеркальным антеннам были закрытыми как в СССР, так и в США, поскольку велись в интересах создания радиолокаторов военного назначения и были отнесены к новым научно-техническим направлениям, позволяющим существенно повысить тактико-технические характеристики радиолокаторов. Впоследствии статья [1] была рассекречена, а ее результаты были развиты и представлены в работах Л.Д. Бахраха [2, 3].

В рассматриваемой работе [1] изложены принципы построения многозеркальных антенн СВЧ и дана общая характеристика методов их расчета. В частности приведены соотношения для определения геометрии поверхностей большого и малого зеркал в осесимметричных системах Кассегрена и Грегори (рис.1). Представлены формулы расчета диаграмм направленности и коэффициента усиления таких систем в приближении Кирхгофа с учетом затенения большого зеркала малым. Описаны результаты экспериментальной проверки осесимметричной антенны Грегори трехсантиметрового диапазона с рефлектором диаметром 900 мм и контррефлектором - 170 мм.

В статье предложено использовать двухзеркальные антенны для прицельных радиолокаторов с коническим сканированием луча. Сканирование обеспечивается не за

счет вращения облучателя, а благодаря прецессии малого зеркала. Облучатель и питающий его тракт остаются неподвижными, что избавляет от проблем, связанных с созданием вращающихся сочленений. Впоследствии это техническое решение широко использовалось во многих сканирующих системах. В [1] приведены соотношения для определения поверхностей большого и малого зеркал, а также результаты расчетов ДН сканирующей двухзеркальной антенны трехсантиметрового диапазона с диаметрами большого и малого зеркал 800 мм и 180 мм соответственно. Луч шириной 2.7° движется по конусу с углом при вершине 0.8° , обеспечивая точность пеленгации в несколько угловых минут.

В работе рассмотрены также и вопросы проектирования двухзеркальных антенн для обзорных радиолокаторов. Сканирование луча по азимуту осуществляется путем вращения антенны вокруг вертикальной оси, обзор по углу места выполняется за счет угломестного сканирования узкого луча или формирования веерного (широкого по углу места) луча. Это первая из публикаций, где для решения данной задачи предложена схема двухзеркальной несимметричной (офсетной) антенны типа Грегори (рис. 2). Офсетная схема позволяет избежать затенения апертуры облучателем и малым зеркалом. За счет качания малого или большого зеркал относительно горизонтальных осей обеспечивается сканирование луча по углу места. Применительно к данной схеме антенны с цилиндрическими зеркалами поставлена и решена задача синтеза специальной веерной диаграммы направленности (в частности, косекансной диаграммы) в угломестной плоскости путем расфокусировки геометрооптических лучей в апертуре. При этом ширина веерного луча в поперечной плоскости определяется размером рефлектора, а в плоскости веера она в несколько раз больше за счет расфокусировки поля в апертуре. При решении задачи считаются заданными геометрия большого зеркала, амплитудная диаграмма направленности облучателя и амплитудная диаграмма антенны в плоскости веера. Геометрия малого зеркала определяется с помощью законов геометрической оптики, сформулированных в виде системы уравнений: одно из них описывает баланс угловых распределений энергии поля облучателя и поля антенны, второе - закон зеркального отражения на поверхностях зеркал. В такой же постановке сформулирована и, с использованием метода преобразования волновых фронтов, решена задача синтеза формы поверхности малого зеркала для двухзеркальной антенны с зеркалами двойной кривизны.

Весьма интересны инженерные решения, предложенные в работе по применению многозеркальных антенн для комбинированных радиолокаторов, выполняющих как функции обзора, так и прицеливания. На рис. 3 показана двухзеркальная

комбинированная система, выполняющая такие функции. Она состоит из главного зеркала 1, облучателя 4 и блока вспомогательных сменных зеркал 2, 3. В режиме обзора используется вспомогательное зеркало 2, обеспечивающее формирование заданной диаграммы. Для перехода в режим прицеливания блок зеркал поворачивается на 180° вокруг поперечной оси, и начинает работать вспомогательное зеркало 3. За счет его прецессии осуществляется коническое сканирование луча. В статье упоминается о разработке радиолокатора с комбинированной системой, состоящей из двух описанных антенн, большие зеркала которых развернуты на 180° относительно друг друга. Такая многозеркальная антенна имеет четыре поочередно работающих луча.

В [1] предложена и изучена еще одна система – двухлучевая многозеркальная антенна. Она состоит из главного несимметричного сферического зеркала, двух облучателей и двух вспомогательных зеркал. Вспомогательные зеркала с облучателями разнесены по окружности половинного радиуса сферы, за счет чего лучи разнесены по углу в азимутальной плоскости. Сферическая форма поверхности главного зеркала, с одной стороны, относительно проста в изготовлении, с другой – позволяет разносить лучи на достаточно большой угол. В работе предложен графический способ построения профиля вспомогательного зеркала, преобразующего поле сферической волны облучателя в поле, формирующее участок плоской волны после отражения от поверхности главного зеркала (рис.4).

Наконец, в работе изучены диапазонные свойства двухзеркальных антенн. Указано, что основными факторами, влияющими на частотные свойства, являются диапазонность облучателя, переотражения между облучателем и малым зеркалом и переотражения между малым и большим зеркалами. Для уменьшения влияния отраженной волны на облучатель предложено устанавливать на вспомогательном зеркале компенсирующую пластинку, выдвинутую относительно его поверхности на четверть длины волны. Аналогичную отражающую или поглощающую пластинку предложено устанавливать на поверхности главного зеркала на участке, формирующем обратное поле в направлении вспомогательного зеркала. Приведены результаты экспериментов, демонстрирующие эффективное улучшение согласования антенны по входу за счет применения предложенных технических решений.

В работе сформулированы задачи дальнейшего развития теории и техники многозеркальных антенн: совершенствование методов анализа и синтеза, поиск технических решений, направленных на расширение диапазонности антенн и на обеспечение быстрого качания главного лепестка диаграммы направленности.

Таким образом, уже в первой статье Л.Д. Бахраха всесторонне и глубоко были рассмотрены основные вопросы теории и техники многозеркальных антенн. С этого времени началось широкое использование многозеркальных антенн в самых разных областях науки и техники, а также активное развитие методов их расчета.

Разработки многозеркальных антенн в СССР в 50-х – начале 60-х годов. Об экспериментальных образцах многозеркальных антенн для самолетных радиолокаторов, разрабатываемых в НИИ-17, рассказано непосредственно в статье Бахраха [1]. Другой важной областью применения многозеркальных антенн стали системы противоракетной обороны, создание которых было начато в СССР с 1955 года [4]. В 1955-56 годах коллективом специалистов КБ-1 под руководством Г.В. Кисунько была разработана уникальная по тем временам полноповоротная двухзеркальная антенна Кассегрена десятисантиметрового диапазона с диаметром рефлектора 15 м, установленная под укрытием (рис. 5). Она работала в составе экспериментального радиолокатора обнаружения и сопровождения головных частей ракет. Применение двухзеркальной схемы позволило использовать достаточно короткий многоканальный приемопередающий тракт с малыми потерями, связывающий облучатель с приемником и передатчиком, расположенными у основания антенны. Облучатель излучал сигналы мощностью 2 МВт и формировал разностные диаграммы на прием для сопровождения и точного измерения координат целей. В 1957 году этот радиолокатор был установлен на Сары-Шаганском полигоне, и во время пусков баллистических ракет с полигона Капустин Яр с его помощью была подтверждена возможность обнаружения и сопровождения головных частей баллистических ракет. На основе измерений были впервые определены эффективные поверхности рассеивания головных частей ракет.

Другой радиолокатор, созданный для проводок баллистических ракет и их головных частей, был установлен недалеко от города Аральска [5]. Он был разработан в 1955-56 году в Радиотехническом институте АН ССР под руководством А.Л. Минца. В нем также применена двухзеркальная антенна Кассегрена с рефлектором диаметром 12 м (рис.6).

В 1959 году на Сары-Шаганском полигоне были смонтированы три радиолокатора точного наведения экспериментальной системы ПРО «А», созданной под руководством Г.В. Кисунько, в которых использованы двухзеркальные антенны, разработанные в КБ-1. В 1961 году с помощью системы «А» впервые в мире была поражена головная часть баллистической ракеты.

Зеркальные антенны с поляризационно-селективными зеркалами были разработаны для радиолокаторов первой системы противоракетной обороны Москвы А-35 [5], созданной под руководством Г.В. Кисунько. В стрельбовом радиолокаторе этой системы применена трехзеркальная антенна с главным зеркалом диаметром 18 метров, установленном на полноповоротном опорном устройстве, и двумя управляемыми вспомогательными зеркалами, установленными друг за другом. Антенна содержала приемо-передающий облучатель (с моноимпульсными диаграммами на прием), работающий на ортогональных линейных поляризациях. Вспомогательные зеркала имели диаметры 2.3 и 2.9 метра, причем ближнее к облучателям зеркало выполнено пластинчатым – прозрачным для волн одной поляризации и отражающим для волн ортогональной поляризации. Управление угловым положением вспомогательных зеркал обеспечивало независимое сканирование двух лучей антенны в секторе около 3° относительно оси главного зеркала. Такой двухлучевой радиолокатор мог работать по парным целям, состоявшим из головной части и последней ступени ракеты носителя. Разработка антенн была выполнена КБ-1 в 1963-64 г.г., а в 1966 году опытный образец антенны был успешно испытан на Сары-Шаганском полигоне. Впоследствии эти антенны были установлены на подмосковных объектах системы А-35 и стояли на боевом дежурстве.

Одна из первых двухзеркальных антенн для радиоастрономии была разработана в Главной астрономической обсерватории АН СССР в Пулковско под руководством С.Э. Хайкина [6] в 1955 -56 гг. Эта антенна поляриметра с главным зеркалом диаметром 3 м и малым зеркалом, преобразующим поле облучателя, обеспечивала низкий уровень кросс-поляризации поляриметра. Впоследствии двухзеркальные схемы стали использоваться во многих радиотелескопах.

Весьма эффективное решение проблемы создания больших многозеркальных антенн для радиотелескопов было предложено С.Э. Хайкиным и Н.Л. Кайдановским [7]. Главное зеркало антенны набрано из большого количества одинаковых плоских металлических щитов, установленных на поверхности земли и образующих (аппроксимирующих) часть параболоида. Управление положением луча в пространстве осуществляется за счет изменения наклона и положения щитов. Облучателем служит антенна с цилиндрическим зеркалом, возбуждаемым рупором. На этом принципе были построены Большой Пулковский радиотелескоп Главной астрономической обсерватории АН СССР и радиотелескоп РАТАН-600 вблизи станции Зеленчукская (Специальная астрономическая обсерватория АН СССР). Антенна РАТАН-600 [8] состоит из 900

отражательных щитов размерами 7.4 м × 2 м, установленных по кольцу радиусом 294 м. На минимальной рабочей длине волны 8 мм её ширина луча составляет около 4.3", что сравнимо с характеристиками направленности оптических телескопов.

Первая трехзеркальная двухдиапазонная антенна была предложена Л.Д. Бахрахом для земной станции дальней космической связи сантиметрового и дециметрового диапазонов (рис. 7). Антенна получила название ТНА-400 [9]. Главное зеркало – параболическое, оно имеет диаметр 32 м. Первое вспомогательное зеркало диаметром около 1 м расположено вблизи фокуса параболоида, а второе вспомогательное зеркало диаметром 1 м – около его вершины. Облучатель сантиметрового диапазона стоит в фокусе второго вспомогательного зеркала. Фактически, такая схема возбуждения является лучеводной, что позволяет существенно снизить потери в тракте. Первое вспомогательное зеркало выполнено из диполей и является прозрачным для поля облучателя дециметрового диапазона, установленного в фокусе главного зеркала. Электродинамическое проектирование антенны было выполнено в НИИ-17 под руководством Л.Д. Бахраха. Проектирование антенны и станции в целом выполнялось кооперацией предприятий (головная организация – ОКБ МЭИ). Станция была создана в 1959 – 61 г.г. и установлена в Крыму под г. Симферополем. С ее помощью в течение многих лет обеспечивались связью дальние полеты космических аппаратов.

В 60-е годы в СССР были разработаны и начали серийно выпускаться двухзеркальные антенны для систем космической связи и радиорелейной связи [10]. Среди них следует особо отметить антенны земных станций спутниковой связи ТНА-57 (диаметр большого зеркала $D = 12$ м, рис. 8), разработанные в ОКБ МЭИ для системы «Орбита», благодаря которой телевидение стало доступным практически на всей территории нашей страны [9].

Таков лишь краткий перечень многозеркальных антенных устройств, в которых нашли воплощение идеи и методы расчета, предложенные Л.Д. Бахрахом.

Первые зарубежные публикации. Открытые публикации по двухзеркальным антеннам в США появились лишь на рубеже 50-х и 60-х годов [11 - 13]. Наиболее содержательна из них работа Ханнана [12]. В ней дано подробное изложение теории осесимметричных антенн Кассегрена и Грегори, приведены соотношения для описания геометрии зеркал и рассмотрены их модификации, сформулированы широко используемые впоследствии понятия виртуального облучателя и эквивалентного параболоида. Даны рекомендации по выбору параметров двухзеркальных антенн, в частности, обеспечивающих минимальное затенение апертуры большого зеркала

облучателем и малым зеркалом. Для уменьшения затенения апертуры антенны малым зеркалом предложено использовать поляризационные зеркала: трансрефлекторы (пропускающие одну поляризацию и отражающие другую) и твистрефлекторы (поворачивающие плоскость поляризации). В работе описаны также результаты разработок двухзеркальных антенн в Вилеровской лаборатории, в частности описана система с подвижным вспомогательным зеркалом, обеспечивающим за счет продольного и поперечного перемещения управление шириной и углом отклонения луча.

Следует подчеркнуть, что в первых зарубежных работах рассматривались вопросы проектирования двухзеркальных антенн, построенных по классическим схемам Кассегрена и Грегори. В них не ставились задачи синтеза поверхностей зеркал, что характерно для работы Л.Д. Бахраха и других отечественных работ.

Отдадим должное зарубежным исследователям – им принадлежит приоритет в разработке скалярных облучателей, которые стали важной составляющей значительного прогресса в повышении эффективности зеркальных антенн (в частности, - многозеркальных). К таким облучателям относят двухмодовый рупор, предложенный Поттером [14], и гофрированный рупор, предложенный Кеем в закрытых работах Кембриджской лаборатории ВВС США в 1962-64 годах и рассмотренный позднее в открытых статьях [15, 16].

Теория двухзеркальных антенн с осесимметричными профилированными зеркалами. Как указано выше, Л.Д. Бахрахом в [1] поставлена и решена обратная задача для синтеза поверхностей двухзеркальной антенны, которые преобразуют исходную амплитудную диаграмму направленности облучателя в заданную веерную диаграмму антенны с требуемым угловым амплитудным распределением в пределах главного лепестка. Там же решена задача синтеза поверхности малого зеркала, преобразующего поле сферической волны облучателя в поле, образующее после отражения от большого зеркала заданной формы плоскую волну в апертуре антенны.

В 1955–56 годах Б.Е. Кинбер опубликовал работы [17, 18] по синтезу двухзеркальных антенн, в которых поставлена и решена задача преобразования произвольного поля облучателя с заданной амплитудой по фронту в произвольное поле с заданным амплитудным распределением по фронту в апертуре большого зеркала. В частном случае первичное поле – сферическая волна, а поле в апертуре – плоская волна. Для решения использованы законы геометрической оптики: закон баланса энергии в пучке поля облучателя и в пучке волны на выходе системы, а также закон зеркального отражения на поверхностях зеркал. Задача определения формы поверхностей зеркал

сведена к решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка с начальными условиями. В зависимости от выбора типа начальных условий уравнения дают либо систему типа Кассегрена, либо систему типа Грегори. Позднее, применительно к зеркалам произвольной (несимметричной) формы задача была рассмотрена в [19].

Приведенные в [17 - 20] результаты расчетов показали, что в таких антеннах полный коэффициент использования поверхности зеркала может превышать 80%, в то время как в классических системах Кассегрена и Грегори он, как правило, не превосходит 70%.

Плодотворность предложенного подхода состоит в том, что, выбирая ту или иную форму амплитудного распределения в апертуре антенны, можно добиться либо высокого коэффициента использования поверхности – при равномерном распределении амплитуды, – либо низкого уровня боковых лепестков – при спадающем амплитудном распределении. В 1958 году на Сессии общества А.С. Попова [2], а также в докторской диссертации [3] Л.Д. Бахрахом рассмотрены вопросы оптимизации двухзеркальных антенн по критериям максимума коэффициента направленного действия и минимума уровня боковых лепестков.

Отечественные исследования по синтезу двухзеркальных антенн существенно опередили аналогичные работы за рубежом и в значительной степени повлияли на них. В 1963 году в США была доложена на конференции [21], а в 1964 году опубликована [22] работа Галиндо по синтезу осесимметричных двухзеркальных антенн, повторяющая результаты [17 - 20]. В 1964 году в США также опубликована статья Моргана [23], в которой теория синтеза двухзеркальной антенны применена к случаю, когда облучатель – источник неоднородной плоской волны, выполненный в виде рупорно-параболической антенны. Кроме того, наряду с системами типа Кассегрена и Грегори, в работе изучены два новых варианта антенны, предложенные несколько раньше в [24]. Они описываются той же системой дифференциальных уравнений, но имеют другие начальные условия. Это система типа Кассегрена со скрещивающимися лучевыми полями промежуточного поля, и система типа Грегори с нескрещивающимися полями. Особенностью предложенных антенн является наличие конической точки в вершине малого зеркала. За счет этой конической точки отраженные от малого зеркала лучи не попадают в облучатель, а отраженные от главного зеркала лучи не попадают на вспомогательное зеркало, что существенно улучшает согласование антенны и уменьшает потери. Двухзеркальные антенны с малыми зеркалами, имеющими коническую точку, впоследствии нашли широкое практическое применение. В частности, поверхности зеркал такой антенны

могут иметь образующие в виде параболы для большого зеркала, эллипса или гиперболы для малого зеркала. В нашей стране они получили название систем типа АДЭ и АДГ [25] (антенна двухзеркальная с эллиптической (гиперболической) образующей малого зеркала).

Наряду с теорией синтеза многозеркальных антенн на основе геометрической оптики, в 60 -70-е годы началась разработка дифракционных методов, позволивших повысить точность расчетов антенн. Так, в работах [26 - 30] развиты методы расчета бокового излучения зеркальных антенн с существенно более высокими точностями, чем приближение физической оптики. В работах Даво [31], Вуда [32] и Бахраха [33] описаны методы оптимизации формы поверхностей двухзеркальной антенны на основе дифракционной теории (см. также обзор Клэррикоутса [34]), позволяющие уменьшить дифракционные потери и повысить направленность антенн на 0.5 дБ и более.

Важным новшеством стали разработки многодиапазонных облучателей зеркальных антенн, позволившие существенно расширить их функциональные возможности [35, 36].

Разработки многозеркальных антенн с осесимметричными профилированными рефлекторами. Теоретические работы советских ученых в области двухзеркальных антенн с профилированными поверхностями зеркал позволили создать образцы антенн, которые стали гордостью отечественной науки и техники. К ним, в первую очередь, относятся радиотелескопы РТ-70 (диаметр большого зеркала 70 м) и ТНА-1500 (диаметр большого зеркала 64 м). Обе антенны созданы большой кооперацией институтов, КБ и заводов: РТ-70 – под руководством РНИИКП (М.С. Рязанский, Л.И. Гусев), ТНА-1500 – под руководством ОКБ МЭИ (А.Ф. Богомолов, Б.А. Попереченко). Начало разработки этих систем относится к середине 60-х годов, введены в эксплуатацию они были в конце 70-х.

Полноповоротная антенна радиотелескопа РТ-70 (рис. 9) работает в диапазоне длин волн от 1.5 до 100 см [37, 38] со сменными облучателями. Она выполнена по двухзеркальной модифицированной схеме Грегори. Конструкция рефлектора и оптической системы в целом в значительной степени компенсирует деформации из-за гравитационных нагрузок, изменяющихся при перенацеливании антенны. Профилированные поверхности рефлекторов и гибридно-модовые облучатели обеспечивали коэффициент использования поверхности до 0.8 в дециметровом диапазоне волн и около 0.74 – в сантиметровом. Были созданы два образца РТ-70: один установлен около Евпатории, другой – вблизи г. Уссурийска. После нескольких лет эксплуатации система облучения была доработана: в его конструкцию введен лучевод с поворотным зеркалом, за счет перенацеливания которого включается облучатель нужного диапазона

[39]. В РТ-70 имеется также радиопередатчик с мощностью около 200 кВт для работы в режиме активной локации и связи.

Радиотелескоп РТ-70 используется для управления автоматическими космическими аппаратами и приема информации с них, радиолокационных исследований планет и астероидов, радиоастрономических исследований дальнего космоса, в том числе, совместно с другими радиотелескопами, в режиме интерферометра со сверхдлинной базой.

Полноповоротная антенна радиотелескопа ТНА-1500 (рис.10) работает в диапазоне длин волн от 3 до 100 см с несколькими облучателями [9, 40]. Она выполнена по двухзеркальной схеме в двух вариантах: один – по модифицированной схеме Грегори (установлен на подмосковном объекте «Медвежья озеро»), другой – по модифицированной схеме Кассегрена (объект «Калязин»). Профилированные поверхности большого и малого зеркал, а также конструкция каркаса рефлектора обеспечивают КИП 0.6 и более во всем диапазоне частот с учетом деформаций при перенацеливании антенны. Ширина луча на верхних частотах диапазона составляет около 2". Облучатели всех диапазонов размещены в контейнере вблизи вершины большого зеркала. Их смена осуществляется за счет перенацеливания контррефлектора.

Радиотелескопы ТНА-1500 и РТ-70 используются для наблюдений за Солнцем и другими космическими объектами, в том числе, совместно с другими радиотелескопами, в режиме интерферометра со сверхдлинной базой. В последнее десятилетие антенны ТНА-1500 и РТ-70 модернизируются в части совершенствования системы облучателей, аппаратуры управления антенной и обработки сигналов. Их планируется использовать в отечественных и международных проектах исследования планет, Луны, радиоастрономических объектов Галактики, и системах дальней связи с космическими аппаратами.

Еще один впечатляющий пример – антенная система радиоинтерферометра Сибирского солнечного радиотелескопа (ССРТ) [6, 41]. Система выполнена в виде двух взаимно перпендикулярных рядов двухзеркальных антенн в направлениях север-юг и запад-восток по 128 антенн в каждом ряду (рис. 11). Длина каждой линейки – 622 м, что обеспечивает разрешающую способность 20"×20" на рабочей длине волны 5.2 см. Антенны установлены на полноповоротных опорных устройствах, что позволяет сопровождать Солнце от восхода до заката с помощью автоматической системы слежения. Зеркальные антенны с апертурой диаметром 2.5 м выполнены по схеме антенн с двойной эллиптической образующей (АДЭ) и имеют коэффициент использования поверхности более 0.7.

Антенна была спроектирована и изготовлена кооперацией предприятий при головной роли АН СССР (А.А. Пистолькорс – научный руководитель), СибИЗМИР (Г.Я. Смольков) и КБРП (Г.Г. Бубнов). К проектным работам по созданию ССРТ приступили в 1965 году, изготовление и сборка завершены к 1980 г, эксплуатация начата в 1981 г.

С помощью ССРТ в течение нескольких десятилетий ведутся наблюдения за радиоизлучением Солнца. Благодаря высокой разрешающей способности, ССРТ позволяет строить радиоизображения поверхности и короны Солнца, следить за динамикой развития активных областей и вспышек в солнечной короне.

Начиная со второй половины 60-х годов, двухзеркальные антенны с осесимметричными профилированными зеркалами стали широко применяться как в отечественных, так и в зарубежных разработках. Например, в 1977 году в США был запущен спутник для исследования планет солнечной системы Voyager-1. На нем установлена двухзеркальная антенна с осесимметричными профилированными зеркалами [42], обеспечивающими высокую эффективность использования поверхности (рис. 12). Главное зеркало имеет диаметр 3.7 м. Антенна работает в диапазонах 7/8 ГГц и 1.5 ГГц. Через нее Voyager-1 передавал на Землю изображения планет и других небесных тел в течение более 30 лет, пока не вышел за пределы Солнечной системы.

Многолучевые и сканирующие многозеркальные антенны с неподвижным главным зеркалом. Еще одно направление, в котором активно велись теоретические и практические работы, – зеркальные сканирующие и многолучевые антенны. В 1961 году Л.Д. Бахрахом и И.В. Вавиловой в работе [43] разработаны методы синтеза двухзеркальной антенны со сферическим зеркалом. Как было показано ранее [1], такие антенны позволяют сканировать лучом или обеспечивают формирование одновременно нескольких лучей в широком секторе углов. В [43] аналитически решена задача геометрооптического синтеза поверхности малого зеркала, обеспечивающего формирование плоской волны в апертуре антенны без фазовых ошибок, что существенно повышает эффективность использования поверхности большого зеркала. В США аналогичная работа была опубликована в 1964 году [44]. Наряду с изложением известных результатов по синтезу малого зеркала, в ней представлены экспериментальные данные по антенне трехсантиметрового диапазона с диаметром главного зеркала 3 м.

В СССР двухзеркальная схема с главным сферическим зеркалом была реализована в конструкциях двух радиотелескопов Армянской Академии наук. Это антенна радиотелескопа ДАС-5 со сферическим рефлектором диаметром 5 м, построенная в 60-е годы в качестве опытного образца, и построенная по такой же схеме в 70-е – 80-е годы антенна большого радиотелескопа РОТ-32/54 (рис. 13). Обе они созданы под

руководством П.М. Геруни [45, 46]. Антенна РОТ-32/54 выполнена на основе большого сферического зеркала диаметром 54 метра по схеме Л.Д. Бахраха [1, 43]. Зеркало - неподвижное, составлено из 3800 фрезерованных алюминиевых панелей, установленных при помощи регулируемых стоек в бетонном котловане. Высокая точность изготовления панелей и их взаимной юстировки позволяют работать на частотах как сантиметрового, так и миллиметрового диапазонов. Подвижный облучатель с корректирующим малым зеркалом установлен на арочных мачтах и обеспечивает перемещение луча в секторе до 60° от оси рефлектора. Ширина луча на рабочей длине волны 1 мм составляет $7''$.

Двухзеркальная антенна со сферическим главным зеркалом и вспомогательным зеркалом с конической вершиной была предложена в [47]. Такая конструкция позволяет уменьшать отражение в облучатель и рассеяние на вспомогательном зеркале. Последнее обстоятельство особенно важно для антенн со сферическим главным зеркалом ввиду большого размера вспомогательного зеркала.

Работы по двухзеркальным апланатическим антеннам для многолучевых и сканирующих антенн в СССР проводились еще в 50-е годы. В частности, Н.Г. Пономаревым и В.А. Колобовым был предложен графический метод построения антенн и на его основе определены возможности отклонения луча в апланатических системах [48].

Публикации 50-70-х годов по сканирующим многозеркальным антеннам были обобщены и систематизированы в статье Бахраха Л.Д. [49], а затем в книге Бахраха Л.Д. и Галимова Г.К. [50]. В этих работах описаны различные модификации таких антенн (значительная их часть – многозеркальные системы) и изложены методы расчета. Рассмотрены характеристики сканирования антенн, построенных по схемам Кассегрена и Грегори, а также антенн со сферическими зеркалами. Представлены теория и результаты расчетов апланатических зеркальных антенн, поверхности которых позволяют уменьшить aberrации при формировании отклоненных лучей, а также бифокальных антенн, позволяющих формировать лучи без aberrаций в двух выбранных направлениях. Рассмотрены методы численной оптимизации геометрии многозеркальных антенн по критерию минимума фазовой ошибки в апертуре при сканировании в заданном секторе углов.

Работы по бифокальным антеннам впоследствии получили развитие в работах Раппапорта [51], по полифокальным многозеркальным антеннам – в работах Б.Е. Кинбера [52], по апланатическим антеннам - в работах В.А. Калошина и Е.В. Фроловой [53, 54]. В последних двух работах были разработаны методы расчета и компьютерные программы для моделирования как симметричных, так и офсетных апланатических антенн типа Кассегрена и Грегори. Изучены зависимости характеристик излучения антенн от

геометрических параметров зеркальной системы и облучателя, показана возможность отклонения луча в таких антеннах на углы более 10 ширины главного лепестка.

Антенны с неосесимметричными профилированными зеркалами. С середины 70-х годов и до начала 21-го века активно велись работы по развитию теории и техники несимметричных (офсетных) многозеркальных антенн, в том числе с неосесимметричными профилированными поверхностями зеркал. Главное преимущество офсетных систем – отсутствие затенения апертуры главного зеркала облучающей системой и, как следствие, низкий уровень бокового излучения [55]. Известно, что несимметричные однозеркальные антенны имеют высокий уровень кроссполяризации при работе на линейной поляризации, а при работе на круговой поляризации характеризуются расщеплением максимумов диаграмм ортогональных поляризации. Применение многозеркальных антенн позволяет устранить эти недостатки. Напомним, что схемы офсетных двухзеркальных антенн были предложены Л.Д. Бахрахом в [1] (см. рис. 2 – 4). Впоследствии различные модификации несимметричных антенн Кассегрена и Грегори были подробно изучены в ряде работ, например [56, 57], и стали широко использоваться на практике.

Решения задач синтеза поверхности вспомогательного зеркала при заданной поверхности главного зеркала, предложенные Л.Д. Бахрахом в [1], справедливы как для осесимметричных, так и для неосесимметричных антенн.

Интересна и поучительна история решения задачи синтеза двухзеркальной антенны с неосесимметричными поверхностями, т.е. определения формы отражающих поверхностей, преобразующих (в приближении геометрической оптики) волну с заданным фронтом и распределением амплитуды по нему, в другую волну, заданную фронтом и распределением амплитуды. Эта задача оказалась весьма сложной для решения, и потребовались усилия многих групп исследователей на протяжении около 20 лет, прежде чем были найдены ответы на поставленные вопросы. Как упоминалось, эта задача сформулирована Б.Е. Кинбером [19] и сведена им к решению системы уравнений в частных производных первого порядка в полных дифференциалах. В работе показано, что в такой формулировке задача не имеет решения в общем случае, поскольку частные производные функций, входящих в систему, не удовлетворяют (в общем случае) известным требованиям интегрируемости. В течение почти двух десятилетий это утверждение расценивалось так, что строгое решение задачи синтеза поверхностей в приближении геометрической оптики вообще отсутствует. Осознавая высокие потенциальные возможности двухзеркальных офсетных антенн, многие исследователи в тот период пошли по пути поиска приближенных решений.

В 1977 году Мизусава, Урасаки и Танака [58] опубликовали результаты проектирования двухзеркальной офсетной антенны на основе приближенного решения уравнений геометрической оптики в сечениях антенны. Они представили результаты численного моделирования и измерений образца антенны с диаметром апертуры 1 м на частоте 20 ГГц. Эффективность использования апертуры антенны составила более 70% при уровне боковых лепестков не более минус 27 дБ и уровне кросс поляризации не более минус 31 дБ.

Продолжая исследования в этом направлении, Галиндо, Миттра, Ча [59] в 1979 году разработали метод приближенного решения системы уравнений в частных производных первого порядка для определения поверхностей офсетной антенны. В их методе законы зеркального отражения на зеркалах выполняются точно, а заданное амплитудное распределение в апертуре формируется приближенно.

В 1978-81 г.г. Весткотт с коллегами [60] свели решение указанной задачи к дифференциальному уравнению в частных производных второго порядка эллиптического типа – уравнению Монжа-Ампера. Поскольку данное уравнение является интегрируемым, оно дает строгое решение поставленной задачи. Уравнение решалось методом Ньютона, т.е. итерационной процедурой, на каждом этапе которой формировалась линеаризованная система уравнений, размерность которой равна количеству точек, используемых для построения зеркала. В начале 80-х такой громоздкий алгоритм имел серьезные ограничения, поскольку имеющиеся ЭВМ позволяли решать задачу лишь для 100 – 200 точек на зеркалах, что явно недостаточно для построения зеркал больших размеров.

В 1982 году В.А. Калошиным и А.А. Поповым [61], с использованием асимптотического соотношения между амплитудной диаграммой и фазовой функцией поля в апертуре антенны, была решена задача синтеза двухзеркальной антенны по заданной амплитудной диаграмме и форме главного зеркала. В общем случае задача сведена к уравнению Монжа-Ампера. Для веерной диаграммы было показано, что геометрическую оптику применять нельзя и задача в этом частном случае, используя приближение Кирхгофа, сведена к интегральному уравнению.

В 1984 году Б.Е. Кинбер предложил алгоритм решения задачи синтеза амплитудно-фазового распределения, названный им «однопараметрический метод» [52, 62]. Поверхности зеркал разбиваются системой колец, и закон сохранения энергии записан «усредненно» по кольцам. Закон зеркального отражения выполняется точно. В этом приближении задача сведена к решению системы дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка, которая решается методом характеристик. Изменяя параметры колец (форма, положение, размеры), можно управлять

распределением амплитуды как по периметру колец, так и поперек них – от центра к кромке зеркала. Так, с помощью итерационной процедуры можно увеличивать точность формирования требуемого амплитудного распределения. Приведены примеры расчета нескольких несимметричных антенн, в которых погрешность формирования амплитуды по фронту плоской волны в апертуре не превышает 1%.

В 1987 году Галиндо, Миттра и Имбриал [63], рассматривая поставленную задачу, указали на эквивалентность системы дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка и уравнения второго порядка Монжа-Ампера [60]. Они также использовали решение системы уравнений методом характеристик и на примерах расчета продемонстрировали, что можно получить высокую точность воспроизведения заданного распределения амплитуды в апертуре (менее 0.01 %). Это трактовалось как точное решение, хотя соответствующих математических доказательств и не было приведено.

В 1988 – 90 г.г. Килдал [64] предложил эффективный метод синтеза многозеркальных антенн, основанный на построении системы линейных алгебраических уравнений, также дающей строгое численное решение задачи. В основе метода лежит разбиение каждого зеркала произвольной сеткой, в узлах которой формируются локальные представления поверхности в виде бипараболического разложения. Коэффициенты разложения определяют нормаль и кривизны поверхности в каждой точке, а также обеспечивают плавную стыковку локальных представлений в соседних узлах. Положение узлов может варьироваться, чтобы обеспечить сохранение энергии в лучевых трубках. Такое описание поверхности позволяет записать связи между первичным полем и полем в апертуре на основе закона зеркального отражения и сохранения энергии в лучевой трубке. При этом учитывается векторный характер поля. Полученные соотношения являются линейными относительно координат поверхностей зеркал и позволяют строить их последовательно по рядам сеток на основе численной процедуры.

Весьма интересным приложением результатов Килдала стала модернизация облучающей системы радиотелескопа в Аресибо с неподвижным сферическим зеркалом диаметром 305 м (рис. 14). Используемый ранее облучатель в виде антенны бегущей волны не давал хорошего возбуждения зеркала. В работе Килдала разработана двухзеркальная облучающая система сферического зеркала, обеспечивающая высокую эффективность использования апертуры этой гигантской антенны.

В 1997 году Л.Д. Бахрах и В.Б. Тарасов [65] предложили свой подход к решению задачи о точном геометрикооптическом синтезе двухзеркальных антенн. Они записали систему уравнений, описывающую преобразование волновых полей на двух

преломляющих или отражающих поверхностях с учетом изотропности среды распространения. Это позволило свести задачу к уравнению Пфаффа или равносильной ему системе уравнений в частных производных первого порядка. Расчеты антенн с помощью этого метода еще не проводились, и он ждет своих последователей для практического воплощения.

Разработки в конце 20-го – начале 21-го века. Успешное решение задач синтеза многозеркальных антенн на основе ГО, сведение этих задач к эффективным численным алгоритмам и компьютерным программам с удобными пользовательскими интерфейсами существенно повысило возможности проектирования таких антенн для различных применений уже в последние два десятилетия 20-го века.

Среди многочисленных разработок сложных многозеркальных антенн последних двух десятилетий следует назвать крупноапертурные многодиапазонные антенны с профилированными зеркалами и лучеводными системами возбуждения для систем радиолокации, радиоастрономии и спутниковой связи (см., например, [66, 67]). Для обеспечения работы в нескольких диапазонах в многозеркальных антеннах часто используются частотно-селективные поверхности [68, 69]. Некоторые из этих антенн, работающие в короткой части миллиметрового диапазона волн, имеют адаптивные поверхности зеркал.

В РЛС «Руза» Ка-диапазона, разработанной в ОАО «Радиофизика» под руководством А.А. Толкачева [67], антенна выполнена в виде фазированной решетки, с размером апертуры 7.2 м. Каждый излучатель решетки представляет собой двухзеркальную антенну с профилированными рефлекторами для обеспечения высокой эффективности использования апертуры (рис. 15). Энергия от гироклистронного передатчика мощностью около 1 МВт канализуется к антенне по сверхразмерному тракту с волной H_{01} . Начальное фазирование системы и электрическое сканирование луча осуществляются за счет фазовращателей, установленных в трактах решетки. При эксплуатации периодически проводится фазирование системы для компенсации уходов фаз, связанных с гравитационными, температурными и аппаратурными факторами. При ширине луча около 4' антенна имеет сектор электрического сканирования около 1°.

Разработаны несимметричные многолучевые многозеркальные антенны для бортовых спутниковых радиосистем и земных станций. Оригинальная многолучевая двухзеркальная антенна, формирующая лучи в одной плоскости для одновременной работы через несколько геостационарных спутников предложена В.А. Калошиным [70]. Главное зеркало антенны имеет форму параболического тора, вспомогательное зеркало также является тором с профилированной образующей и имеет седлообразную форму

(рис. 16). Система облучателей позволяет формировать лучи в секторе углов 40° с эффективностью использования апертуры около 70%. Особенностью работы такой антенны является то, что поверхность главного зеркала полностью используется для формирования всех лучей, а на вспомогательном зеркале для каждого луча используется лишь некоторый его участок. В настоящее время антенны такого типа выпускаются серийно (см., например, [71]). Офсетные двухзеркальные многолучевые антенны с полным использованием главного зеркала и частичным использованием вспомогательного зеркала для формирования каждого луча были созданы также в австралийской лаборатории SCIRO [72].

Хотя геометрооптические решения, полученные для большого количества многозеркальных систем, и называются строгими, сам подход является приближенным, поскольку не учитывает явлений дифракции. Постановка задач синтеза с учетом дифракции восходит еще к работам Вуда и Бахраха [32, 33], выполненным в начале 70-х годов 20-го века. Однако в те годы практическое применение волновых методов было затруднено в связи с ограниченными возможностями вычислительной техники. Гигантский рост производительности компьютеров за последние десятилетия позволил решать такие задачи применительно к практическим разработкам. Так, к концу 20 века фирмой TICRA [73] разработаны пакеты программ для проектирования одно- и двухзеркальных антенн. Используемые алгоритмы основаны на описании полей не только в приближении геометрической оптики, но и в приближениях физической оптики и равномерной геометрической теории дифракции. Поверхности зеркал представляются в виде полиномов с неизвестными коэффициентами или в виде сплайнов с подвижными узлами. В качестве целевой функции в процессе численной процедуры определения форм поверхностей выступают заданные характеристики излучения: коэффициент усиления, уровень бокового излучения или уровень кросс-поляризации.

Среди отечественных работ в этом направлении можно отметить работы сотрудников ОАО «Радиофизика», где также созданы оригинальные алгоритмы и программы численной оптимизации поверхностей двухзеркальных антенн, основанные на приближении физической оптики [74]. С помощью этих алгоритмов разработаны двухзеркальные антенны с веерными лучами для бортовых ретрансляторов спутниковой связи [75], а также следящие многодиапазонные низкопрофильные антенны для мобильных станций спутниковой связи на транспортных средствах [76] (рис. 17).

Лев Давидович Бахрах до последних лет своей жизни не терял интереса к многозеркальным антеннам. В 2004 году он опубликовал статью [77], в которой подробно

рассмотрены история и перспективы развития техники многозеркальных антенн, методы их расчета, проблемы, требующие решения.

- Многозеркальные антенны СВЧ привлекли внимание разработчиков чуть более полувека назад. За прошедшие годы глубоко изучены теоретические вопросы и создано большое количество разнообразных антенн с уникальными характеристиками. Лев Давидович Бахрах – один из основоположников этой области науки и техники. Будучи автором первой работы по этой тематике, он впоследствии на протяжении нескольких десятилетий неоднократно возвращался к проблемам многозеркальных антенн и внес существенный вклад в их развитие.

- Благодарю за представленные материалы, полезные обсуждения и рекомендации В.И. Гусевского, С.П. Игнатова, В.А. Калошина, Б.Л. Когана, А.П. Курочкина, В.А. Макоту, Б.А. Попереченко, А.А. Толкачева.

Литература

1. *Бахрах Л.Д.*, Многозеркальные антенные системы. – Труды НИИ-17, Вып. III (30) 1953 г., с. 12 – 23.
2. *Бахрах Л.Д., Гришина В.М.*, О построении антенн с оптимальными диаграммами. – Доклады на сессии Научно-технического общества радиотехники и электроники им. А.С. Попова, 1958 г.
3. *Бахрах Л.Д.*, Многозеркальные антенны: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. М.: 1958. В надзаг.: МАИ.
4. *Кисунько Г.В.* Секретная зона. – М., «Современник», 1996.
5. *Первов М.* Системы ракетно-космической обороны России создавались так. – М.: АВИАРУС-XXI, 2003.
6. *Очерки истории радиоастрономии в СССР*, – Сб. науч. Тр. Киев: Наукова думка, 1985.
7. *Хайкин С.Э., Кайдановский Н.Л., Есепкина Н.А., Шифрис О.Н.* Большой Пулковский радиотелескоп. – Известия ГАО АН СССР, 1960 г., т. 21, № 164, с. 3 – 25.
8. *Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н.* Радиотелескопы и радиометры, М., Наука, 1973.
9. ОКБ МЭИ 60 лет (1947 – 2007). – М. «Гласность-АС», 2007, 120 с.
10. *Айзенберг Г.З., Ямпольский В.Г., Терешин О.Н.*, Антенны УКВ, М., «Связь», 1977 г.

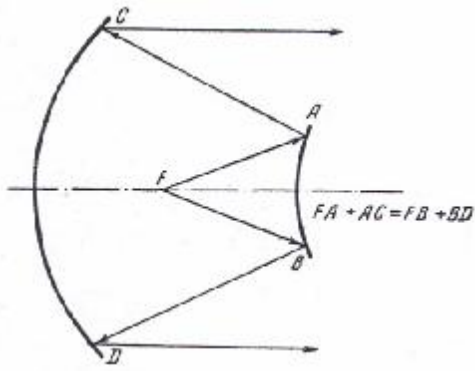
11. *Woodward*. - The Cassegrain Antenna. – Proc. IRE, vol. 46, p. 2A, March, 1958.
12. *Hannan P.W.* Microwave Antennas Derived from the Cassegrain Telescope, – IRE Transactions, AP, March, 1961, p.p. 140-153.
13. *Wilkinson E.J., Appelbaum A.J.*, Cassegrain Systems. – IRE Transactions, AP, January, 1961, p.p. 119-120.
14. *Potter P.D.* A New Horn Antenna with Suppressed Sidelobes and Equal Beamwidths, – The Microwave Journal, June, 1963.
15. *Minnet J.S., Thomas MacA.B.* A Method of Synthesizing Radiation Patterns with Axial Symmetry. – Transactions IEEE, 1966, AP-14, p.p. 654-656.
16. *Rumsey V.H.* Horn Antennas with Uniform Power Patterns Around their Axis. – Transactions IEEE, 1966, AP-14, p.p. 656-658.
17. *Кинбер Б.Е.* Решение обратной задачи геометрической акустики, – Акустический журнал, 1955, т. 1, вып. 3, стр. 221 – 225.
18. *Кинбер Б.Е.*, Двухзеркальная антенна с повышенным коэффициентом использования поверхности, Вестник НИИ, 1956, № 7.
19. *Кинбер Б.Е.*, О двухзеркальных антеннах, – Радиотехника и электроника, 1962, т. 7, вып. 6, стр. 973 – 980.
20. *Кинбер Б.Е., Шаруева Е.Т., Медведев А.И.*, Исследование двухзеркальных антенн с повышенным коэффициентом направленного действия. – Доклады на сессии Научно-технического общества радиотехники и электроники им. А.С. Попова, 1958.
21. *Galindo V.*, Design of Dual Reflector Antennas with Arbitrary Phase and Amplitude Distributions. – Proceedings of the International Symposium on Space Telecommunications, Boulder, Colorado, pp. 91-95, July, 1963.
22. *Galindo V.*, Design of Dual Reflector Antennas with Arbitrary Phase and Amplitude Distributions. – IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. AP-12, pp. 403-408, July, 1964.
23. *Morgan S.P.*, Some Examples of Generalized Cassegrainian and Gregorian Antennas. – IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. AP-12, pp. 685-691, November, 1964.
24. *Lee I.L.*, Improvements in or relating to Microwave areals. *Английский патент* № 973583, кл. HQ4D. Опубликовано октябрь 1964, приоритет от 11.04.1962 г.
25. *Ерухимович Ю.А.* Анализ параметров двухзеркальной антенны со смещенной фокальной осью. – Труды НИИР, 1968, №4,

26. *Кинбер Б.Е.* О боковом излучении зеркальных антенн. – Радиотехника и электроника, 1961, т.6, № 4.
27. *Уфимцев П.Я.* Метод краевых волн в физической теории дифракции. – М. Сов. Радио, 1962.
28. *Кинбер Б.Е., Хестанов Р.Х.* Боковое излучение несимметричных зеркальных антенн. – Радиотехника и электроника, 1968, № 10, с. 1738 – 1748.
29. *Kouyoumjian R.G.* A uniform GTD for an edge in a perfectly conducting surface – Proceedings IEEE, 1974, v. 62, Nov., pp.1448 – 1461.
30. *Боровиков В.А., Кинбер Б.Е.* О пределах применимости приближения Кирхгофа для расчета зеркальных антенн. – Радиотехника и электроника, 1976, № 5, с. 997 – 1006.
31. *Daveau B.* Synthèse et optimisation de réflecteurs de forme spéciale pour antennes. – Rev. Tech. Thomson – CSF, 1970, vol. 2, no. 1, pp. 37 – 55.
32. *Wood P.J.* Field correlation theorem with application to reflector areal diffraction problems. – Electronics Letters, № 11, 1970, pp. 326 – 327.
33. *Бахрах Л.Д., Каранетян К.Е.* К вопросу обоснования геометрической коррекции дифракционных эффектов при расчете малых зеркал. – Вопросы радиоэлектроники: Сер. Общетеchnическая, 1971, № 9-10.
34. *Клэррикоутс П.Дж. Б., Поултон Дж.Т.* Высокоэффективные зеркальные антенны. Обзор. – ТИИЭР, т. 65, № 10, 1977 г., с.57 – 97.
35. *Kumazawa H., Kouyama M., Kataoka Y.* Wide-band communication satellite antenna using a multifrequency primary horn – IEEE Transactions, AP, May 1975.vol. 23, pp. 404 – 407.
36. *Thomas B. M., Greene K. J.* A simple wide angle horn for the 4-GHz and 6 GHz bands. – IEEE Transactions, AP, September 1981, vol. 29, pp. 800 - 802.
37. *Козлов А.Н., Тарасов В.Б., Титов В.Н., Гришмановский В.А., Колчев Г.Н., Калачев П.Д., Коробов Б.С., Князев И.Н.* Зеркальная схема радиотелескопа РТ-70. – Известия ВУЗов, Сер. Радиофизика, т.XVI, № 12, 1973, с. 1909 – 1913.
38. *Козлов А.Н., Тарасов В.Б., Гришмановский В.А., Сергеев Б.Г.* Расчет и экспериментальные исследования радиотехнических характеристик антенны РТ-70. – Антенны, № 31, 1984 с. 17-28.
39. *Асланян А.М., Гришмановский В.А., Гулян А.Г., Игнатов С.П., Костенко В.И., Каневский Б.З., Козлов А.Н., Копелянский Г.Д., Матвеев Л.И. Папаценко А.Х., Мартиросян Р.М., Молотов Е.П., Струков И.А., Тарасов В.Б., Тимофеев В.В.*

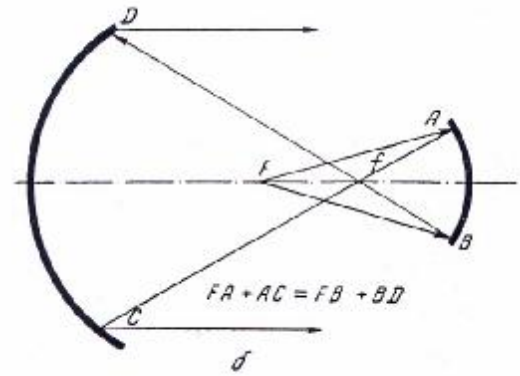
- РТ-70 – элемент интерферометра – Известия ВУЗов, Сер. Радиофизика, т. 30, № 3, 1987, с. 327 – 333.
40. Богомолов А.Ф., Попереченко Б.А., Соколов А.Г. Следящий радиотелескоп ТНА-1500 диаметром 64 м. – Сб. «Антенны», Вып. 30, 1982, с. 3 – 13.
 41. Пистолькорс А.А. Солнечный радиоинтерферометр и выделение местных источников на фоне излучения спокойного Солнца. – Сб. «Антенны», Вып. 31, 1984, с. 77 – 87.
 42. *The Handbook of Antenna Design*. Edited by Rudge A.W., Milne K, Olver A.D., Knight P. – Peter Peregrinus Ltd., 1986, v.1.
 43. Бахрах Л.Д., Вавилова И.В., Сферические двухзеркальные антенны, – Радиотехника и электроника, 1961 г., VII, №7, стр. 1146 – 1156.
 44. Holt F. S. and Bouche E. L., A Gregorian corrector for spherical reflectors, – IEEE Trans. Antennas Propagation, January 1964, vol. 12, pp. 44 – 47.
 45. Геруни П.М. Пятиметровая сферическая антенна миллиметрового диапазона – Сб. «Антенны», Вып. 4, 1968, с. 3 – 15.
 46. Сазонов Д.М. Антенны. – М., Радио и связь, 1988 г.
 47. Ерухимович Ю.А., Калошин В.А., Двухзеркальная антенна – А.с. СССР №841543, Б.И.№41, 1987 г.
 48. Пономарев Н.Г. Графический метод построения профилей апланатических систем – Радиотехника и электроника, 1961, т. VI, № 2, с. 214.
 49. Бахрах Л.Д. Многозеркальные антенны. – В Сборнике «Современные проблемы антенно-волноводной техники», М., Наука, 1967 г., стр. 53 – 72.
 50. Бахрах Л.Д., Галимов Г.К. Зеркальные сканирующие антенны. М., «Наука», 1981, 304 с.
 51. Rappaport C.M. An Offset Bifocal Reflector Antenna Design for Wide-Angle Beam Scanning. – IEEE Transactions, AP, vol. 32, Nov. 1984, pp. 1196 – 1204.
 52. Кинбер Б.Е. Обратные задачи теории зеркальных антенн – приближение геометрической оптики. – Препринт ИРЭ № 38 (410), М., 1984, 48 с.
 53. Калошин В.А., Фролова Е.В. Характеристики двухзеркальных осесимметричных апланатических антенн. – Антенны, № 7 (110), 2006 г., с. 45 – 51.
 54. Калошин В.А., Фролова Е.В. Характеристики офсетных двухзеркальных апланатических антенн. – Антенны, № 10 (137), 2008 г., с. 9 – 13.
 55. Радж А.У., Адейтия Н.А. Параболические антенны со смещенным зеркалом: Обзор. – ТИИЭР, т. 66, № 12, 1978, с. 5 – 36.

56. *Cook J.S., Elam E.M., Zusker H.* The Open Cassegrain Antenna – Part 1: Electromagnetic Design and Analysis. *Bell System Technical Journal*, 1965, v. 44, pp. 1255 – 1300.
57. *Mizuguchi Y., Akagawa M., Yokoi H.* Offset Gregorian Antenna. – *Trans. Electron. Comm. Japan*, 1978, v. 61 B, No 3.,
58. *Mizusawa M., Urasaki S., Tanaka H.* An Offset Shaped-Reflector Cassegrain Antenna – In *Proc. IEEE Symp., Antennas and Propagation*, June 1977, Stanford, CA, pp. 444 – 447.
59. *Galindo V., Mittra R., Cha A.* Aperture Amplitude and Phase Control of Offset Dual Reflectors. – *IEEE Trans. Antennas Propagation*, vol. AP-27, No. 2, March 1979, pp. 154 - 164.
60. *Westcott B.S., Stevens F.A., Brickell F.* GO synthesis of offset dual reflectors. – *IEE Proc.*, Vol. 128, Pt.H., No 1, February 1981, pp. 11 – 18.
61. *Калошин В.А., Попов А.П.* О синтезе двухзеркальных антенн по амплитудной диаграмме направленности. – *Радиотехника и Электроника*, №6, 1982 г., с. 1110 – 1119.
62. *Кинбер Б.Е., Кацков С.Н., Шишлов А.В.* Обратные задачи в оптике и теории антенн. – *Материалы IX Всесоюзной школы по дифракции и распространению волн*, Казань, 1988, 117 с.
63. *Galindo V. Imbriale W.A., Mittra R.* On the Theory of the Synthesis of Single and Dual Offset Shaped Reflector Antennas. – *IEEE Trans. Antennas Propagation*, vol. AP-35, No. 8, August 1987, pp. 887 – 896.
64. *Kildal P.-S.* Synthesis of Multireflector Antennas by Kinematic and Dynamic Ray Tracing. – *IEEE Trans. Antennas Propagation*, vol. AP-38, No. 10, October 1990, pp. 1587 – 1599.
65. *Бахрах Л.Д., Тарасов В.Б.* Точный геометрооптический синтез двухповерхностных линзовых и зеркальных систем общего вида. – *Сб. «Антенны»*, Вып. № 1 (38), 1997, с. 27 – 30.
66. *Morabito D. D.* The characterization of a 34-meter beam-waveguide antenna at Ka band (32.0 GHz) and X band (8.4 GHz), – *IEEE Antennas Propagat. Mag.*, vol. 41, pp. 23 - 34, August 1999.
67. *Толкачев А.А., Макота В.А., Павлова М.П., Николаев А.М., Денисенко В.В., Соловьев Г.К.* Большая радиолокационная ФАР миллиметрового диапазона волн. – *Антенны*, 1999, № 1(42), с.4 - 11.

68. *Wu T.K.* Frequency Selective Surface and Grid Array. – John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995.
69. *Jaldehyag R. T. K., Kildal P.-S., Rönnäng B. O.* Dual-band reflector feed system for classical Cassegrain radio telescopes, – IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 41, pp. 325 - 332, March 1993.
70. *Калошин В.А.* Зеркальная антенна. – Патент РФ, №2173496, 10.09.2001 г.
71. www.wavefrontier.com
72. www.sciro.au
73. www.ticra.dk
74. *Реутов А.С., Шишлов А.В.* Особенности поэтапного синтеза зеркальных антенн с контурными диаграммами направленности при использовании сплайнового представления поверхности зеркала. – Электромагнитные волны и электронные системы, 2003, № 2, с. 4-14.
75. *Виленко И.Л., Тоболев А.К., Шишлов А.В.* Двухзеркальные антенны с веерными лучами. – Антенны, № 1(92), 2005, с. 53 – 58.
76. *Eom S.Y., Son S.H., Jung Y.B., Jeon S.I., Ganin S.A., Shubov A.G., Tobilev A.K., Shishlov A.V.* Design and Test of a Mobile Antenna System with Tri-Band Operation for Broadband Satellite Communications and DBS Reception. – IEEE Transactions, AP, November 2007, vol. 55, No 11, pp. 3123 - 3133.
77. *Бахрах Л.Д.* Многозеркальные антенны. – Антенны, Вып. 8-9 (88-89), 2004 г., с. 23 – 35.



a)



б)

Рис. 1. Схемы антенн Кассегрена (а) и Грегори (б) из [1].

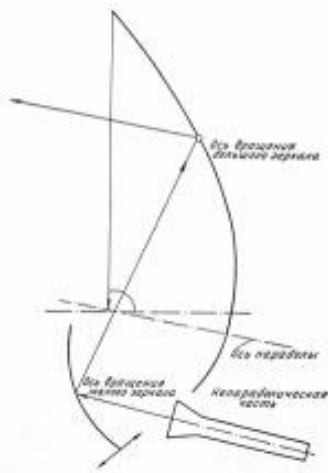


Рис. 2. Схема офсетной антенны типа Грегори, с профилированными зеркалами, предложенная в [1].

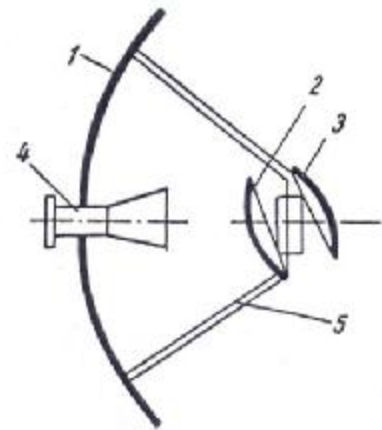


Рис. 3. Схема двухзеркальной антенны со сменными вспомогательными профилированными зеркалами [1].

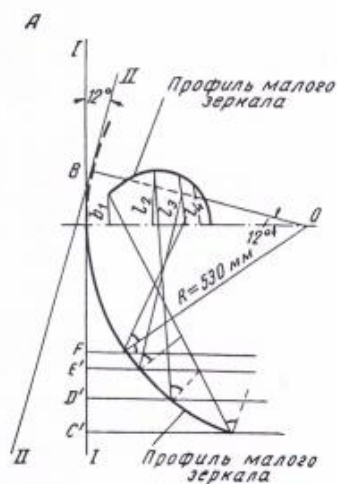


Рис. 4. Двухзеркальная офсетная антенна со сферическим главным зеркалом и профилированным вспомогательным зеркалом, предложенная в [1].



Рис. 5. Радиолокатор для обнаружения и сопровождения баллистических ракет с антенной Кассегрена (п. Сары-Шаган) [4].



Рис.6. Антенна Кассегрена для радиолокатора обнаружения и сопровождения баллистических ракет (г. Аральск) [5].



Рис. 7. Трехзеркальная антенна для дальней космической связи ТНА-400 (г. Симферополь) [9].



Рис. 8. Антенна ТНА-57 земной станции системы спутниковой связи «Орбита» (п. Медвежьи Озера) [9].



Рис. 9. Радиотелескоп РТ-70 с двухзеркальной антенной с профилированными зеркалами (г. Уссурийск) [39].



Рис. 10 Радиотелескоп с двухзеркальной антенной с профилированными зеркалами ТНА-1500 (п. Медвежьи Озера) [9].

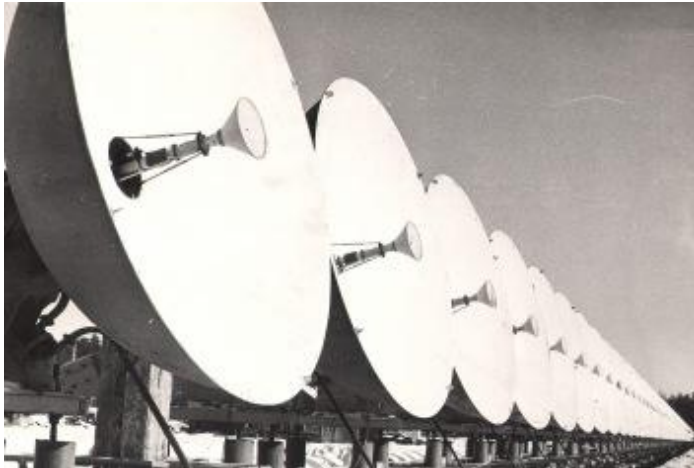


Рис. 11. Многозеркальная антенна Сибирского солнечного радиотелескопа (г. Иркутск) [6].



Рис. 12. Спутник Voyager с двухзеркальной антенной для передачи данных на Землю [42].

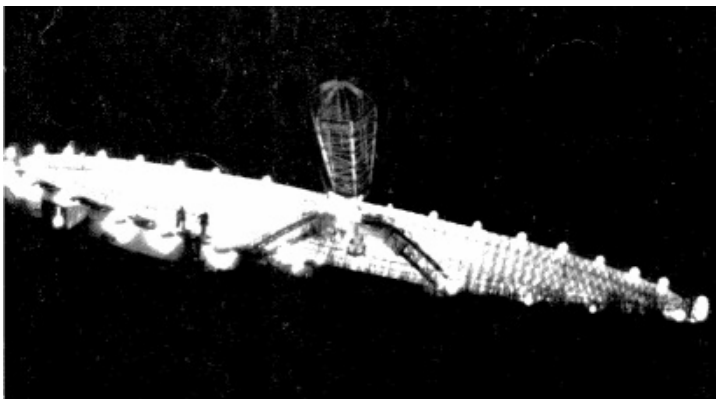


Рис. 13. Двухзеркальная антенна радиотелескопа ROT-32/54 с неподвижным сферическим зеркалом (г. Арагац, Армения) [46].



Рис. 14. Трехзеркальная антенна радиотелескопа с неподвижным сферическим зеркалом и двухзеркальной облучающей системой (Аресибо) [63].

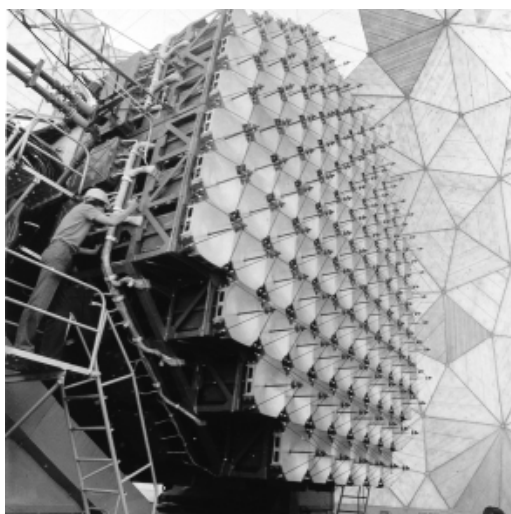


Рис. 15 Фазированная решетка из двухзеркальных антенн с профилированными зеркалами радиолокатора «Руза» (п. Сары-Шаган) [66].



Рис. 16 Многолучевая двухзеркальная антенна для связи с несколькими геостационарными спутниками [69, 70].



Рис. 17. Низкопрофильная двухзеркальная следящая антенна с профилированными зеркалами для многодиапазонной мобильной спутниковой связи на транспорте [75].

Введение

Одно из направлений антенной техники, которым занимался Лев Давидович Бахрах – теория и техника многозеркальных антенн. Первые его работы в этой области относятся к началу 50-х годов [1]. Впоследствии, на протяжении нескольких десятилетий он неоднократно возвращался к данной тематике и внес существенный вклад в ее развитие.

В первой половине двадцатого века в радиолокационных станциях (РЛС) различного назначения уже применялись однозеркальные антенны. Появилась и литература по этому вопросу. В СССР в 1947 году была издана книга А.А. Пистолькорса «Антенны» [A], в которой рассмотрены вопросы проектирования параболических антенн. В 1949 году в серии Масачусетского технологического института вышла книга Сильвера «Antenna Theory and Design» [B], в которой была изложена теория однозеркальных антенн. В 1950 году книга была переведена на русский язык под редакцией Я.Н. Фельда и издана под названием «Антенны сантиметровых волн». Теория построения поверхностей зеркал, изложенная в этих книгах основана на методах геометрической оптики (ГО), а для расчета характеристик излучения использовался метод физической оптики (ФО), учитывающий дифракцию поля.

Наряду с параболическими антеннами, в [B] описаны так называемые антенны со специальными профилями поверхности, в частности с зеркалами, формирующими веерные косекансные диаграммы направленности (ДН). Методы их проектирования на основе ГО были предложены в работе Дунбара [C] и развиты Спенсером в написанном им разделе книги [B]. Для построения поверхности, преобразующей поле сферической волны облучателя с известной амплитудной ДН в поле с заданной амплитудной (косекансной) ДН, использованы закон сохранения энергии в лучевой трубке и закон зеркального отражения (или эквивалентный ему закон постоянства оптического пути). Задача определения поверхности сведена к решению обыкновенных дифференциальных уравнений с начальными условиями.

В 1950 году Келлехер [D] разработал метод преобразования волновых фронтов, позволяющий определить поверхность зеркала через заданные представления поверхностей падающего и отраженного волновых фронтов.

Работы [A-D] послужили впоследствии методической основой для проектирования и расчета двухзеркальных и многозеркальных антенн. Заметим, что принципы построения многозеркальных систем в астрономической оптике были известны давно. Телескопы Кассегрена и Грегори созданы еще в 17 веке. Казалось бы, какие принципиальные отличия могли возникнуть при создании аналогичных систем в СВЧ диапазоне? Развитие теории и

техники многозеркальных антенн в последующие десятилетия показало, что такие отличия есть, и работы в этом направлении оказались весьма плодотворными. Причиной тому - несколько обстоятельств.

Во-первых, ввиду существенно больших длин волн СВЧ диапазона по сравнению с оптическим, требования к точности выполнения поверхностей СВЧ зеркал на порядки ниже, чем оптических. Приемлемые погрешности выполнения поверхностей – а это $1/20$ – $1/30$ длины волны – составляют единицы миллиметров в сантиметровом диапазоне волн, поэтому уже с середины двадцатого века начали создавать большие СВЧ зеркала с использованием разнообразных технологий общего машиностроения и авиационной промышленности: штамповки, токарно-фрезерной металлообработки (в последние десятилетия – всё больше с применением станков с ЧПУ), литья из металла и пластмасс, выпекания из пластиков на формованных оправках, плазово-шаблонных методов, и т.п.

Во-вторых, в силу технологических ограничений поверхности оптических линз и зеркал, как правило, имели до второй половины двадцатого века сферическую форму, а сами системы выполнялись длиннофокусными. Упомянутые выше технологии СВЧ зеркал позволили уйти от этих ограничений и делать поверхности сложной формы с широкими возможностями преобразования электромагнитного поля. (Конечно, впоследствии значительный прогресс в создании сложных поверхностей зеркал и линз был достигнут и применительно к оптическим системам).

В третьих, в СВЧ диапазоне, имеется большой выбор облучателей зеркал с разнообразными характеристиками излучения за счет использования различных типов волн, возбуждаемых в линиях питания.

Кроме того, размеры рефлекторов зеркальных антенн СВЧ составляют десятки или сотни длин волн, то есть существенно меньше, чем в оптике, поэтому дифракционные эффекты весьма сильно влияют на их характеристики излучения, и это приводит к дополнительным особенностям излучения систем СВЧ по сравнению с оптическими.

Осознание указанных обстоятельств позволило создать во второй половине двадцатого столетия большое количество разнообразных многозеркальных антенн СВЧ с уникальными характеристиками. Лев Давидович Бахрах был одним из основоположников этой области науки и техники. Начиная свою деятельность под руководством члена-корреспондента АН СССР А.А. Пистолькорса, он многое сделал сам, многое – совместно со своими учениками. Кроме того, будучи долгие годы руководителем антенного отдела в своем институте, активно участвуя в работе Межведомственного координационного совета по антеннам (МКС-7), членом-корреспондентом Академии наук, председателем оргкомитетов антенных конференций, он имел значительное влияние на научно-

техническую политику, принятие технических и организационных решений по многим научным направлениям и прикладным разработкам в нашей стране. Он был яркой личностью, и вокруг него существовали неформальные творческие коллективы, через которые его влияние на развитие теории и техники антенн было, несомненно, велико.

Цель настоящей работы - рассказать об основных вехах в истории многозеркальных антенн и о роли Л.Д. Бахраха в становлении и развитии этой области науки и техники.

- a. Пистолькорс А.А. «Антенны» », М., Связьиздат, 1947 г., 480 с.
- b. Silver S., « Antenna Theory and Design», M.I.T. Rad. Lab. Series, New York: McGraw-Hill Book Co., 1949.
«Антенны сантиметровых волн», т.1, 2, Перевод с англ. под. ред. Фельда Я.Н., М. Советское радио, 1950 г.
- c. Dunbar A., Calculation of Doubly Curved Reflectors for Shaped Beams, Proceedings IRE, vol.36, 1948, No.10, p.p. 1289-1296.
- d. Kelleher K.S., Relation Concerning Wave Fronts and Reflector, - J. Applied Physics, 1950, v.21, p. 573.