

УДК 621.396.67

# АНТЕННЫ ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© Авторы, 2013

А. П. Евдокимов — к.ф.-м.н., с.н.с. Института радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины. E-mail: yevdok@ire.kharkov.ua

## Аннотация

Описываются антенны дифракционного излучения, состоящие из диэлектрического волновода и дифракционной решетки. Представлено широкое разнообразие антенных моделей. Ряд из них используется в СВЧ и КВЧ диапазонах, включая антенну спутникового радиометрического приемника 8 мм диапазона длин волн, линейные антенны для бортовых РЛС бокового обзора, антенны с косекансными диаграммами направленности, плоские и линейные антенны для автомобильных РЛС и др. Обсуждаются новые возможности в конструировании антенн в связи с развитием техники и моделирования.

**Ключевые слова:** антenna, дифракционное излучение, диэлектрический волновод, сканирование

## Abstract

Diffraction radiation antennas are described, consisting of a dielectric waveguide and a diffraction grating. A wide variety of antennas models are presented, a number of them have been used in SHF and EHF radiosystems. Among them: antenna for 8mm satellite radiometer, linear antennas for airborne side looking radars, antennas with cosecant-type radiation pattern, planar and linear scanning antennas meant for automobile radars, etc. New opportunities in antenna design are discussed in connection with technology and simulation progress.

**Keywords:** antenna, diffraction radiation, dielectric waveguide, scanning

## Введение

Эффект дифракционного излучения как результат рассеяния неоднородных плоских волн на периодических и квазипериодических структурах, изучается в ИРЭ НАН Украины с 1970-х годов. Теоретические работы в этом направлении, выполненные под руководством академика НАН Украины В. П. Шестопалова, показали возможность эффективного преобразования энергии неоднородных плоских волн в энергию объемной рассеянной волны и управления такими ее характеристиками, как направление излучения и поляризация [1—3]. Параллельно выполнялись экспериментальные исследования с источником медленных поверхностных волн в виде диэлектрического волновода эллиптического сечения [4] на основной волне  $E$ -типа с отражательными дифракционными решетками. Полученные результаты дополнили физическую картину эффекта дифракционного излучения и выявили ряд новых особенностей, связанных с взаимным влиянием дифракционной решетки и волноведущей структуры [5—7]. В это время проводимые ИРЭ НАН Украины комплексные исследования природной среды Земли радиофизическими методами с аэрокосмических носителей тормозились отсутствием необходимых бортовых антенн миллиметрового диапазона. Успешному решению этой проблемы способствовали исследования по рассеянию медленных поверхностных волн решетками. Весьма продуктивной оказалась идея сканирования лучом излучателя путем поворота или скоса дифракционной решетки в поле поверхностной волны планарного диэлектрического волновода (ПДВ) [8—10]. Последующие эксперименты подтвердили такую возможность и привели к созданию планарной сканирующей антенны дифракционного излучения 8 мм радиометра [11—14]. Эта антenna предназначалась для оборудования самолетов и вертолетов ледовой разведки перспективными датчиками дистанционного зондирования с целью создания в интересах народного хозяйства единой системы сбора данных о ледовой и гидрометеорологической обстановке в Арктике. Начиная с 1980 г. в ИРЭ НАН Украины в ходе фундаментальных исследований электродинамической системы диэлектрический волновод — дифракционная решетка выявлены резонансные области, изучены осо-

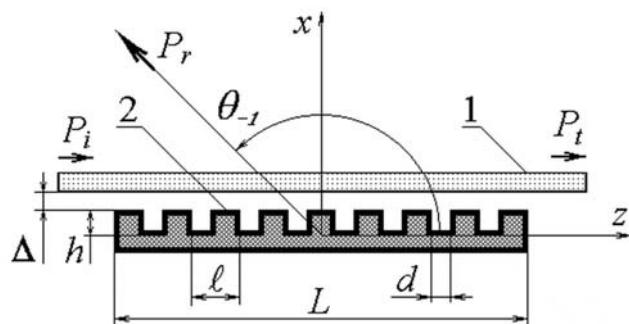
бенности рассеяния поверхностных волн двумерно-периодическими решетками, изучен целый ряд дифракционных явлений, проведена оптимизация ее параметров [15—18]. Параллельно проводились исследования по поиску, изучению и созданию новых типов линий передачи поверхностных волн и новых видов дифракционных решеток. Все это позволило разработать десятки качественных образцов антенн дифракционного излучения [19—29], большая часть из которых успешно эксплуатировалась в составе радиолокационных и радиометрических комплексов наземного, авиационного и космического базирования. По сравнению с волноводно-щелевыми антennами они отличаются большей технологичностью, по сравнению с микрополосковыми — меньшими потерями. Ряд технических решений обеспечил высокую надежность антенн дифракционного излучения, виброустойчивость, широкий температурный диапазон работы.

В работе рассмотрены наиболее удачные конструкции антенн дифракционного излучения и кратко описаны назначение и характеристики радиотехнических комплексов, в которых они использованы. Среди них: линейные антенны радиолокаторов бокового обзора, сканирующий радиометр космического базирования, антenna радиолокатора для обзора летного поля, сканирующие антенны автомобильных радиолокаторов.

Как научный руководитель направления академик НАН Украины В. П. Шестопалов принимал непосредственное участие в разработке большей части указанных антенн дифракционного излучения, тем самым активным образом способствовал развитию этого нового направления в технике антенных решеток.

### Линейные антенные решетки дифракционного излучения

Линейная антenna дифракционного излучения состоит из источника 1 медленных поверхностных волн и дифракционной решетки 2 (рис. 1). Диэлектрический волновод 1 возбуждается на основной mode  $E$  или  $H$ -типа.



**Рис. 1. Электродинамическая схема антенны дифракционного излучения**

В случае  $E_1$ -моды, дифракционная решетка представляет собой гребенку с узкими канавками, как показано на рис. 1. В случае  $H_1$ -моды решетка имеет вид гребенки, у которой ширина канавки  $d \geq \lambda_{kp}$ . Для обоих типов волн форма дифракционных решеток не ограничивается только отражательными решетками в виде гребенок. Это могут быть решетки печатного типа, выполненные в виде периодических лент на слое фольгированного диэлектрика или в виде периодических стержней, канавок и других рассеивателей. Совместная работа системы линия поверхности волн — дифракционная решетка возможна только при внесении последней в поле поверхности волны и размещении ее на некотором расстоянии  $\Delta$  (рис. 1). Преобразование поверхности волны в объемную в такой системе выполняется при наличии фазового синхронизма между медленной поверхностью волны диэлектрического волновода, имеющего постоянную распространения  $\gamma$  в направлении  $oz$  (рис. 1) и быстрой волной с постоянной распространения  $k$ , рассеянной дифракционной решеткой с периодом  $\ell$ . Пространственная ориентация рассеянного решеткой поля определяется углом  $\theta_n$  между волновым вектором  $\vec{k}$  и осью  $oz$ . Волновой вектор  $\vec{k}$  ориентирован строго в плоскости  $xoz$ .

$$k\ell \cos \theta_n - \gamma \ell = 2\pi n. \quad (1)$$

Условие излучения (1) справедливо только для отрицательных дифракционных гармоник. Для однолучевого режима работы антенны дифракционного излучения величина  $n$  выбирается равной  $n = -1$ . При выполнении условия отсутствия гармоники с  $n = -2$ , когда  $\ell < 2\lambda/(U+1)$ , суммарное поле от отдельных рассеивателей будет складываться в фазе в направлении только одного угла, а именно угла  $\theta_{-1}$ :

$$\theta_{-1} = \arccos(U - \lambda/\ell). \quad (2)$$

Таким образом, линейные антенны дифракционного излучения отличаются от аналогичных антенн других типов наличием регулируемого разделительного пространства  $\Delta$  между волноводом 1 и дифракционной решеткой 2. Минимальная величина параметра  $\Delta$  выбирается такой, чтобы основная мода диэлектрического волновода не претерпевала сильного возмущения дифракционной решеткой, а фазовые искажения на апертуре антенны имели приемлемую величину. Диапазон перестройки параметра  $\Delta$  должен обеспечить возможность задания амплитудного распределения на апертуре антенны путем его изменения вдоль координаты  $z$ . Практически установлено, что достижимы все стандартные гладкие амплитудные распределения: косинусное, косинус квадратное, гауссово и др. При этом уровень боковых лепестков (УБЛ) соответствует расчетному значению или близок к нему. Излучающая система диэлектрический волновод — решетка относится к группе электродинамических структур, свойства которых крайне сложно рассчитывать с помощью строгих методов теории дифракции. Прямые численные методы не обеспечивают пока приемлемой точности при апертурах 100 длин волн и более. В связи с этим для расчета выходных характеристик антенны дифракционного излучения применен энергетический метод, используемый для расчета систем с последовательным возбуждением излучающих элементов. В качестве исходных данных используются экспериментально полученные характеристики системы волновод — решетка ограниченной длины, как правило, в 5–10 раз короче апертуры предполагаемой антенны. Тем самым обеспечивается максимальная точность измерений и приемлемые затраты на разработку всей антенны в целом. Такой подход полностью учитывает взаимное влияние соседних излучающих элементов, в данном случае канавок дифракционной решетки. Необходимой частью линейной антенной решетки является устройство возбуждения, представляющее собой рупорный переход от полого металлического волновода к диэлектрическому. Типичные потери в рупорном переходе на излучение составляют приблизительно 0.1—0.2 дБ.

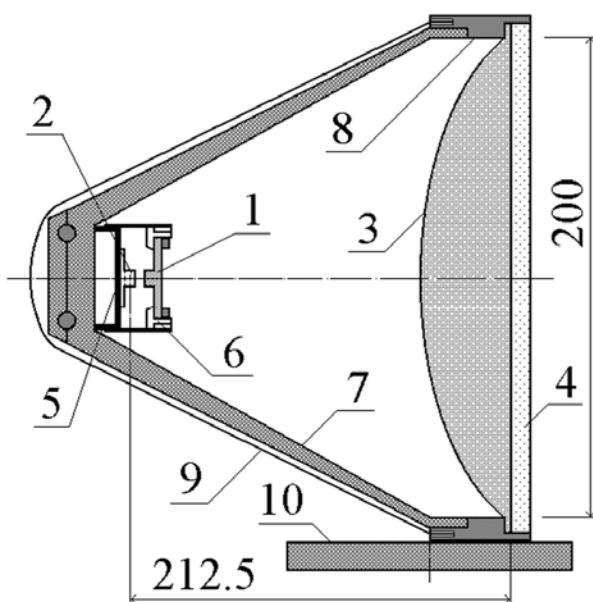
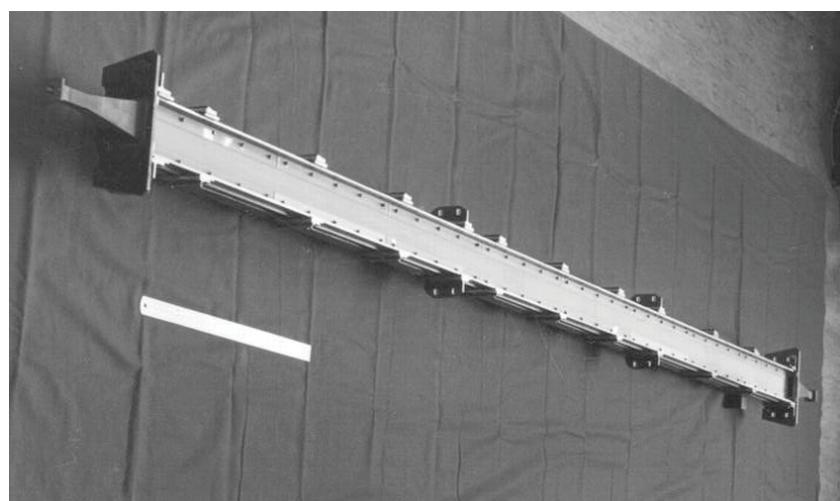


Рис. 2. Поперечное сечение линейной антенны (схема)

Рассмотрим реальное исполнение линейной антенны, обеспечивающей диаграмму направленности (ДН)  $0.27^\circ \times 2.4^\circ$  на рабочей частоте 36 ГГц. Конструкция такой протяженной антенны дифракционного излучения включает линейный диэлектрический волновод 1 (рис. 2) в виде гребня с диэлектрической подложкой (ГДВ) для закрепления его в корпусе 6 и дифракционную решетку 2. Открытая линия передачи в виде ГДВ обладает углочастотной чувствительностью (дисперсией), которая составляет величину порядка  $1^\circ$  на процент частоты.

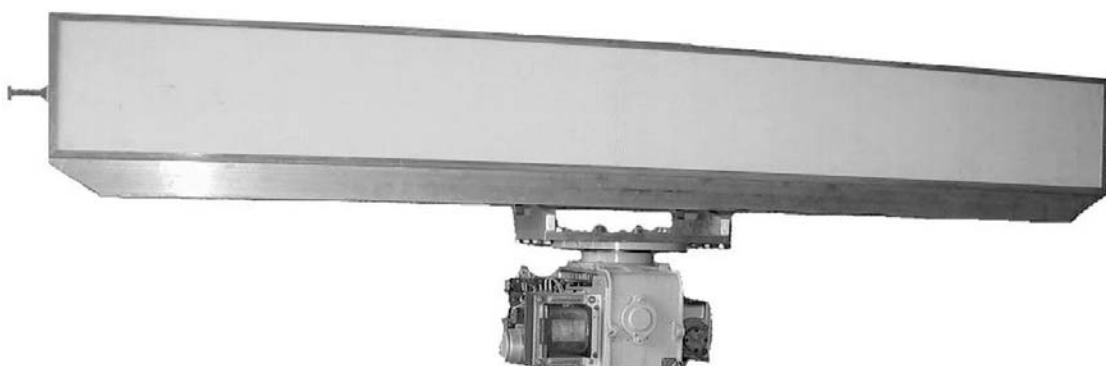
Необходимая ширина дифракционной решетки не превышает нескольких длин волн, и ее типичная величина составляет  $0.5\lambda$ . Поскольку это дифракционная решетка отражательного типа, то поле излучения проходит через боковую поверхность диэлектрического волновода 1 и падает на цилиндрическую линзу 3, формирующую ДН в угломестной плоскости. Обтекатель 4 вместе с рамкой 8 и корпусом 9 защищает волноведущие элементы и решетку от пыли, дождя и пр. Рамочные элементы 5, 7 обеспечивают прямолинейность дифракционной решетки.



*Рис. 3. Линейный облучатель*

В полном соответствии со схемой на рис. 2 была создана антenna радиолокатора обзора летного поля [21,22]. Ее линейный облучатель изображен на рис. 3, а сама антenna с полноповоротным приводом и прокладкой 10 показана на рис. 4. Антenna имеет следующие параметры:

- рабочая частота 36 ГГц;
- апертура  $2000 \times 200$  мм;
- поляризация линейная горизонтальная;
- ширина ДН в азимутальной плоскости  $0.27^\circ$ ;
- ширина ДН в угломестной плоскости  $2.4^\circ$ ;
- УБЛ (азимут / угол места)  $-21.6$  дБ /  $-20.5$  дБ;
- коэффициент усиления 45 дБ.



*Рис. 4. Антenna радиолокатора обзора летного поля*

ГДВ линейного облучателя антенны изготовлен из фторопласта ( $\epsilon = 2.05$ ) и обеспечивает коэффициент замедления  $U = 1.24$ . Величина  $U$  выбиралась из условия минимальных потерь в волноводе в одномодовом режиме. Возбужденная основная мода  $E$ -типа рассеивается периодической структурой 2. В результате процесса дифракции формируется основной пучок объемной волны горизонтальной поляризации, распространяющийся под углом  $\theta_{-1} = 95.5^\circ$  (2) к волновому вектору диэлектрического волновода. Коэффициент потерь ГДВ составляет 0.85 дБ/м. При половинной длине диэлектрического волновода и с учетом добавочных потерь в рупорном устройстве возбуждения, суммарные потери в волноведущих элементах не превышают 1 дБ на апертуре антенны 2000 мм. Допустимая пиковая мощность для диэлектрического волновода выше, чем для полого металлического волновода с поперечным сечением  $7.2 \times 3.4$  мм, уровень допустимой средней мощности составляет 200 Вт и не является критическим для большинства современных РЛС. Линейный облучатель (рис. 3) является законченным изделием и может использоваться как независимая антenna, например, в радиолокаторе бокового обзора. В этой области имеет место положительный опыт. Антенный блок из двух линейных антенн дифракционного излучения с ортогональными поляризациями на борту самолета лаборатории Ил-18, в составе импульсной РЛС, работавшей на длине волны 8 мм, показал высокие характеристики и надежность. При апертуре антенн по 1500 мм были сформированы ДН по  $0.35^\circ$  в азимутальной плоскости. Ширины ДН обеих линейных антенн блока в угломестной плоскости составляли по  $40^\circ$ . Дифракционные решетки были выполнены в виде открытых концов полых металлических волноводов, закороченных с одной стороны.

### Линейные сканирующие антенные дифракционного излучения

Линейные сканирующие антенные состоят из линейного диэлектрического волновода 1 и барабана с решетками, отличающимися периодами (рис. 5). Дифракционные решетки 2 устанавливаются на боковой поверхности металлического барабана 3, соединенного с механическим приводом. При вращении барабана решетки с разными периодами поочередно взаимодействуют с полем ГДВ и в соответствии с выражением (2) происходит качание ДН в секторе выбранных углов  $\theta_{-1}$ . Такие конструкции имеют высокую эффективность, т.к. при сканировании отсутствует трение между волноводом и решетками. Построенные по этой схеме антенные имеют асимметрический сектор сканирования, лежащий обычно в диапазоне  $92^\circ \leq \theta_{-1} \leq 122^\circ$  (рис. 1).

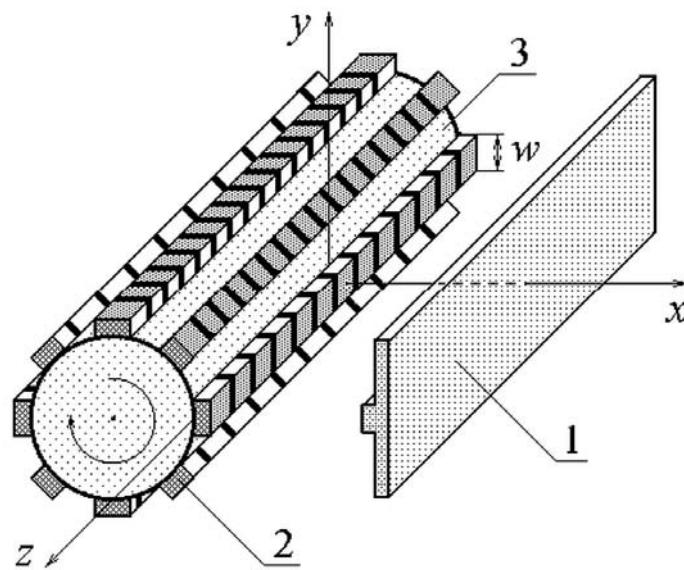
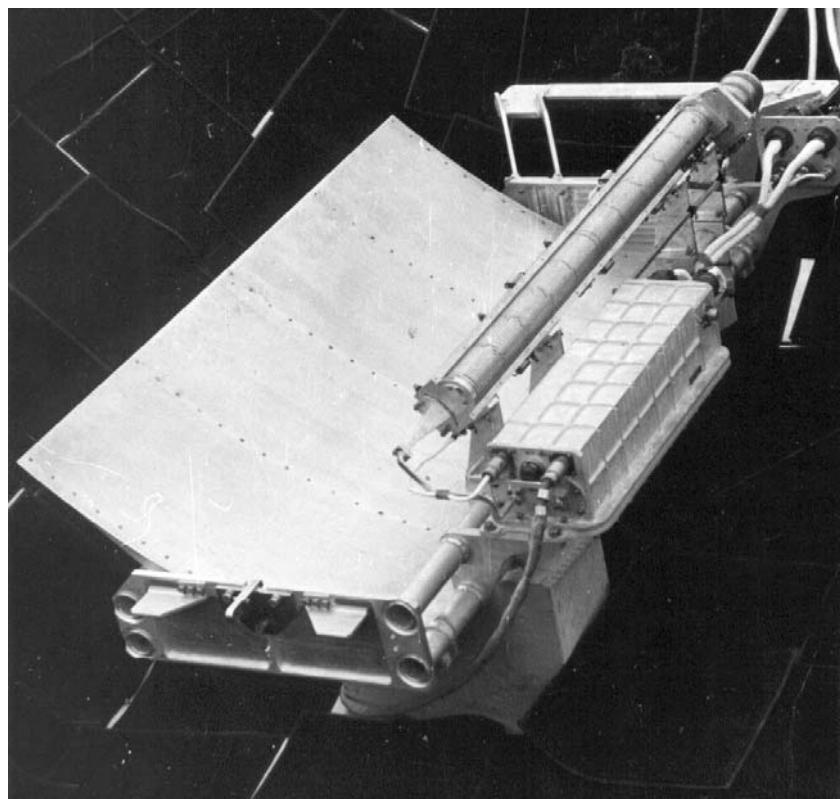


Рис. 5. Сканирующая антenna со сменными решетками (схема)

Линейные сканирующие антенные могут использоваться в виде облучателей цилиндрических линз или параболических отражателей. Например, антenna с параболическим отражателем, раз-

работанная для спутников серии “Космос-1602” и “Січ-1”, показана на рис. 6. Радиометрический комплекс с этой антенной описан в работе [23]. Гребневый диэлектрический волновод работает на основной mode  $H$ -типа. Антенна имеет следующие характеристики:

- рабочая частота 36.6 ГГц;
- ширина рабочей полосы частот 300 МГц;
- апертура  $900 \times 560$  мм;
- поляризация линейная горизонтальная;
- ширина ДН в азимутальной плоскости  $1.0^\circ$ ;
- ширина ДН в угломестной плоскости  $0.55^\circ$ ;
- УБЛ  $-13$  дБ;
- сектор сканирования в плоскости угла места  $30^\circ$ ;
- шаг сканирования  $1^\circ$ ;
- частота сканирования 1 Гц ( $30^\circ/\text{сек}$ );
- потери  $0.7$  дБ.



*Рис. 6. Сканирующая антenna 8 мм радиометра*



*Рис. 7. Сканирующие антенны автомобильных локаторов на частоту 76.5 ГГц*

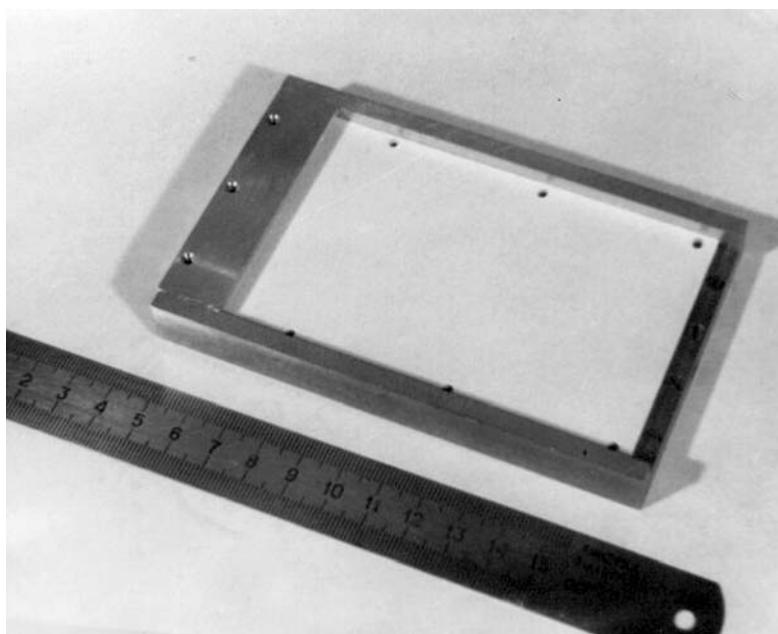
Другой областью применения линейных сканирующих антенн являются автомобильные радары [24]. Автомобильный радар предупреждения столкновений транспортных средств становится необходимой принадлежностью современного автомобиля. Он призван обеспечить водителю безопасную езду в условиях плохой видимости и напряженного дорожного движения. Датчики предупреждения столкновений должны обеспечивать сканирование в широком секторе углов с высокой скоростью и разрешением, отвечать требованиям технологичности. Антенны с электромеханическим сканированием полностью удовлетворяют всем этим требованиям. Два образца антенн, разработанных для радара на частоту 76.5 ГГц, представлены на рис. 7. Они отличаются количеством дифракционных решеток на барабане. Образцы № 1 и № 4 имеют, соответственно, 8 и 40 дифракционных решеток. Режим сканирования для образца № 1 является шаговым, а для образца № 4 — непрерывным. Непрерывное сканирование в образце № 4 образовано за счет пересечения смежных ДН от двух решеток и их стыка на уровне -0.3 дБ. Ширина решеток в образце № 1 составляет 12 мм и их ДН имеют ширину по  $2^\circ$  с пространственным разнесением на  $2^\circ$ , что обеспечивает низкую интерференцию между их полями и обеспечению УБЛ на уровне -24 дБ. Образец антенны № 4 имеет следующие параметры:

- рабочая частота 76.5 ГГц;
- апертура  $240 \times 16$  мм;
- поляризация линейная горизонтальная;
- ширина ДН в азимутальной плоскости  $1^\circ$ ;
- ширина ДН в угломестной плоскости  $18^\circ$ ;
- УБЛ (азимут / угол места) -20 дБ / -18 дБ;
- сектор сканирования в азимутальной плоскости  $30^\circ$ ;
- шаг сканирования  $0.75^\circ$ ;
- частота сканирования 25 Гц ( $750^\circ/\text{сек}$ );
- режим сканирования непрерывный;
- коэффициент усиления 31.6 дБ.

Следует отметить, что частоту сканирования для антенн с барабаном можно значительно увеличить, вплоть до 200 Гц.

### Планарные антенны дифракционного излучения

Планарные антенны дифракционного излучения состоят из ПДВ и соответствующей дифракционной решетки (рис. 8, 9). Суммарная толщина электродинамической структуры не превышает двух длин волн, но толщина антенны, включая обтекатель, составляет примерно пять длин волн при больших апертурах (рис. 9).

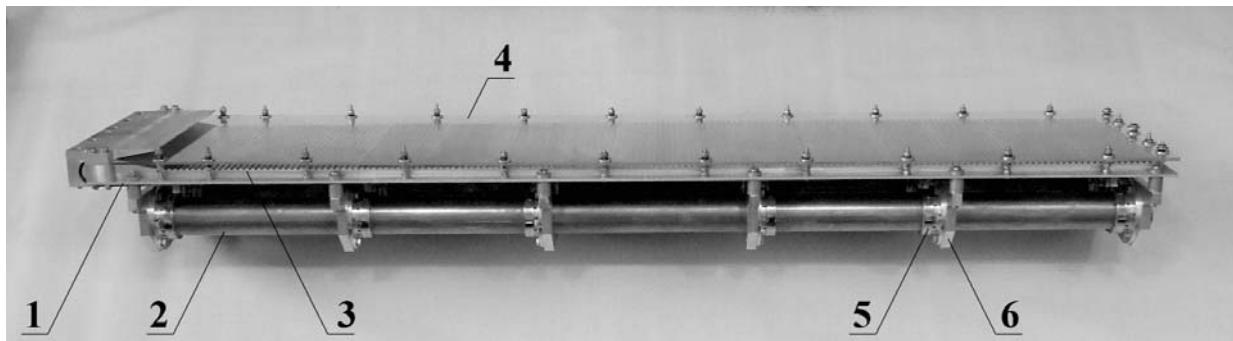


*Рис. 8. Планарная многоцелевая антенна*

Планарная многоцелевая антenna, показанная на рис. 8 является типичной конструкцией. Она может использоваться в различных системах радионаблюдения, например, детекторах движения, передвижных РЛС и имеет следующие параметры:

- рабочая частота 60 ГГц;
- апертура  $100 \times 65$  мм;
- поляризация линейная горизонтальная;
- ширина ДН в азимутальной плоскости  $3^\circ$ ;
- ширина ДН в угломестной плоскости  $5.3^\circ$ ;
- УБЛ (азимут / угол места)  $-15$  дБ /  $-23$  дБ;
- коэффициент усиления 31.8 дБ.

Планарная антenna мм диапазона с низким УБЛ [25] приведена на рис. 9.



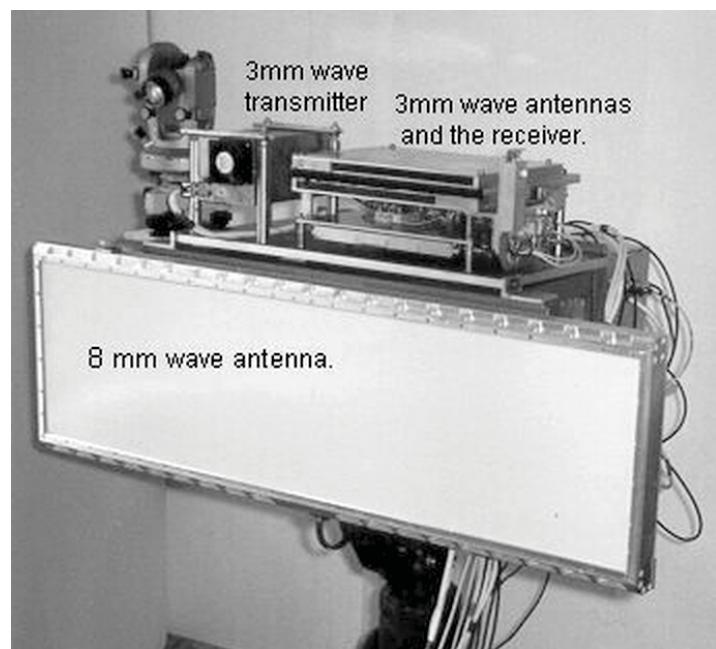
*Рис. 9. Планарная антenna дифракционного излучения с низким УБЛ*

Антenna показана без герметизирующего кожуха. Основание 1 антены предназначено для крепления на нем отдельных элементов антены: пяти дифракционных решеток 3, ПДВ 4, рупорно-линзового узла возбуждения с выходным волноводом и 180-градусного разворота. Рама жесткости 2 собрана на базе двух труб из сплава Д16 диаметром 40 мм и длиной 1050 мм. С помощью фланцев 5 к трубам крепятся нервюры 6, а к ним — основание 1. Антenna вместе с герметизирующим кожухом представляет собой автономную конструкцию и может устанавливаться на любую ровную поверхность с отклонением от плоскостности не более  $\pm 0,1$  мм и крепиться к ней. Полная герметизация охватывает при этом только саму антенну без рамы жесткости, так как между ними установлен разделительный герметизирующий лист. Эта антenna имеет ниже приведенные характеристики:

- диапазон рабочих частот  $34$  ГГц  $\pm 0.5$  ГГц;
- апертура  $1000 \times 200$  мм;
- поляризация линейная горизонтальная;
- ширина ДН в азимутальной плоскости  $0.64^\circ$ ;
- ширина ДН в угломестной плоскости  $2.95^\circ$ ;
- УБЛ (азимут / угол места)  $-31.4$  дБ /  $-25$  дБ;
- коэффициент усиления 41.4 дБ.
- потери 1.3 дБ;
- выходной фланец  $24 \times 24$  мм под сечение  $7.2 \times 3.4$  мм.

Планарная антenna, показанная на рис. 10, имеет косекансную форму ДН.

Косекансная форма ДН на плоской поверхности реализована за счет переменной величины периода  $\ell$  вдоль апертуры [26]. Половина апертуры формирует узкую ДН с вырожденными лепестками при углах  $\theta_{-1}$ , близких к  $90^\circ$ . Оставшаяся часть апертуры формирует широкую диаграмму. Основной областью применения антенн с косекансной формой ДН являются бортовые РЛС бокового обзора. По сравнению с линейными антеннами они позволяют существенно снизить мощность передатчика, рационально распределив ее в секторе углов обзора, обеспечить равномерное облучение объектов на наклонной поверхности. На рис. 11 показана вертолетная РЛС бокового обзора поиска нефтяных загрязнений.



*Рис. 10. Планарная антенна с косекансной ДН*

Параметры планарной антенны с косекансной ДН вертолетного комплекса приведены ниже:

- рабочая частота 35.7÷37.0 ГГц;
- апертура  $1000 \times 210$  мм;
- поляризация линейная горизонтальная;
- ширина ДН в азимутальной плоскости  $0.5^\circ$ ;
- ширина ДН в угломестной плоскости  $43^\circ$ ;
- боковые лепестки (азимут) -21 дБ;
- коэффициент усиления 37.5 дБ;
- потери 1.2 дБ.



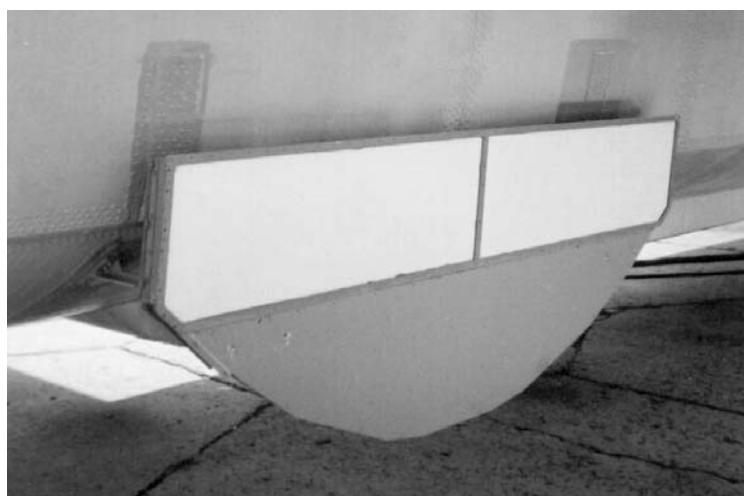
*Рис. 11. Вертолетный локатор бокового обзора*

Другая модель планарной антенны с косекансной формой ДН, установленная на борту само-

лета, показана на рис. 12. Самолетная антenna имеет следующие параметры:

- рабочая частота  $35.7 \div 37.0$  ГГц;
- апертура  $2000 \times 210$  мм;
- поляризация линейная горизонтальная;
- ширина ДН в азимутальной плоскости  $0.25^\circ$ ;
- ширина ДН в угломестной плоскости  $40^\circ$ ;
- боковые лепестки (азимут)  $-20$  дБ;
- коэффициент усиления  $40.5$  дБ;
- потери  $1.3$  дБ.

Следует отметить, что косекансные ДН этих антенн очень гладкие, что необходимо для качественного картографирования. Косекансная часть ДН выполняется очень точно и с заданным спадением. Обычно задается уровень спадания  $-9$  дБ. Типичное изображение сельскохозяйственной местности с оптическим качеством показано на рис. 13. Совершенно ясно, что величина потерь весьма критична для всех антенн. Антenna, показанная на рис. 12 с апертурой 2000 мм, имеет величину потерь всего лишь  $1.3$  дБ благодаря параболическому возбудителю ПДВ на основе двухплоскостного металлического волновода.



*Рис. 12. Планарная антenna на борту АН-30*



*Рис. 13. Изображение местности (8 мм локатор)*

## Планарные сканирующие антенны

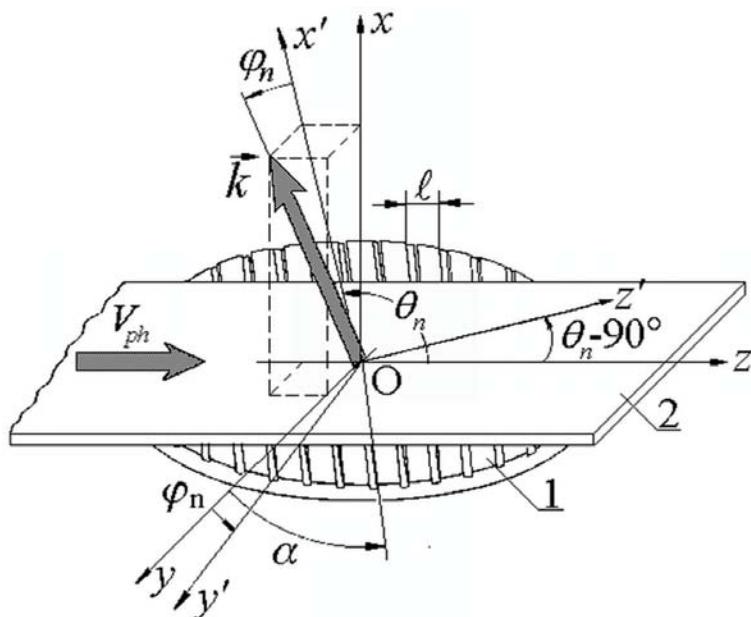
Электродинамическая схема планарной сканирующей антенны, приведена на рис. 14. В основе работы такого сканирующего излучателя лежит эффект преобразования волны ПДВ 2 на поворотной дифракционной решетке 1.

Величиной связи канавок решетки с собственным полем ПДВ обеспечивается требуемое амплитудно-фазовое распределение вдоль оси  $oz$  апертуры антенны. В ортогональной плоскости амплитудно-фазовое распределение задается возбудителем ПДВ. В качестве рассеивателей могут выступать отражательные гребенки, включая двумерно-периодические, решетки из брусков, ленточные или проволочные решетки.

Полученные теоретические и экспериментальные результаты [9—16] выявили основные физические механизмы процессов в такой системе. Высокий КПД преобразования поверхностной волны в объемную, присущий гребенкам, простота получения требуемого амплитудно-фазового распределения, малые потери, возможность без изменения ориентации излучателя управлять пространственным положением луча ДН, планарность конструкции позволяют создавать эффективные антенны мм диапазона. Рассеянное поле такого излучателя от отдельных рассеивателей складывается в фазе в тех направлениях, для которых выполняется условие

$$\ell \cdot (k \cos \theta_n \cos \varphi_n - \gamma) / \cos \alpha = 2\pi n, \quad (7)$$

где  $\ell$  и  $\alpha$  — период и угол поворота гребенки;  $\theta_n$  — угол между осью  $oz$  и проекцией волнового вектора  $\vec{k}$  излучающего поля на плоскость  $xoz$ ;  $\varphi_n$  — угол между направлением волнового вектора  $\vec{k}$  и его проекцией на плоскость  $xoz$ ;  $n = -1, -2, -3, \dots$  — номер излучающейся гармоники;  $k$  и  $\gamma$  — постоянные распространения в свободном пространстве и ПДВ. Практические потребности обычно ограничиваются использованием одного луча, поэтому выбирают  $n = -1$ .



**Рис. 14.** Электродинамическая схема сканирующей антенны

Угол  $\theta_n$  для поворотной гребенки [13] можно определить из выражений

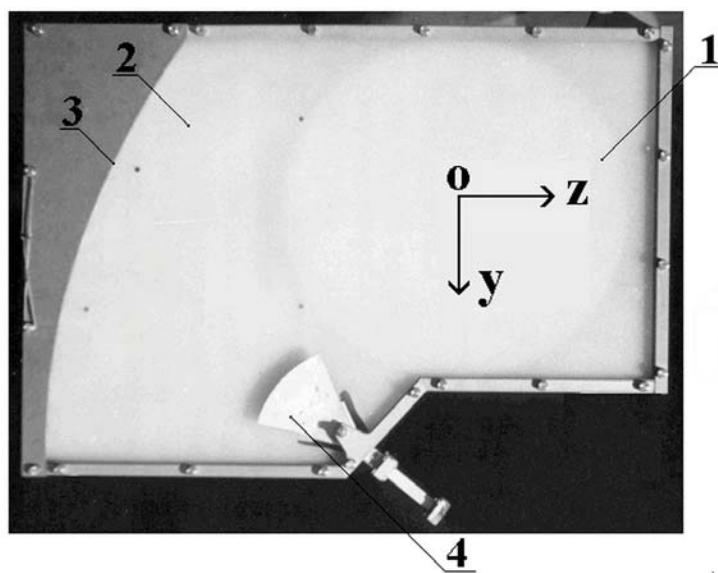
$$\cos \theta_n = \left( U + \frac{n}{\chi} \cos \alpha \right) / \sqrt{1 - \sin^2 \varphi_n}, \quad (8)$$

$$\sin \varphi_n = -\frac{n}{\chi} \sin \alpha, \quad (9)$$

где  $U = C/V_{ph}$  — относительное замедление волны в ПДВ,  $V_{ph}$  — фазовая скорость волн в ПДВ;  $C$  — скорость света;  $\chi = \ell/\lambda$ ,  $\lambda$  — длина волны.

В качестве примера реализации антенны дифракционного излучения с одномерно-периодической решеткой рассмотрим сканирующую антенну радиометра, приведенную в [12]. Внешний вид антенны показан на рис. 15. Рабочая апертура антенны (плоскость  $yoz$ ) ограничена диаметром отражательной решетки 1, равным 250 мм, 2 -ПДВ из полиэтилена (толщина 3.2 мм,  $U = 1.23$ ,  $\varepsilon = 2.25$ ,  $\operatorname{tg} \delta = 1.5 \cdot 10^{-3}$ ), 3 — параболическая образующая фазового корректора медленной волны ПДВ, 4 — рупорный переход от полого металлического волновода сечением  $7.2 \times 3.4$  мм к ПДВ. Отражательная решетка выполнена с периодом  $\ell = 6$  мм, глубиной канавок  $h = 1.6$  мм и шириной  $d = 2$  мм. Рупорно-параболический переход с его элементами 3,4 выполнен по прямой схеме, т.е. без применения  $180^\circ E$ -волноводного поворота, обеспечивающего компактность конструкции антенны. Антenna радиометра имеет следующие характеристики:

- рабочая частота 37 ГГц;
- ширина рабочей полосы частот  $> 300$  МГц;
- апертура  $\varnothing 250$  мм;
- поляризация линейная горизонтальная;
- ширина ДН в  $E$ -плоскости  $2.2^\circ$ ;
- ширина ДН в  $H$ -плоскости  $2.3^\circ$ ;
- УБЛ  $-24$  дБ;
- сектор сканирования по углу  $\varphi_{-1} \pm 30^\circ$ ;
- угол поворота решетки  $\alpha \pm 20^\circ$ ;
- частота сканирования 1 Гц ( $30^\circ/\text{сек}$ );
- КСВ  $\leq 1.25$ ;
- потери 1.3 дБ.



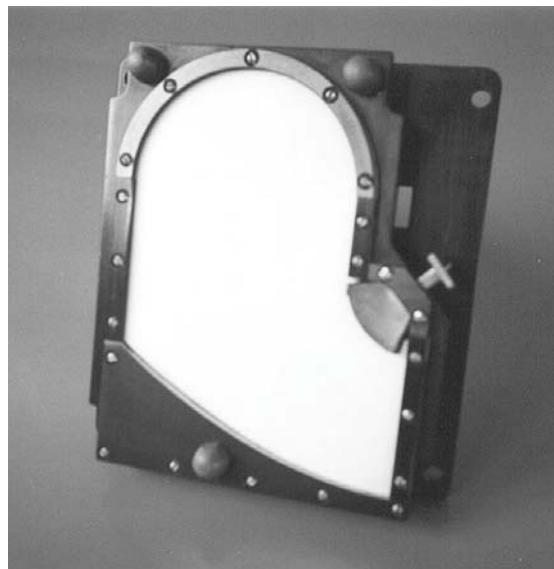
*Рис. 15. Сканирующая антenna самолетного 8 мм радиометра*

Рассмотренная электродинамическая схема антенны характеризуется КПД не менее 90 %, возможностью механической подстройки без изменения исходной установки антенны, работой в широком диапазоне частот с сохранением таких электродинамических характеристик, как ширина ДН, УБЛ, потери. Таким образом, планарные сканирующие антенны являются альтернативой антеннам со сменяемыми решетками. Модель сканирующей антенны, разработанной для автомобильного радара на частоту 76.5 ГГц, [27]. показана на рис. 16. Она имеет следующие

параметры:

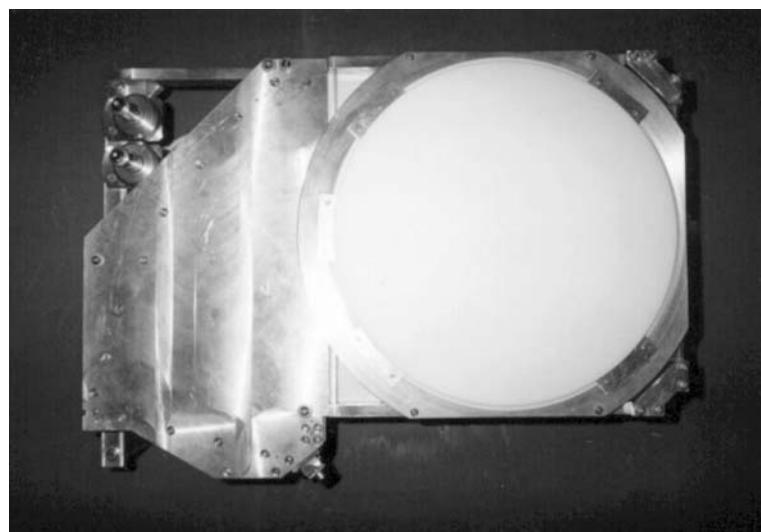
- рабочая частота 76.5 ГГц;
- апертура  $\varnothing$  120 мм;
- поляризация линейная;
- ширина ДН в азимутальной плоскости  $2.2^\circ$ ;
- ширина в угломестной плоскости  $2.5^\circ$ ;
- боковые лепестки (азимут / угол места) -22 дБ / -18 дБ;
- сектор сканирования  $\pm 60^\circ$ ;
- коэффициент усиления 37 дБ.

Планарная антenna с вращающейся дифракционной решеткой обеспечивает широкий и симметричный сектор сканирования. Частота сканирования может достигать 100 Гц при частоте вращения диска 50 Гц.



*Рис. 16. Модель сканирующей антенны (частота 76.5 ГГц)*

На рис. 17 приведена сканирующая антenna многоканального радиометра и предназначена для работы в полосе частот от 86 ГГц до 100 ГГц [28]. За счет углочастотной чувствительности обеспечивается формирование многолучевой диаграммы направленности в плоскости  $x'oz'$  (рис. 14).

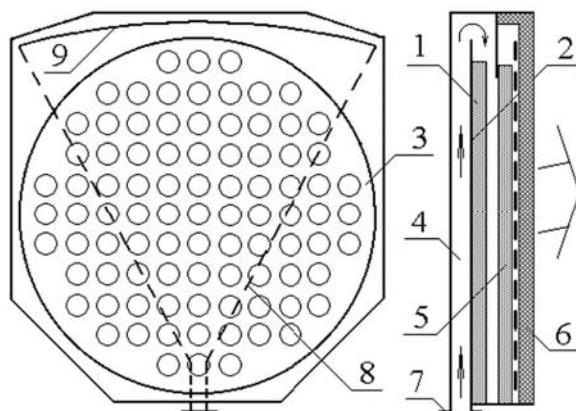


*Рис. 17. Сканирующая антenna с фокусировкой луча*

Число формируемых лучей в антенне определяется количеством примененных фильтров промежуточной частоты приемного устройства и может составлять 32. Таким образом, в горизонтальной плоскости в полосе частот 14 ГГц за счет дисперсии антенны обеспечивается ширина площадки наблюдения 1.28 м на расстоянии 5 м. Высота площадки наблюдения составляет 2.5 м и реализуется электромеханическим сканированием путем поворота диска с дифракционной решеткой. В результате, в горизонтальной плоскости в секторе  $\pm 14^\circ$  одновременно может сканировать 32 луча. Для сужения пучка в точке наблюдения используется диэлектрическая линза  $\varnothing 280$  мм. Основные характеристики антенны приведены ниже

- полоса рабочих частот 86÷100 ГГц;
- апертура  $\varnothing 280$  мм;
- поляризация линейная горизонтальная
- фокусное расстояние 3.5÷5 м;
- ширина пучка в сужении  $\varnothing 70$  мм;
- сектор сканирования за счет дисперсии ПДВ (азимут)  $14.6^\circ$ ;
- сектор сканирования за счет вращения решетки (угол места)  $\pm 14^\circ$ ;
- потери 1.4 дБ.

Главными свойствами этой антенны являются постоянство энергетических характеристики электродинамической структуры ПДВ — дифракционная решетка во всей рабочей полосе 14 ГГц и фокусировка пучка с качественным разрешением на 3.5 м.



*Рис. 18. Схема планарной антенны сантиметрового диапазона*

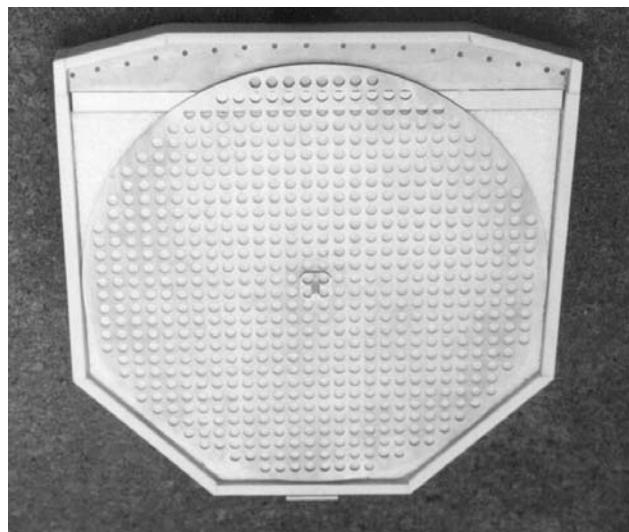
Вариант реализации планарной сканирующей антенны в см диапазоне приведен на рис. 18, а соответствующая антенная модель показана на рис. 19. Более низкие частоты требуют компактной конструкции. В этой схеме ПДВ выполнен на металлической подложке, благодаря чему его толщина уменьшилась в два раза.

Рупорно-параболическое устройство возбуждения установлено под излучающей структурой, металлическая подложка диэлектрического волновода одновременно используется в волноводной части устройства возбуждения. Двумерно-периодическая дифракционная решетка [16] выполнена из отверстий в металлическом диске, имеет низкий вес и является легкой в изготовлении. Антенна работает на частоте 12.5 ГГц с симметричной ДН  $3.3^\circ \times 3.3^\circ$ . В конструкции заложена возможность качания ДН антенны в диапазоне  $\pm 30^\circ$ . Первоначально эта модель была разработана для спутниковой РЛС высокого разрешения с синтезированной апертурой. После некоторых модификаций ее можно использовать в режиме сканирования в вертолетной посадочной РЛС, в системе морской швартовки и др.

### Гибридные печатные антенны

Антенны дифракционного излучения с отражательными дифракционными решетками в виде гребенок являются идеальными для ограниченного или индивидуального производства. Массовое производство требует более дешевой элементной базы. Хорошей альтернативой явля-

ется дифракционная решетка на основе фольгированного диэлектрика. Модель антенны с ленточной дифракционной решеткой на основе простого фольгированного стеклотекстолита и ПДВ из фторопласта показана на рис. 20.



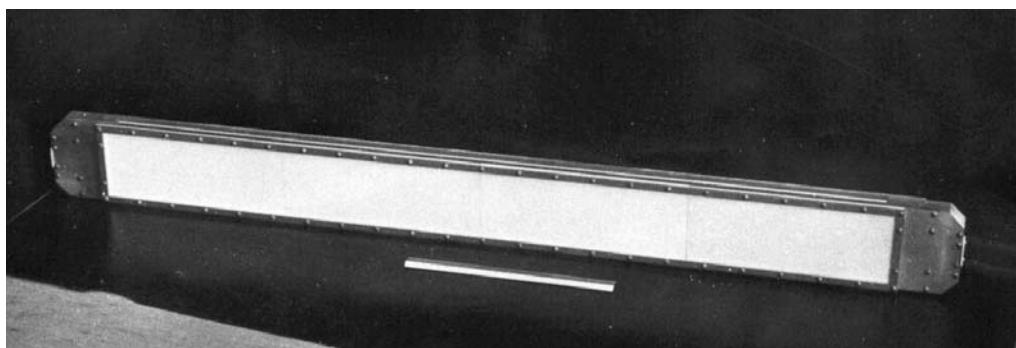
*Рис. 19. Модель антенны с установкой луча (частота 12.5 ГГц)*

Антенна предназначена для управления технологическим процессом и имеет следующие параметры:

- рабочая частота 37.5 ГГц;
- апертура  $1000 \times 100$  мм;
- поляризация линейная горизонтальная;
- положение пучка  $45^\circ$  к нормали к апертуре;
- потери 2.7 дБ.

Потери непосредственно в дифракционной решетке из стеклотекстолита составляют 1.5 дБ, остальное — потери в диэлектрическом волноводе из фторопласта. При выполнении ленточной решетки на фольгированном фторопласте величина потерь составит не более 0.2 дБ, и суммарные потери составят 1.7 дБ.

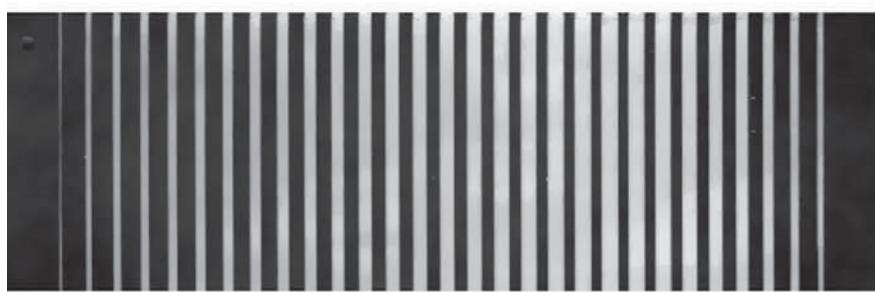
Если подложку ленточной дифракционной решетки (рис. 20) использовать в качестве диэлектрического волновода, то такая антенна дифракционного излучения становится близкой по своей архитектуре к волноводно-щелевой антенне. Для снижения общих потерь рекомендуется использовать моду  $H_1$  двухплоскостного металлического волновода с диэлектрическим заполнением. По такой схеме была разработана трехлучевая приемо-передающая гибридная антенна для работы в составе автомобильного радиолокатора предупреждения столкновений [29]. В целом антенна представляет собой сборку из четырех печатных антенн. Внешний вид апертуры одной приемной антенны, выполненной на фольгированном фторопласте, приведен на рис. 21.



*Рис. 20. Модель гибридной печатной антенны*

Передающая антenna имеет ДН, ширина которой в горизонтальной плоскости в три раза превышает ДН трех приемных антенн. Ширины ДН всех антенн сборки в вертикальной плоскости одинаковые. Ниже приведены основные характеристики такой сборки антенн:

- рабочая частота  $76.5 \pm 0.5$  ГГц;
- поляризация линейная горизонтальная;
- ширина ДН каждой из антенн в вертикальной плоскости  $3.5^\circ$ ;
- УБЛ каждой из антенн в вертикальной плоскости  $-20$  дБ;
- УБЛ каждой из антенн в горизонтальной плоскости  $-18$  дБ;
- ширина ДН передающей антенны в горизонтальной плоскости  $9^\circ$ ;
- коэффициент усиления передающей антенны 29 дБ;
- ширины ДН каждой из приемных антенн в горизонтальной плоскости  $3^\circ$ ;
- уровень пересечения смежных приемных ДН  $-3$  дБ;
- коэффициент усиления каждой из приемных антенн 32 дБ;
- габариты объединенной конструкции  $150 \times 97 \times 17$  мм.



*Рис. 21. Фрагмент печатной многолучевой антенны*

Эта разработка антенн может использоваться или с одним коммутатором приемных лучей или с тремя отдельными приемниками. Последний вариант дает значительный выигрыш в потенциале радиолокационной системы. Разработка всех четырех антенн прошла стадию макетирования и экспериментальных исследований. Необходимое амплитудное распределение для достижения требуемых УБЛ на апертуре достигнуто благодаря изменяемой ширине щели ленточной решетки при практически постоянном периоде (рис. 21).

### Заключение

В последнее время все антенны дифракционного излучения рассчитываются после моделирования предполагаемой излучающей структуры. Первичные энергетические данные получаются экспериментально или посредством моделирования электродинамической структуры. Теоретические отделы ИРЭ НАН Украины достигли большого прогресса в этой области. Можно реализовать все необходимые амплитудные распределения на апертуре. На настоящий момент самый низкий, экспериментально достигнутый УБЛ в антенах дифракционного излучения составляет  $-32$  дБ. Антенны дифракционного излучения становятся законным инструментом в современных радиосистемах.

### Список литературы

1. Шестopalов В. П., Литвиненко Л. Н., Масалов С. А., Сологуб В. Г. Дифракция волн на решетках // Харьков: Изд-во Харьков. ун-та, 1973. 287 с
2. Шестopalов В. П. Дифракционная электроника // Харьков: Изд-во Харьковского университета, 1976. 231 с.
3. Шестopalов В. П., Сиренко Ю. К. Динамическая теория решеток / Киев: Наукова думка, 1989. 214 с.
4. Взятышев В. Ф. Диэлектрические волноводы. М.: Сов. Радио, 1970. 215 с.
5. Андренко С. Д., Девятков Н. Д., Шестopalов В. П. Приемо-передающая антenna миллиметрового диапазона с высоким коэффициентом связности // Радиотехника и электроника. 1978. Т. 23. № 5. С. 918—921.
6. Андренко С. Д., Девятков Н. Д., Шестopalов В. П. Антенные решетки миллиметрового диапазона поля // Докл. АН СССР. 1978. Т. 240. № 6. С. 1340—1343.

7. Андренко С.Д., Провалов С.А., Шестопалов В.П. Экспериментальное исследование ближних электромагнитных полей миллиметрового диапазона // Радиотехника и электроника, 1980. Т. 25. № 2. С. 225—231.
8. Шестопалов В.П. Дифракция электромагнитных волн на скошенной решетке // Журн. техн. физики, 1967. Т. 37. № 8. С. 1447—1451.
9. Андренко С.Д., Сидоренко Ю.Б. Дифракция неоднородных волн на скошенной решетке // В кн.: III Всесоюзный симпозиум по миллиметровым и субмиллиметровым волнам (Горький. С.нт. 1980 г.). Тез. докл. Горький. 1980. С. 88—89.
10. Шестопалов В.П. Физические основы миллиметровой и субмиллиметровой техники. Т. 1. Открытые структуры // Киев: Наукова думка, 1985. 213 с.
11. Андренко С.Д., Сидоренко Ю.Б., Евдокимов А.П., Провалов С.А. О рассеянии поверхностных волн скошенной решеткой // В сб.: Физика и техника миллиметровых и субмиллиметровых волн / Киев. 1983. С. 149—154.
12. Андренко С.Д., Евдокимов А.П., Сидоренко Ю.Б. Сканирующая антенна миллиметрового диапазона // В сб.: Распространение и дифракция радиоволн в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах. Киев, 1984. С. 208—212.
13. Евдокимов А.П. Преобразование неоднородных поверхностных волн скошенными экранами // Докл. АН УССР. Сер. А. 1984. № 3. С. 48—52.
14. Евдокимов А.П., Крыжановский В.В., Провалов С.А. Современное состояние проблемы сканирование лучом ДН в антенных радиометрических комплексов мм диапазона // В сб.: Радиофизические методы и средства для исследования окружающей среды в мм диапазоне. Киев: Наук. думка, 1988. С. 160—166.
15. Евдокимов А.П. Резонансные явления при рассеянии поверхностных волн скошенными экранами // Доклады АН УССР. 1985. № 10. Сер. А. С. 46—49.
16. Евдокимов А.П., Сергиенко И.А. Рассеяние поверхностных волн двумерно-периодическими структурами // Харьков, 1990. 25 с. (Препр./АН УССР. Ин-т радиофизики и электрон. № 90—10).
17. Yevdokymov, A. P., Kryzhanovskiy, V. V. Optimization of the Radiating System "Dielectric Waveguide-Grating" for an Automobile Radar Scanning Antenna // Telecommunications and Radio Engineering, 2002. Vol. 57. No. 10, 11. P. 66—73
18. Евдокимов А.П., Крыжановский В.В. Дифракционные явления в антенных вытекающих волнах // Антенны, 2003. № 3—4. С. 70—71.
19. Евдокимов А.П., Крыжановский В.В. Новое направление в технике антенных решеток // Известия вузов. Радиоэлектроника. 1996. Т. 39. № 9. С. 54—61.
20. Yevdokymov, A. P., Kryzhanovskiy, V. V. Diffraction Radiation Antennas for SHF and EHF Radiosystems // Proceedings of the 6th International Conference on Antenna Theory and Techniques, Sevastopol, Ukraine, 17—21 Sept., 2007. P. 59—64.
21. Евдокимов А.П., Комяк В.А., Мележик П.Н. и др. Когерентный радиолокатор миллиметрового диапазона для обзора летного поля // Прикладная радиоэлектроника, 2003. Т. 1. № 1. С. 10—17.
22. Евдокимов А.П., Крыжановский В.В. Антенна радиолокатора 8-миллиметрового диапазона обзора летного поля // Электромагнитные волны и электронные системы, 2008. Т. 13. № 6. С. 46—52.
23. Драновский В.И., Дюняшев В.В., Евдокимов А.П., Крыжановский В.В. и др. Комплекс радиофизической аппаратуры ИСЗ «Січ-1» // Космическая наука и технология. 1998. Т. 4. № 2, 3. С. 12—20.
24. Евдокимов А.П., Крыжановский В.В. Сканирующие антенны радаров миллиметровых волн для предупреждения столкновений транспортных средств // Успехи современной радиоэлектроники. 2006. № 4. С. 70—79.
25. Евдокимов А.П., Крыжановский В.В., Сиренко Ю.К. Планарная антенна дифракционного излучения КВЧ диапазона // Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. Т. 16. № 6. С. 53—61.
26. Евдокимов А.П., Крыжановский В.В. Плоские антенные решетки с косекансной формой диаграммы направленности 8-миллиметрового диапазона волн // Электромагнитные волны и электронные системы, 2003. 8. № 10. С. 52—58.
27. Yevdokymov, A. P., and Kryzhanovskiy, V. V. 2004. 'Cheap Scanning Antennas for Automobile Radars: State of the Art and Promising Models' // Proc. 4th Intl. Symp. MSMW'04, Kharkov. P. 668—670.
28. Евдокимов А.П., Крыжановский В.В. Плоская антenna решетка с комбинированным способом сканирования лучом // Электромагнитные волны и электронные системы, 2005. Т. 10. № 1—2. С. 52—56.
29. Yevdokymov, A. P., Kryzhanovskiy, V. V., Melezik, P. N., and Poedinchuk, A. Ye. A Multibeam Hybrid Printed Antenna Based on a Strip Periodic Structure // Proc. 3rd Intl. Conf. On Antenna Theory and Techniques, Sevastopol. 1999. P. 368—370.

*Поступила 30 июля 2012 г.*

# DIFFRACTION RADIATION ANTENNAS

A. P. YEVDOKYMOV

The paper is concerned with practical realization of new class of antennas, namely, the diffraction radiation antennas.

The diffraction radiation phenomenon being the result of inhomogeneous plane wave scattering by periodic and quasi-periodic structures, have been studied at the Institute of Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine (IRE NASU) since 1970<sup>th</sup>. The theoretical studies conducted in this area under the direction of Academician V. P. Shestopalov have shown that the energy of inhomogeneous plane waves can be transformed efficiently into the energy of a bulk scattered wave. The further investigations with various sources of slow surface waves in the form of dielectric waveguides and with reflecting diffraction gratings have amplified a physical picture of the diffraction radiation phenomenon. The idea of scanning by radiator's beam through rotation of the diffraction grating interacting with a surface wave of a planar dielectric waveguide turned out to be highly profitable. The subsequent experiments confirmed this possibility and brought into being the planar scanning diffraction radiation antenna for 8-millimeter radiometer. This antenna was intended for remote sensors of the ice prospecting airplanes and helicopters for creating a united data acquisition system relevant to ice and hydrometeorological conditions in the Arctic.

Beginning in 1980, in the IRE NASU, in the course of fundamental studies of the electrodynamic system 'dielectric waveguide — diffraction grating', the resonant ranges were determined, the grating parameters were optimized, the characteristic properties of surface wave scattering by two-dimensionally periodic gratings and a series of diffraction phenomena were investigated. At the same time, investigations aimed at creating both novel transmission lines for surface waves and novel diffraction gratings were conducted. All above mentioned provided a means for elaborating tens of high quality diffraction radiation antennas, most of which were successfully exploited as parts of aircraft, space and ground-based radars and radiometric systems. Compared to slotted-guide antennas, diffraction radiation antennas have greater manufacturability; as compared to microstrip antennas, they have lower loss. A number of engineering solutions ensured high reliability, vibration resistance, and wide operating temperature range of diffraction radiation antennas.

In the present paper, the most successful diffraction radiation antenna designs for mm and cm ranges have been considered. Among them are linear antenna of a airfield-scanning radar operating at 36 GHz, 8-mm radiometer scanning antenna designed for the satellites 'Kosmos-1602' and 'Sich-1', scanning antennas for automobile radars operating at the frequency 76.5 GHz, planar multipurpose millimeter antenna, planar diffraction radiation antenna with low side-lobe level operating in the range  $34\pm0.5$  GHz, planar cosecant 8-mm antennas for helicopter and airborne side-looking radars, 3-mm wideband scanning antenna with beam focusing, planar antenna with beam setting to 12.5 GHz, hybrid printed antenna, etc.