

ВСЕ, ЧТО СЛЕДУЕТ ЗНАТЬ О ВОЛНОВОДНЫХ АНТЕННАХ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Волноводные антенны используются в радарх, двухточечной связи и многих других приложениях. Кроме того, они применяются в испытательной аппаратуре для определения характеристик ряда систем, работающих в диапазоне миллиметровых волн. Хотя множество статей, книг и журнальных публикаций посвящено теории, описывающей работу этих антенн, мы предлагаем обобщенную и доступную для понимания информацию, которая полезна при выборе апертурных антенн для самых разных приложений.¹

ВВЕДЕНИЕ

В недалеком прошлом широкий спектр миллиметровых волн использовался крайне ограниченно. Его основными пользователями были и остаются по сей день радиолокационные, радиорелейные системы, а с начала 1960-х гг. — системы космической связи. К настоящему времени ситуация в корне изменилась в результате появления новых приложений в диапазоне миллиметровых волн, недавнего стандарта WiGig (802.11ad) ISM 60 ГГц, распределения частот в области 5 ГГц, использования диапазона Ka (30/20 ГГц), транспондеров для увеличения емкости спутников и новых радаров, в т. ч. автомобильных с диапазоном 77–79 ГГц.

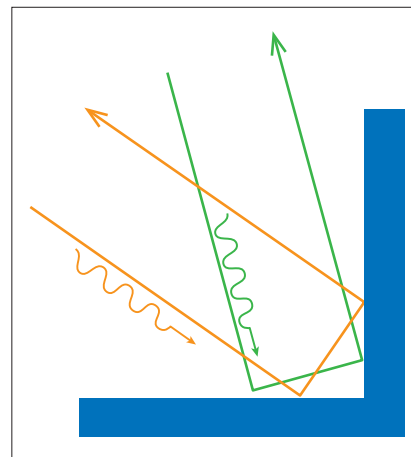
В указанных диапазонах волн широко применяются апертурные антенны, у которых излучение (или прием) электромагнитной энергии осуществляется через некоторую воображаемую поверхность (апертуру) антенны, размеры которой обычно много больше длины волны. Хотя во многих из этих приложений используются планарные антенные структуры, включая антенные решетки, классические волноводные антенны не утратили

своей актуальности — они по-прежнему востребованы в целом ряде приложений и играют большую роль в контрольно-измерительных процедурах.

УГОЛКОВЫЕ ОТРАЖАТЕЛИ

Угловые (иногда их называют угловыми) отражатели работают по принципу, согласно которому падающие электромагнитные (ЭМ) волны отражаются от проводящих листов в направлении, параллельном падающему лучу. Причем у отраженной волны — та же поляризация, что и у падающей, и в том же направлении, откуда пришла волна. Поскольку угловой отражатель является пассивным, стоимость радара или системы связи снижается, т. к. для передачи сигнала не требуется источник питания или дополнительные компоненты, часто имеющиеся в цепи передачи (например, смеситель, гетеродин, усилители, фильтры, преобразователи).

Угловая отражающая антенна может иметь двугранную или трехгранную конфигурацию. В двугранной топологии (рис. 1) две перпендикулярные друг другу пластины с высокой отражающей способностью отражают сигнал к ис-



▲ Рис. 1. Угловые отражатели возвращают сигнал обратно к источнику

точнику, увеличивая эффективную площадь рассеяния (ЭПР, или RCS). ЭПР (для гармонического зондирующего радиосигнала) — отношение мощности радиоизлучения эквивалентного изотропного источника (создающего в точке наблюдения такую же плотность потока мощности радиоизлучения, что и облучаемый рассеиватель) к плотности потока мощности ($\text{Вт}/\text{м}^2$) зондирующего радиоизлучения в точке расположения рассеивателя. Таким образом, ЭПР является количественной мерой свойства объекта рассеивать электромагнитную волну. Следуя той же логике, в структуре трехгранной антенны используются три отражающие поверхности, соединенные под прямым углом. В этом случае отраженная волна теоретически может приходиться с любого направления и возвращаться к своему источнику.

Это свойство угловых отражателей особенно востребовано в морской

СПРАВКА

1. IEEE 802.11ad — поправка к стандарту беспроводных сетей IEEE 802.11, разработанная для обеспечения стандарта Multiple Gigabit Wireless System на частоте 60 ГГц; является сетевым стандартом для сетей WiGig.
2. Диапазоны ISM — это части радиоспектра, зарезервированные на международном уровне для промышленных, научных и медицинских целей помимо телекоммуникаций. В США, Европе и Российской Федерации ISM-диапазон составляет 2400–2483,5 МГц, а в Японии 2471–2497 МГц. В ряде стран, например Франции и Испании, доступны только части этой полосы частот. ISM-диапазон используют многие популярные системы беспроводной связи, например 802.11 Wi-Fi, телефоны DECT, Bluetooth и др. В СВЧ-печах применяется частота 2495 или 2450 МГц.

¹ Статья публикуется в виде авторского перевода оригинала [1], выполненного с разрешения издательства Microwave Journal.

навигации двухточечного типа для определения кораблями своего относительного положения на основе опроса с помощью отражателей методом обратного, или моностатического рассеяния [2]. Поперечное сечение обратного рассеяния легко определить благодаря простой геометрии угловых отражателей. Для угловых отражателей величина ЭПР остается большой в широком диапазоне углов приходящей волны. В таблице 1 представлены приблизительные формулы для расчета ЭПР некоторых объектов в резонансной области, причем считается, что размеры объекта относительно велики по сравнению с длиной волны облучающего их сигнала. В этих случаях ЭПР можно аппроксимировать произведением эффективного коэффициента усиления объекта на его физическую площадь [3]. Например, ЭПР треугольного отражателя на частоте 30 ГГц ($\lambda = 10$ мм) и длине угла 15 см составляет примерно 22 м^2 .

АПЕРТУРНЫЕ ВОЛНОВОДНЫЕ АНТЕННЫ

Апертурные антенны особенно востребованы в авиакосмической сфере, поскольку их можно установить заподлицо с обшивкой самолета или космического аппарата. Эти антенны обеспечивают плавный переход от радиолинии и линий передачи или волновода к свободному пространству с согласованием импеданса между апертурой и волноводом, а также между апертурой и свободным пространством. В таблице 2 представлены типовые значения коэффициента усиления и ширины луча диаграммы направленности некоторых простых волноводных апертурных антенн.








Рупорная антенна (Horn Antenna) нашла широкое применение из-за высокого усиления и хорошей направленности. Она используется для радаров и целого ряда приложений, работающих в диапазоне миллиметровых волн. Антенна имеет большую апертуру, сужающуюся на одном конце, а фланец волновода используется для подключения к фидеру антенны. Виды рупорной антенны: пирамидальная, коническая, секторная, скалярная (экспоненциальная), гофрированная. Между собой они отличаются величиной усиления и подключением фидера. Рупор антенны действует как направляющая система между волноводной модой и свободным пространством; при этом для оптимального усиления и направленности осевая линия волновода и апертура могут быть взаимно согласованы (выровнены).

Электромагнитное поле, как известно, определяется путем решения уравнений Максвелла с учетом граничных условий на проводящих стенках рупо-

Таблица 1. Приблизительные формулы для расчета ЭПР простых объектов [3]

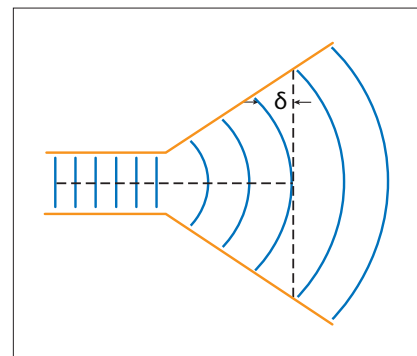
Объект	Ориентация	ЭПР	Обозначения
Сфера	Любая	πa^2	a — радиус сферы
Конус	Осевая	$\frac{\lambda^2}{16\pi} \text{tg}^4 \theta$	λ — длина волны; θ — половина угла раскрытия конуса
Параболоид	Осевая	πa^2	a — радиус кривизны в вершине параболы
Цилиндр	Перпендикулярно к оси	$\frac{2\pi L^2 a}{\lambda}$	L — длина цилиндра; a — радиус цилиндра; λ — длина волны
Двугранный угловой отражатель	Максимальное направление	$\frac{8\pi a^2 b^2}{\lambda^2}$	a, b — длина стороны; λ — длина волны
Трехгранный угловой отражатель	Максимальное направление	$\frac{4\pi a^4}{3\lambda^2}$	a — длина по кромке; λ — длина волны
Трехгранный угловой отражатель с квадратными гранями	Максимальное направление	$\frac{12\pi a^4}{\lambda^2}$	a — длина по кромке; λ — длина волны

Таблица 2. Параметры волноводных антенн [4]

Тип апертурной антенны	Усиление, дБи	Ширина луча по горизонтали/вертикали, °
 Пирамидальная рупорная антенна (Pyramidal Horn)	10–25	9/55
 Коническая рупорная антенна (Conical Horn)	10–25	9/55
 Секторная рупорная антенна (Sectoral Horn)	0–6	45/180
 Рупорно-линзовая антенна (Horn Lens)	32–40	1/4
 Скалярный рупорный облучатель (Scalar Feed)	10–17	25/55
 Волноводный измерительный излучатель (Probe Waveguide)	~6	60/115
 Всенаправленная антенна (Omnidirectional antenna)	0–7,5	30/360

ра для основной моды и мод более высокого порядка. В отличие от антенн с волноводной апертурой рупор следует рассчитывать отдельно, поскольку из-за разницы между длиной по центру источника и расстоянием между краями рупора (рис. 2) возникают фазовые ошибки. Плоский фронт волны доминирующей моды меняется на криволинейный. В силу разницы между криволинейным волновым фронтом и идеальной плоской волной возникает разность фаз или ошибка, которую следует учесть [5]. Для упрощения задачи рассчитаны оптимальные размеры разных рупорных антенн. С помощью этих размеров и с учетом фактических параметров антенны ее усиление можно точно согласовать с расчетным.

При переходе от волновода к рупору плоский фронт электромагнитной волны (TE_{10} или TE_{01} для прямоугольного



▲ Рис. 2. Распространение волны в системе рупорной антенны [4]

волновода) превращается в изогнутую волну. Этот волновой фронт — цилиндрический для секторного рупора и сферический для конического рупора — исходит из раскрытия. Широкий раскрытв обеспечивает более широкий луч и меньшее усиление по сравнению с узким рас-

кривом, который в большей мере фокусирует луч на объекте (приемной антенне).

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ВОЛНОВОДНЫХ И РУПОРНЫХ АНТЕНН И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

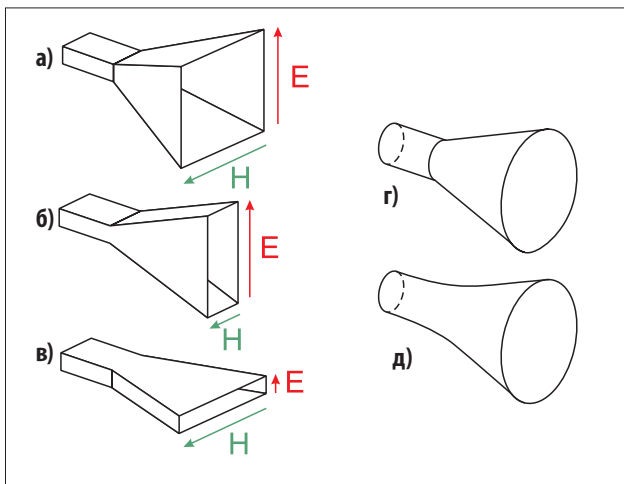
Рупоры антенн могут иметь разные углы раскрыва, а также разные кривые его расширения (эллиптические, гиперболические и т. д.) по векторам Е- и Н-поля, что обеспечивает широкий выбор среди разных профилей диаграммы направленности. Антенны таких типов показаны на рис. 3 [9].

Пирамидальная рупорная антенна (рис. 3а) представляет собой рупорную антенну в форме четырехгранной пирамиды. Такие антенны являются классическими, используются с прямоугольными волноводами и излучают линейно поляризованные радиоволны.

Секторные рупорные антенны (рис. 3б–в) — это те же пирамидальные антенны, у которых одна пара сторон шире другой. В результате создается веерообразный луч, узкий в плоскости расширенных сторон, но широкий в плоскости узких сторон. На рис. 3б показана секторная антенна в Е-плоскости, а на рис. 3в — в Н-плоскости. Антенны этих типов часто используются в качестве рупоров для антенн РЛС широкого поиска.

В случае секторного рупора веерная диаграмма направленности формируется в плоскости, содержащей раскрыв (раствор антенны). Обычно прямоугольные рупорные антенны, например пирамидальные и прямоугольные, имеют обратное излучение и много боковых лепестков в диаграмме направленности. Кроме того, резкий переход от волновода к раскрыву способствует увеличению общего коэффициента отражения электромагнитной волны. В результате при формировании апертуры приходится использовать нелинейные конфигурации, или т. н. мягкий рупор. Для этого применяются гофрированные структуры, диэлектрические стенки или полосы, расположенные поперек направления распространения электромагнитного поля.

Коническая рупорная антенна, представленная на рис. 3г, имеет рупор в виде конуса с круглым поперечным сечением. Она используется с цилиндрическими волноводами. На рис. 3д показана разновидность такой антенны с экспоненциально изогнутыми сторонами. В ней расстояние между сторонами увеличивается как экспоненциальная функция от длины. Такие антенны называются скалярными. У них пирамидальное или коническое поперечное сечение. У экспоненциальных рупоров — минимальное внутреннее отражение, почти постоянный импеданс и почти неизменные общие характеристики в широком диапазоне частот. Такие антенны используются в приложениях с высокой производительностью, например в системах спутниковой связи и в радиотелескопах.



▲ Рис. 3. а–в) Пирамидальные; г–д) конические рупорные антенны

Гофрированный рупор — это рупорная антенна с параллельными прорезями или канавками, которые невелики по сравнению с длиной волны. Канавки покрывают внутреннюю поверхность рупора и расположены поперек оси. Гофрированные рупоры имеют более широкую полосу пропускания, у них меньше боковые лепестки в диаграмме направленности и кросс-поляризация. Они широко используются как рупоры для спутниковых антенн и радиотелескопов.

Двухрежимная коническая рупорная антенна. Ее можно использовать вместо гофрированного рупора на длинах волн менее миллиметра, где у него высокие потери. Кроме того, гофрированный рупор труднее изготовить.

Диагональная рупорная антенна — простая двухрежимная рупорная антенна, которая внешне выглядит как пирамидальный рупор с квадратной выходной апертурой. Однако при ближайшем рассмотрении видно, что квадратная выходная апертура повернута на 45° относительно волновода. Эти рупорные антенны обычно выполнены в виде разъемных блоков и используются на длинах волн менее миллиметра.

Гребенчатая рупорная антенна — та же пирамидальная антенна с гребнями (ребрами), прикрепленными к внутренней части «рога» и проходящими вниз по центру сторон. Ребра уменьшают частоту среза, увеличивая полосу пропускания антенны.

Рупорная антенна с перегородками. Рупор этой антенны разделен внутри на несколько частей металлическими перегородками, прикрепленными к противоположным стенкам.

Рупорная антенна с диафрагмой представляет собой длинный узкий рупор, достаточно длинный, чтобы фазовая ошибка составляла лишь незначительную долю от длины волны. Благодаря этому он излучает плоскую волну. Поскольку его ЭПР = 1,0, он обеспечивает максимальное усиление и минимальную ширину луча диаграммы направленности для заданного размера апертуры. На усиление такой антенны не влияет длина, и ограничивается оно только дифракцией на апертуре. Антенны такого типа используются в качестве рупоров в радиотелескопах и других антеннах с высоким разрешением.

Волноводно-щелевые антенны. Роль антенны в них играет замкнутая металлическая поверхность с небольшими отверстиями, внутри которой возбуждается электромагнитное поле, проникающее через отверстия наружу, в результате чего во внешнее пространство излучается электромагнитная энергия. В общем случае характер поля излучения щелевых антенн зависит от формы и размеров внешней поверхности волновода прямоугольного и круглого сечения. Однощелевые антенны обладают весьма слабой направленностью. Для формирования узкого луча диаграммы направленности используются многощелевые антенны, представляющие собой волновод с одинаковыми щелями, расположенными на одинаковом расстоянии друг от друга (по сути, это щелевые антенные решетки). Расстояние обычно выбирается таким образом, чтобы обеспечить синфазное излучение всех щелей. Для этого выполняется условие $d \ll l \approx \lambda/2$, где d — ширина и l — длина щели. Основная область применения таких антенн — радиолокация. В этом приложении можно, меняя волну возбуждения, управлять наклоном луча (проводить сканирование).

Далее мы более подробно остановимся на волноводных антеннах распространенных типов.

КОНИЧЕСКИЕ РУПОРНЫЕ АНТЕННЫ С БОЛЬШИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ УСИЛЕНИЯ

Коническая рупорная антенна с усилением обычно имеет гораздо более узкую полосу пропускания по сравнению с ее прямоугольными аналогами. Однако из-за осевой симметрии конический рупор может обрабатывать любую поляризацию доминирующей моды TE_{11} . Чаще всего он используется в прило-

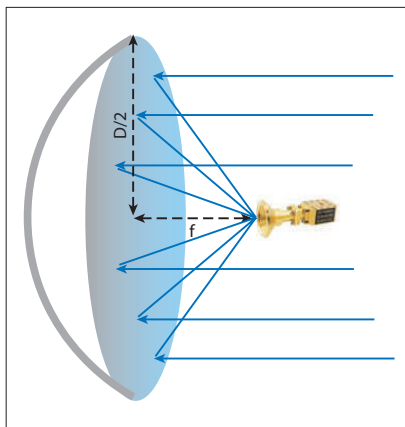
жениях, требующих круговой поляризации (например, для систем космической связи). Подобно прямоугольной рупорной антенне, коническая рупорная антенна для плавного преобразования импеданса также использует настройку апертуры. Типичное усиление этой антенны составляет 10–25 дБи. У нее горизонтальная и вертикальная ширина луча диаграммы направленности по уровню половинной мощности в диапазоне 10–60° и узкая полоса пропускания — максимум 1,3:1 по сравнению с 2:1 в случае прямоугольных рупоров.

СКАЛЯРНЫЕ РУПОРНЫЕ ОБЛУЧАТЕЛИ

Рупорные антенны со скалярным фидером сложнее и дороже изготовить, но у них более высокая мощность передачи и направленность при низких потерях в широкой полосе пропускания. Они идеальны в качестве источников питания антенн для радаров и систем связи, например радиотелескопов, в которых используются параболические отражатели, поскольку эти рупоры обеспечивают относительно равномерное облучение поверхности, минимизируя утечку сигнала через отражатель и увеличивая тем самым общую эффективность антенны. Диаграмма направленности такой питающей антенны должна быть адаптирована к конкретной форме параболического отражателя.

В диаграммах направленности антенн в дальней зоне желаемую поляризацию называют кополяризацией, а ортогональную составляющую — кросс-поляризацией [5]. Кросс-поляризация особенно актуальна в случае рупорных антенн с параболическим тарельчатым отражателем, поскольку апертура фидера обычно расположена рядом с фокальной точкой рефлектора или немного впереди нее. В этой точке все падающие лучи, параллельные оси параболоида, отражаются через его фокус (рис. 4). Широкоугольный скалярный рупорный облучатель в фокальной плоскости параболического тарельчатого зеркального отражателя должен иметь однородную диаграмму направленности в дальней зоне, чтобы минимизировать кросс-поляризацию и в максимальной степени повысить общую эффективность антенны.

Скалярные рупорные облучатели для обеспечения высокой осевой симметрии луча, малых боковых лепестков и низкой кросс-поляризации используют преимущества гибридного режима распространения электромагнитной волны. Гибридный режим отличается от ТЕ- или ТМ-режимов распространения в волноводе, поскольку ни электрическое, ни магнитное поле не являются поперечными по отношению к направлению распространения



▲ Рис. 4. Широкоугольный скалярный рупорный облучатель в фокальной плоскости параболического тарельчатого отражателя

электромагнитной волны. В гибридном режиме, или сбалансированном гибридном состоянии, генерируются симметричные диаграммы направленности Е- и Н-составляющих электромагнитного поля, в которых компоненты ТЕ и ТМ согласованы в сингулярном гибридном режиме и распространяются с общей скоростью.

Таким образом, в параболоид через апертуру рефлектора от источника с однородными полями поступает поле с полной конфигурацией [6]. Линейные Е-поля нельзя получить с помощью исключительно ТЕ- или ТМ-мод. Установленные в рупоре гофры изменяют и электрическое, и магнитное поле, чтобы выполнялось условие гибридного режима.

РУПОРНО-ЛИНЗОВЫЕ АНТЕННЫ

Диэлектрические линзы изменяют характеристики электромагнитного излучения, зачастую корректируя фазу при широкой полосе пропускания или по причине ограниченной осевой длины рупора. Они также являются экономичной альтернативой мягким и гофрированным рупорам, поскольку линзы намного проще изготовить и установить. Обычно диэлектрические линзы устанавливаются непосредственно на апертуре.

Диэлектрические линзы во всех отношениях идентичны оптическим линзам и отличаются от последних лишь условиями прозрачности. На радиочастотах прозрач-

ность определяется макроскопическими параметрами, а в области оптического спектра частот — микроструктурой.

На диэлектрические похожи и металлодиэлектрические линзы, которые состоят из металлических частиц и воздушных прослоек. Таким образом, концепция фокусировки электромагнитных волн этими линзами имеет ту же природу, что и свет с интерференцией и дифракция световых волн линзой Френеля.

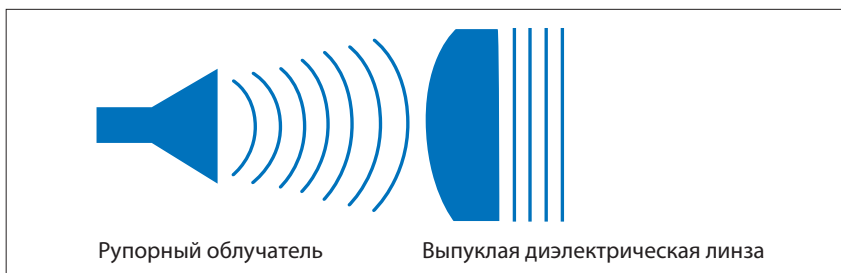
Как правило, выпуклые диэлектрические линзы коллимируют падающую расходящуюся волну, обеспечивая преобразование фронта электромагнитной волны из сферического или цилиндрического в плоский. По существу, они контролируют конусность распределения поля с дополнительной возможностью формировать амплитуду выходного электромагнитного излучения (рис. 5).

Диэлектрические линзы получили большее распространение — они легче и более технологичные. Для уменьшения их толщины и веса используются диэлектрики с низкой диэлектрической проницаемостью и малым тангенсом угла потерь. К числу этих материалов относятся тефлон (фторопласт), полиэтилен, полипропилен, полистирол и кварц. Излучаемые источником электромагнитные волны распространяются по волноводу, а достигнув линзы, излучаются во внешнее пространство и далее распространяются по законам дифракции.

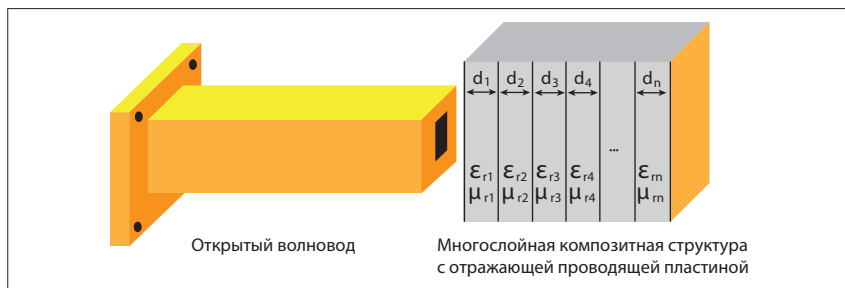
Линзы для рупорных антенн представляют собой рупоры, изготовленные исключительно из диэлектрического материала. В этом случае фазовые ошибки на апертуре выше, чем при использовании металлического рупора, из-за меньшей скорости распространения, что в конечном итоге снижает усиление этих антенных структур [7]. Типичные коэффициенты усиления рупорных линзовых антенн находятся в диапазоне 30–40 дБи. У них горизонтальная и вертикальная ширина луча на половинной мощности в пределах 1–4° и узкая полоса пропускания — 1,1:1.

ВОЛНОВОДНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ (ЗОНДЫ)

Волноводные зонды как разновидность одноцелевой антенны идеально подходят для таких измерений в ближнем



▲ Рис. 5. Выпуклая диэлектрическая линза изменяет сферическую или цилиндрическую волну, поступающую из апертуры рупора, чтобы сформировать плоскую волну



▲ **Рис. 6.** В процессе неразрушающего контроля испытательный зонд с открытым концом излучает электромагнитную энергию в композитную подложку

поле, как неразрушающий контроль, испытания аппаратуры и материалов некоторых типов. Относительно простая конструкция включает открытый волновод с ограничивающим фланцем. При этом источник сигнала отправляет электромагнитную энергию по волноводу непосредственно к испытываемому устройству (ИУ). Как видно из рис. 6, электромагнитная энергия распространяется от рупора и проникает в объект перед открытым концом волновода. Зная диэлектрические свойства ИУ, можно обнаружить пустоты, трещины в материале, а также определить поглощение и отражение электромагнитных волн.

Хотя такой метод позволяет анализировать элементы конструкций (например, фюзеляжи самолетов и обтекатели) в полевых условиях без разборки, он не так точен, как измерения с помощью линий передачи. Отверстие волновода должно прилегать к плоской (или локально планарной) диэлектрической подложке. Полноволновые электромагнитные модели создаются для определения коэффициента отражения на апертуре волновода, где волна излучается непосредственно в диэлектрическую структуру. Точность метода снижается при использовании тонких материалов с малой диэлектрической проницаемостью и малым тангенсом угла потерь. В таких случаях альтернативные методы измерения с использованием измерительной станции или испытательного оборудования могут дать лучшие результаты. Тем не менее в ряде случаев решение с использованием открытого волновода является незаменимым.

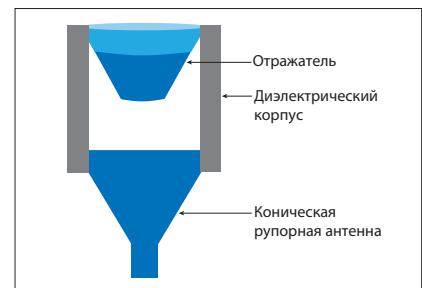
ВСЕНАПРАВЛЕННЫЕ АНТЕННЫ

С помощью волноводной антенны можно создать всенаправленную диаграмму направленности. С этой целью применяется рупор классической конфигурации, распространяющий электромагнитную волну в моде TM_{01} или TE_{01} в сторону металлического конического отражателя на заданном расстоянии от апертуры конического волновода (рис. 7).

Конический отражатель излучает энергию в горизонтальном направлении в угле 360° относительно оси отражателя, создавая всенаправленную (круговую) диаграмму. Параболическая форма отражающей поверхности, в свою очередь, корректирует фазу отраженной сферической волны [8]. Чтобы поддерживать заданное расстояние между волноводом и отражателем, эту структуру часто устанавливают внутрь диэлектрического держателя, изготовленного из материала с малым тангенсом потерь.

ВЫВОДЫ

Сочетание высокой мощности, заданной направленности и работы в миллиметровом диапазоне позволяет применять волноводные антенные структуры в высокочастотных системах относительно большой мощности. Соответственно, практическое и коммерческое значение таких антенн по мере более широкого использования миллиметрового диапазона будет возрастать, а понимание основных типов и характеристик волноводных антенн может оказаться полезным при их выборе для соответствующих приложений.



▲ **Рис. 7.** Всенаправленная волноводная антенна

Однако при выборе волноводных антенн того или иного типа, как и волнопроводов, вас не должна обмануть их кажущаяся простота. Изготовление таких компонентов, особенно для работы в области миллиметровых волн при жестких требованиях по КСВ, ЭПР и диаграмме направленности, требует глубоких знаний не только в области распространения электромагнитных волн этого диапазона, но и в металло- и материаловедении, нанесении гальванических покрытий, а также во всей совокупности связанных технологий.

Особо стоит отметить сложности в соблюдении геометрии волнопроводов (фидеров) и описанных в этой статье антенн. В свое время переводчик статьи был свидетелем того, что на одном из предприятий оборонного комплекса был «народный умелец», который обладал талантом «выстукивать» волноводы. Такие изделия необходимо приобретать через авторизованных дилеров компаний, специализирующихся на производстве этой непростой продукции.

Хотя к настоящему времени в области миллиметровых волн бурное развитие получили новые технологии, классические волноводные решения не потеряли своей значимости. К наиболее распространенным вариантам применения «классики» относятся радарные системы, цепи антенных фидеров и испытательное оборудование, где требуются точные измерения и проверка устойчивости аппаратуры на воздействие высокочастотного излучения, в т. ч. импульсного высокой мощности. Это связано с тем, что по волноводам можно передавать более высокую мощность с изоляцией высокой степени, меньшими потерями и погрешностями фазы, чем по коаксиальным кабелям.

Что же касается систем сотовой связи 5-го поколения то хотя они со временем и перейдут с использования сантиметрового диапазона в полосу 3–5 ГГц и поддиапазона 6 ГГц на миллиметровые волны диапазона 28 ГГц, потребуются иные антенные решения на основе планарных управляемых фазированных антенных решеток (технология Massive MIMO), причем не только для базовых станций, но и для мобильных терминалов [10]. ●

ЛИТЕРАТУРА

1. Peter McNeil. *Demystifying Popular Waveguide Antennas for mmWave Applications*. Microwave Journal. October 14. 2020//www.microwavejournal.com.
2. A. Macikunas, S. Haykin and T. Greenlay. *Trihedral Radar Reflector*. 1984. US4843396A.
3. W. Chen. *The Electrical Engineering Handbook*. Elsevier. 2004.
4. R. Poisel. *Antenna Systems and Electronic Warfare Applications*. Artech House. 2012.
5. J. Volakis. *Antenna Engineering Handbook*. McGraw-Hill. Fourth Edition. 2007.
6. J. De Miguel-Hernandez and R. J. Hoyland. *Fundamentals of Horn Antennas with Low Cross-Polarization Levels for Radioastronomy and Satellite Communications*. Journal of Instrumentation. Vol. 14. No. 08. August. 2019.
7. J. Thornton and K. C. Huang. *Modern Lens Antennas for Communications Engineering*. John Wiley & Sons. 2013.
8. G. Dienes. *Broadband Omnidirectional Microwave Antenna*. 1995. EP0678930A2.
9. Horn antenna//https://en.wikipedia.org/wiki/Horn_antenna.
10. Рентюк В. От структуры сигналов к ММО: пять важных моментов для понимания проблем 5G New Radio//Беспроводные технологии. 2020. № 1.