

УДК 621.396.62

АПЕРТУРНЫЕ СИСТЕМЫ СВЧ ПРИЕМНОГО И ПЕРЕДАЮЩЕГО ТРАКТОВ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ СОСТАВА И СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

© П.А. Федюнин

Fedyunin P.A. Aperture systems of ultra-high frequencies of receiving and transmitting tracts in measurements of materials content and properties. The article contains a detailed account of the issue.

Приемно-излучающие апертуры, используемые нами в измерениях состава и свойств материалов [1], а также в измерениях влажности [2] должны обеспечивать выполнение следующих задач:

а) обеспечение минимума мощности отраженной волны;

б) обеспечение изменения положения максимума ДН ($\pm\Delta\theta$) в пределах заданных величин с оптимальной углочастотной чувствительностью;

в) минимизация величины площади падения при заданных границах углов «качания» ДН, т. е. и минимизация объема взаимодействия преломленной волны;

г) полная локализация и канализация отраженной волны с КБВ, близким к 1;

д) размещение апертуры непосредственно на измеряемом изделии (прижатой к его плоскости), но так, чтобы поверхность относительно апертуры была в дальней зоне (практически на расстоянии порядка $1,6...2\lambda$ от «интегральной» апертуры, см. далее);

е) отсутствие «затекания» токов на внешнюю поверхность апертуры (минимум паразитных боковых лепестков), что обеспечивает увеличение чувствительности метода и увеличивает безопасность облучения персонала;

ж) минимальные габаритные размеры относительно плоскости материала;

з) простота реализации «интегральной» апертуры;

и) для внешних излучателей должен обеспечиваться, во-первых, минимум суммы коэффициентов отражения по мощности в пучке лучей ДН, так как условие полного преломления (угол Брюстера) может быть выбрано лишь при определенных и единственных значениях ϵ и μ слоя.

Во-вторых, должно обеспечиваться полное внутреннее отражение для всех θ , то есть быть равным или больше угла полного внутреннего отражения (условие отсутствия вытекающей волны).

Применение мощных ГСВЧ при $P > 10$ Вт позволяет реализовать апертуру, обеспечивающую синфазность поверхностной волны в ДЗ – круговой синфазной апертуры, с шириной ДН по азимуту $\varphi = 360^\circ$ [3].

Нами разработана специальная излучающая система с азимутальным углом излучения 360° – круговой «тарельчатый» излучатель E – поверхностной волны, показанный на рис. 1.

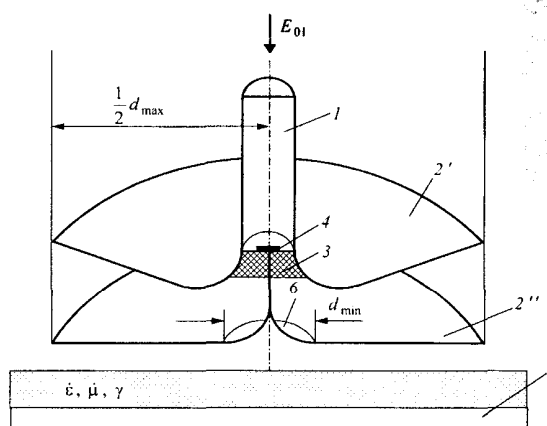


Рис. 1. Круговой тарельчатый излучатель поверхностной волны

Устройство состоит из круглого отрезка волновода 1 с волной E_{01} , сопряженного с верхней «тарелкой» излучателя 2'. Внутри 1 и 2' находится конструкция держателя нижней тарелки 2'', состоящего из радиопрозрачной вставки 3 и крепления 4 согласующего конуса 6, являющегося частью 2''. Вместо 2'', удобно использовать в ее качестве подстилающую металлическую поверхность 5. Величина диаметра конуса 6 – d_{\min} выбирается в этом случае значительно меньше d_{\max} (диаметр 2' и 2'', соответственно). Конус 6 диаметром d_{\min} может быть всей нижней тарелкой, а подстилающая поверхность 5 – ее продолжением, т. е. при $d_{\min} \ll d_{\max}$ роль нижней тарелки выполняет конус 6 с подстилающей поверхностью 5.

Такое устройство обладает непрерывной по азимуту всенаправленностью, не требует вращения, хорошо согласовано, имеет достаточно простую конструкцию, не требует повышенной мощности излучателя.

Для минимизации мощности неинформативной прямой «быстрой» БВ разработаны варианты круговой апертуры с ее «отсекателем» (рис. 2), а также вариант с поглощающим покрытием, уменьшающим паразитное излучение токов, затекающих на внешнюю поверхность апертуры (рис. 3).

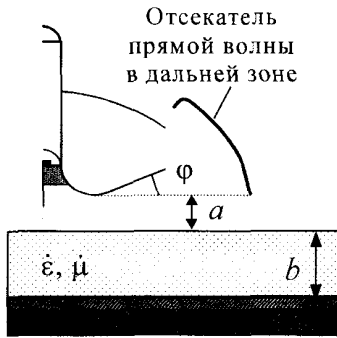


Рис. 2. Круговая апертура с «отсекателем»

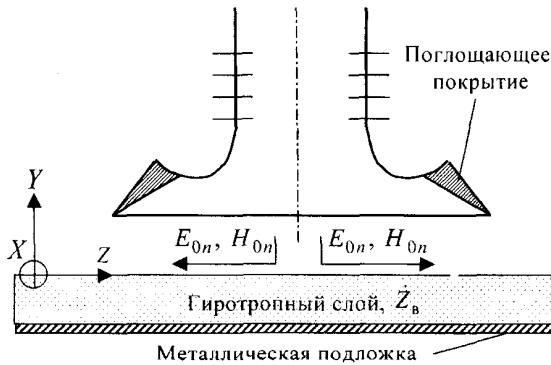


Рис. 3. Круговая апертура с поглощающим покрытием

В [2], [4] нами рассмотрены принципы микроволновой термовлаготрии – измерения влажности W по температуре локально нагретой микроволновым излучением от указанных апертур измеряемой поверхности. Новые разработанные нами апертуры по сравнению с описанными в [2] обеспечивают более высокую степень локализации, а следовательно, более высокую чувствительность в локальном объеме [4].

Практически всем требованиям, рассмотренным в начале статьи, потенциально может отвечать только осесимметричная коническая, цилиндрическая или цилиндро-коническая апертура, внутренняя (излучающая) поверхность которой представляет собой «интегральную» систему излучающих волноводнощелевых отрезков прямоугольных ВВ, работающих в режимах БВ и (или) СВ.

Весьма важным является то, что апертура должна эффективно работать в двух режимах передачи мощности:

1. Режим измерения W_n по длине волны управляемого ГСВЧ – режим без нагрева материала, при мощности излучения не превышающей долей ватта (Вт). Этот режим осуществляется либо управлением высокочастотным делителем мощности мощного ГСВЧ (ЛБВ типа «0»), либо, что предпочтительней, от автономного маломощного ГСВЧ на ЛПД (ТД) или миниклистрона.

В качестве такой апертуры рассмотрим, показанную на рис. 4, цилиндро-коническую апертуру: двухконусный ВВ и «интегральная» цилиндрическая апертура с вертикальными отрезками прямоугольного ВВ.

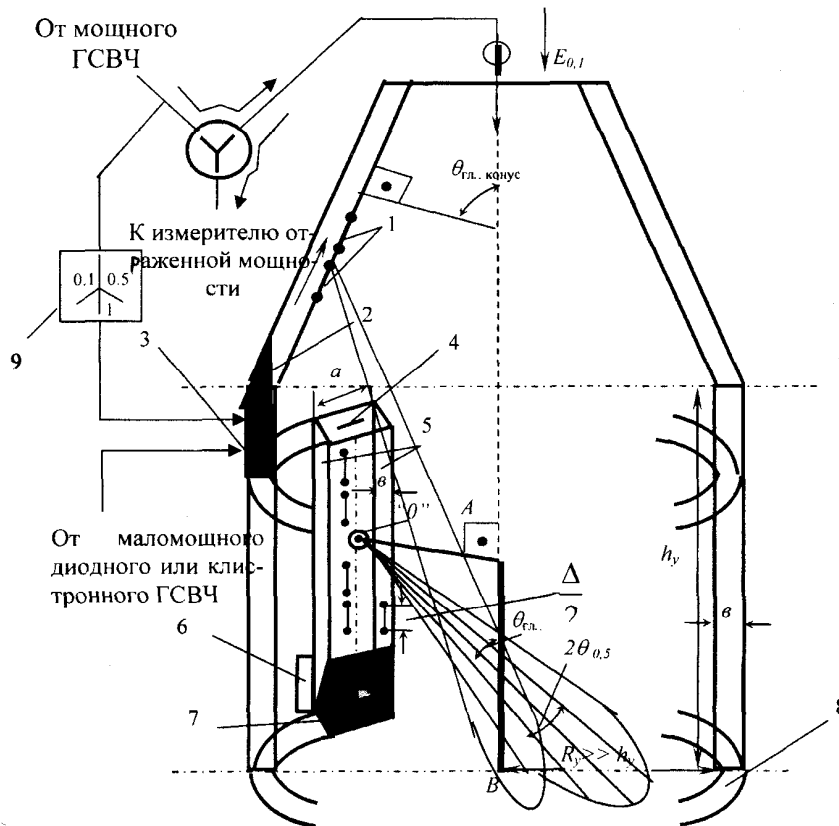


Рис. 4. Цилиндро-коническая апертура

Она состоит из: 1 – излучающие щели «линзы-конуса»; 2 – поглощающее кольцо ВВ «линзы-конуса» или «управляемый ферритовый ключ-аттенуатор»; 3 – кольцевой ВВ, возбуждающий ВВ в вертикальных отрезках ВВ, образующих интегральную цилиндрическую апертуру; 4 – возбуждающие щели; 5 – межцилиндрические ребра, образующие ВВ; 6 – ребро теплоотвода; 7 – поглощающая нагрузка – согласующее устройство; 8 – нижняя часть апертуры « $\theta_{\text{БВ}}$ »; 9 – управляемый делитель мощности.

Особенности апертуры – количество щелей N у «конус-линзы» больше (и может быть намного больше) N цилиндрической части с учетом того, что

$$2\Delta\theta_{0,5} = \frac{54,5(58)\lambda_{\Gamma}}{Nd},$$

т. е. ДН «конус-линзы» более узкая (высокая «локальность»).

На рис. 5 и 6 показана конструкция комплексного приемно-передающего антенного преобразователя, состоящего из излучающей кольцевой щелевой антенны и приемной – рупорного типа [2].

На рис. 5 введены следующие обозначения: а – ЭМЭ (электромагнитный экран и приемный рупор мощности, отраженной ЭМВ – $P_{\text{отр}}$); б – θ_A – угол между плоскостью материала и максимумом диаграммы направленности (ДН) апертуры (щелевой антенны): щель длины $\lambda_{\text{в}}/2$ – полуволновая поперечная щель; в – одна из щелевых антенн (внутренняя щель); г – кольцевой прямоугольный ВВ с излучающими щелевыми антеннами; д – внешняя щель возбуждения кругового ВВ; е – возбуждающий вибратор; ж – плоскость материала; з – пространство, заполняемое теплоизолирующим радиопрозрачным материалом с ϵ' , близким к 1, (пенопласт) с наклеенным комплектом точечных термопар (термобатарея).

На рис. 6 подробно показана конструкция и геометрические параметры кольцевой переменноразной многощелевой излучающей антенны, где введены следующие обозначения: 1 – кольцевой ВВ с переменноразным расположением щелей; 2 – возбуждающая щель с вибратором; 3 – излучающая щель, где Щ_0 и Щ_n – диаметрально противоположные щели; 4 – ДН одной щели; 5 – $\theta_{\text{ГЛ}}$ – направление max основного лепестка ДН одной щели; 6 – ребристая периодическая замедляющая структура; 7 – средняя линия широкой стенки ВВ; 8 – $2\Delta\theta_{0,5}$ – ширина ДН в плоскости падения; 9 – эффективная поверхность переноса СВЧ энергии падающей волны в материал (πR^2); 10 – эффективная (условно-эквивалентная) глубина пространства СВЧ нагрева ($l_s = h$); 11 – условная короткозамкнутая плоскость (К.З.) (режим СВ) или согласованная поглощающая нагрузка (режим ВВ).

Число щелевых антенн $N + 1$ (N – число излучающих щелей; плюс одна возбуждаемая вибратором от ГСВЧ (ЛОВ «0») выбирается из соотношения, обеспечивающего максимум напряженности электрического поля по центру поперечной щелевой антенны:

$$N + 1 = \frac{2\pi R_{\text{ср}}}{n \frac{\lambda_{\text{В}}}{2}} = \frac{4\pi R_{\text{ср}}}{n\lambda_{\text{В}}},$$

где $\lambda_{\text{В}}$ – длина основной волны H_{10} в прямоугольном ВВ; $R_{\text{ср}}$ – средний радиус кольцевого ВВ ($R_{\text{ср}} \gg \lambda_{\text{В}}$); $n \in 1, 2, \dots$.

Выбор параметров кольцевой переменноразной многощелевой излучающей антенны сделан нами с учетом материалов:

а) длина щели $l_{\text{щ}} \approx \lambda_{\text{В}}/2$ – щель резонансная;

б) величина противоразного шага $d_2 = 0,488\lambda_{\text{В}}$, из условия существования только главного лепестка ДН (нулевого порядка), т. е. выполняется условие:

$$d_2 \leq d_{2 \text{ max}} = \frac{(1 - N^{-1})\lambda_{\Gamma}}{1 + |\cos\theta_{\text{ГЛ}}|} \leq \lambda_{\Gamma},$$

а, с другой стороны, условием нормальности направления максимуму ДН к плоскости щели является величина синфазного шага: $d_1 = \lambda_{\text{В}}$. Реально $d_2/\lambda_{\Gamma} = 0,3 \dots 0,7$; откуда:

в) величина синфазного шага $d_1 = 2d_2$;

г) ширина щели $\approx 0,25l_{\text{щ}}$;

д) величина смещения излучающей щели относительно оси симметрии Δ растет симметрично от условной плоскости К.З. до вибратора 2, для уменьшения боковых лепестков приближенно на величину $2\Delta/N$ при шаге, равном d_2 .

Модифицированная измерительная апертурная система позволяет в импульсном режиме с большим КБВ и КПД вводить энергию в излучатель от ГСВЧ через круглый волновод, позволяя импульсно вводить большую мощность. Наличие внутренней полости обеспечивает режим интерференции $P_{\text{пад}}$ и $P_{\text{отр}}$, т. е. режим смешанных волн (СмВ), близкий к СВ, своего рода эквивалент объемного резонатора (ОР) с потерями. Паразитное излучение практически отсутствует при существенном упрощении измерительной схемы, однако, апертурная система сложнее в изготовлении.

Излучающая антенна представляет из себя сферическую двухповерхностную антенну, представленную на рис. 7, где цифрами обозначены: 1 – круглый волновод; 2 – радиопрозрачный материал; 3 – апертурный преобразователь с излучающими переменноразными щелевыми антеннами; 4 – СВЧ – термисторный ваттметр; 5 – держатель сферической антенны, выполненный из поглощающего материала, полностью изолирующий излучающую апертуру от внешнего пространства; 6 – термопарный преобразователь (блок термопар); 7 – замкнутый внутренний объем; 8 – плоскость материала; 9 – верхняя поверхность «объемного» волновода; 10 – нижняя поверхность «объемного» волновода.

Принцип неразрушающего контроля позволяет максимально приблизить апертурный преобразователь 3 к плоскости материала 8, обеспечивая минимум облучения окружающей среды. Полностью исключить паразитное СВЧ излучение позволяет держатель 5 сферической антенны, выполненный из поглощающего материала и полностью изолирующий излучающую апертуру от внешнего пространства. Контакт с поверхностью исследуемого материала имеют держатель 5 сферической антенны и термопарный преобразователь 6 (батарея термопар).

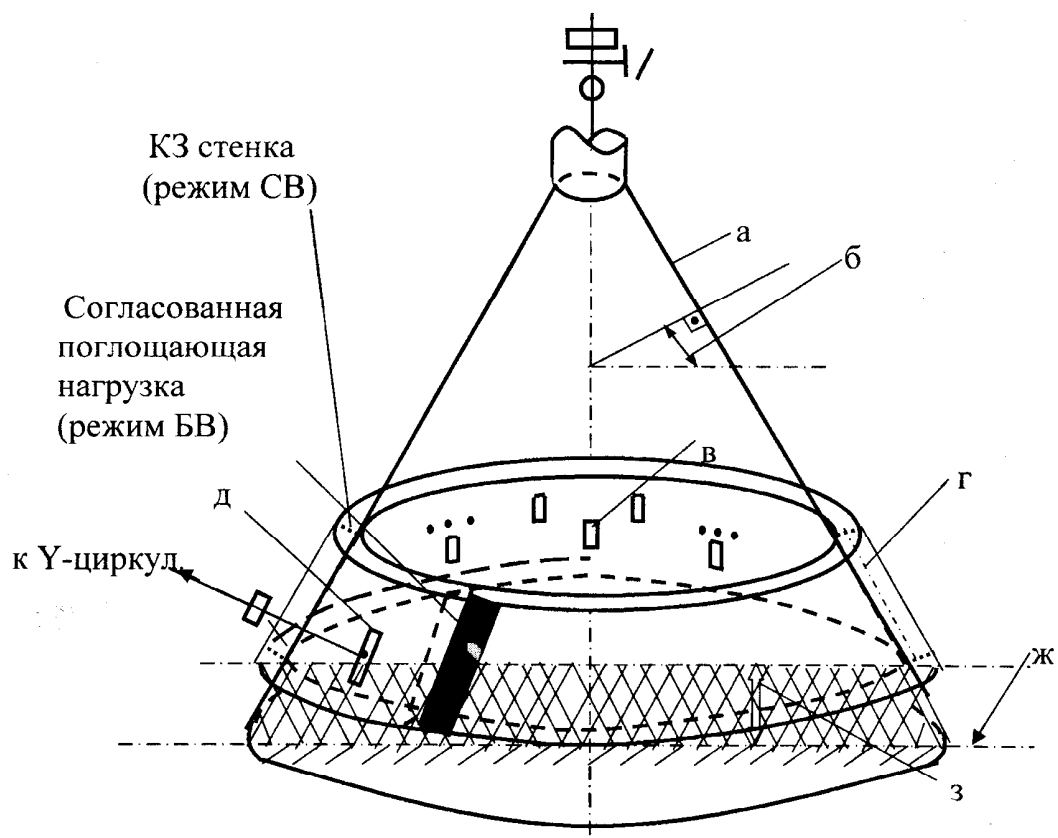


Рис. 5. Комплексная приемно-передающая апертурная система

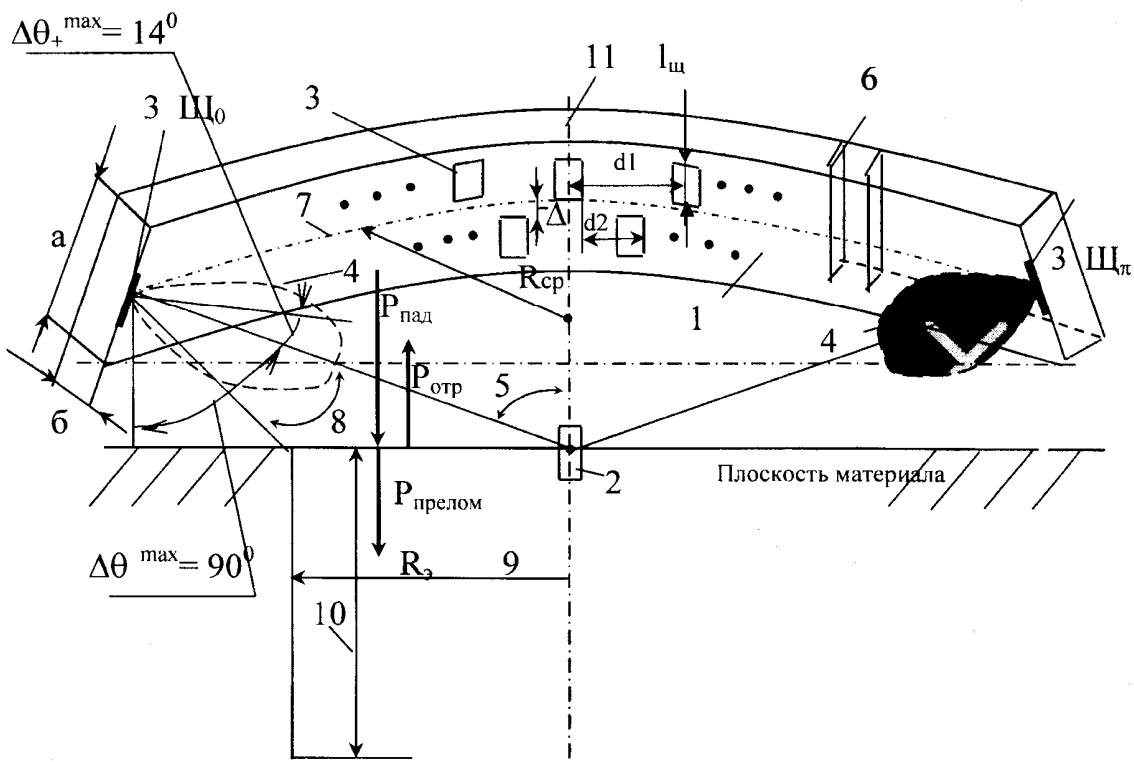


Рис. 6. Конструкция кольцевой переменноразной многощелевой излучающей антенны

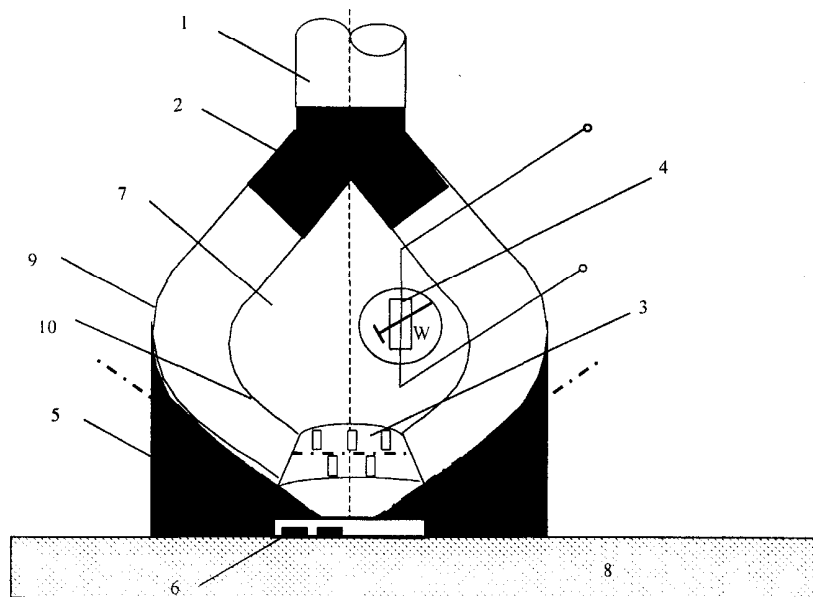


Рис. 7. Сферическая двухповерхностная приемо-передающая антенна с внутренним объемом с кольцевой переменnofазной многощелевой апертурой

ЛИТЕРАТУРА

1. Обоснование технических требований и исследование реализуемости высокочувствительных и высокоточных СВЧ методов сканирования параметров противорадиолокационных покрытий ЛА в процессе нанесения и эксплуатации: Отчет о НИР (заключительный) / Тамб. ВАИИ. Шифр «Замедление-99»; Тема № 296081; Инв. № 056291. Тамбов, 2002. 136 с.
2. Федюнин П.А., Тетушкин В.А. Термовлагодетрический метод сканирования и обработки информативного СВЧ поля падающей и отраженной волн // Повышение эффективности средств обработки информации на базе математического моделирования: матер. VII всерос. науч.-техн. конф. (27–28 апр. 2004 г.) / Тамб. ВАИИ. Тамбов: ТВАИИ, 2004.
3. Федюнин П.А., Дмитриев Д.А., Федоров Н.П. СВЧ способ определения комплексной диэлектрической проницаемости и толщины диэлектрических пластин. Заявка № 2003106528 РФ, МКИ G01N15/06/. Приоритет от 07.03.03. 16 с.
4. Дмитриев Д.А., Федюнин П.А., Тетушкин В.А. Основы микроволновой термовлагодетрии // Теплофизические измерения при контроле управления качеством: матер. VI МТФШ. 20–24 сент. 2004 г. Тамбов: ТГТУ, 2004. Ч. 1. 298 с.

Поступила в редакцию 4 ноября 2004 г.