

Данная работа посвящается памяти Евгения Евгеньевича Чигря

DOI: 10.17725/rensit.2021.13.443

СВЧ-модуль миллиметрового диапазона для подповерхностного зондирования

Хохлов Г.И., Денисюк Р.Н.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, <http://fire.relarn.ru/>
Фрязино 141190, Московская область, Российская Федерация

E-mail: khokhland@rambler.ru, ro-d@yandex.ru

Поступила 26.05.2021, рецензирована 10.06.2021, принята 15.06.2021

Представлена действительным членом РАЕН В.В. Колесовым

Аннотация: Для решения многих задач исследования сред и материалов применяются устройства, работающие на основе радиоволновых методов, а разработка относительно простых и доступных квазиоптических радиоволновых приёмно-передающих устройств миллиметрового и терагерцового диапазонов важна для многочисленных приложений. В работе представлены результаты разработки приёмно-передающего радиоволнового квазиоптического модуля терагерцового диапазона. Модуль предназначен для дистанционного обнаружения различных объектов, в том числе диэлектрических и металлических, и для измерения деполяризованной компоненты поля при обратном рассеянии различными вытянутыми предметами, скрытыми за преградами (строительными материалами и/или бытовыми предметами, нарушающими визуальный контакт с объектами). Это могут быть границы раздела материалов с разными диэлектрическими проницаемостями ϵ , оптоволоконные кабели, электропровода, в том числе и микропровода, и другие объекты. Приводятся результаты тестовых испытаний прибора в натуральных условиях по обнаружению электропроводки под штукатуркой в стене здания.

Ключевые слова: радиоволновый СВЧ-модуль, миллиметровый и терагерцовый диапазоны, квазиоптические устройства, эффект деполяризации радиоволн

УДК 621.396:96:537.874.4

Благодарности: Работа выполнена по госзаданию ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, номер темы 0030-2019-0014.

Для цитирования: Хохлов Г.И., Денисюк Р.Н. СВЧ-модуль миллиметрового диапазона для подповерхностного зондирования. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2021, 13(4):443-448. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.443.

Millimeter-wave band subsurface sounding module

Gennady I. Khokhlov, Roman N. Denisiuk

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Fryazino branch, <http://fire.relarn.ru/>
Fryazino 141190, Moscow Region, Russian Federation

E-mail: khokhland@rambler.ru, ro-d@yandex.ru

Received May 26, 2021, peer-reviewed June 10, 2021, accepted June 15, 2021

Abstract: Radio-wave devices are used for many environmental and material research tasks. These devices and the development of relatively simple and affordable quasi-optic radio wave receivers and transmitters of millimeter and terahertz bands are important for numerous applications. Results of the design of a terahertz-band quasi-optical transmitter-receiver module are presented. The module is intended for the remote detection of various objects and for measuring the depolarized field components backscattered by various long objects hidden behind obstacles (building materials and/or everyday items that prevent visual contact with the objects). These may be interfaces between materials with different dielectric constants, fiber optic cables, electric cables, and other

objects. Results of full-scale experimental testing of the module on the detection of electric cables buried under plaster in the wall of a building are presented.

Keywords: microwave module, millimeter and terahertz bands, quasi-optical devices, waves depolarization effect

UDC 621.396:96:537.874.4

Acknowledgements: The work was carried out according to the state order of the Kotelnikov IRE of RAS, topic number 0030-2019-0014.

For citation: Gennady I. Khokhlov, Roman N. Denisiuk. Millimeter-wave band subsurface sounding module. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies*, 2021, 13(4):443-448. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.443.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (444)
 2. НАЗНАЧЕНИЕ ПРИБОРА (444)
 3. ПРИНЦИП РАБОТЫ ПРИБОРА (444)
 4. КОНСТРУКЦИЯ И СОСТАВ ПРИБОРА (СВЧ-МОДУЛЯ) (445)
 5. РАБОТА СВЧ-МОДУЛЯ С ЛИНЗОЙ-ОБЪЕКТИВОМ (446)
 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (447)
- ЛИТЕРАТУРА (447)

1. ВВЕДЕНИЕ

С развитием твердотельной электроники волны миллиметрового (ММВ) и терагерцового (ТГц) диапазонов находят всё большее практическое применение для решения научно-технических задач. Разработка относительно простых и доступных квазиоптических радиоволновых приёмно-передающих устройств терагерцового диапазона важна для многих приложений. Это может быть и спектроскопия, и обнаружение и визуализация различных предметов, скрытых в строительных конструкциях, оружия, новые методы диагностики и лечения в медицине, контроль параметров атмосферы и многие другие области применения. Большую актуальность имеют задачи исследования электродинамических параметров различных материалов, методов обнаружения и локализации малоразмерных объектов не только металлического происхождения, но и диэлектрических.

Цель настоящей работы - представить результаты разработки приёмно-передающего радиоволнового квазиоптического модуля терагерцового диапазона для задач подповерхностного зондирования.

2. НАЗНАЧЕНИЕ ПРИБОРА

Модуль предназначен для дистанционного обнаружения отражений и измерения коэффициентов отражения различными объектами в коротковолновой части миллиметрового диапазона волн. Такими объектами могут быть диэлектрики, металлические предметы, границы раздела материалов с разными диэлектрическими проницаемостями. Модуль может быть использован как для исследования внутренней структуры пространственно неоднородных сред и измерения деполяризованной компоненты поля при обратном рассеянии различными линейными (вытянутыми) объектами, в том числе микропроводами, проволоками, оптоволоконными кабелями и др., так и для обнаружения перечисленных объектов за преградами из строительных конструкций (гипсокартон, фанера, кирпич, обои и пр.) или за тканями, кожей и другими бытовыми непрозрачными материалами.

3. ПРИНЦИП РАБОТЫ ПРИБОРА

Обнаружение металлических или диэлектрических объектов в оптически непрозрачных средах, имеющих диэлектрическую проницаемость ϵ , отличную от диэлектрической проницаемости исследуемого объекта, возможно с помощью радиоволновых методов, работающих на просвет или на отражение [1,2]. Толщина строительных конструкций ограничивает возможности применения методов, работающих на просвет из-за потерь в строительных материалах. Для обнаружения скрытых аномалий на небольших

глубинах залегания возможно применение радиолокационного метода, что значительно снижает влияние поглощения в среде. Однако в таких схемах большое мешающее влияние оказывают отражения волн на границах раздела. Для того чтобы избавиться от этого, предлагается использовать явление деполяризации радиоволн при рассеянии на линейных неоднородностях.

Принцип действия этого метода описан в [2]. Он заключается в том, что если направление вытянутости линейного объекта отличается от направления поляризации падающей волны, то отражённая волна имеет составляющую с поляризацией, ортогональной поляризации падающей волны. Приёмник отражённой волны имеет поляризационный фильтр, пропускающий только деполяризованную компоненту поля. Это позволяет избавиться от мешающего влияния отражения на границах раздела строительных конструкций, существенно уменьшить уровень шумов и, соответственно, увеличить отношение сигнал/шум от объектов, скрытых за строительными конструкциями. Для обоснования выбранного способа обнаружения объектов за преградами были проведены измерения коэффициентов отражения и коэффициентов преобразования поляризации ряда объектов [2]. Результаты измерений показали, что использование деполяризованной компоненты отражённой волны для обнаружения проводов с малым диаметром не приводит к потере энергетического потенциала прибора.

СВЧ-часть модуля, работающего по вышеописанной методике, должна содержать линейно поляризованный источник СВЧ-излучения (передатчик), а также приёмник СВЧ-излучения с линейной поляризацией, ортогональной излучению передатчика [2]. Разработка такого модуля на волноводах основного сечения привела бы к системе бистатической локации, что существенно усложняет конструкцию, или к использованию ферритовых СВЧ-элементов, в настоящее время мало применяемых в коротковолновой части миллиметрового и терагерцового диапазонах, хотя они и существуют в отечественных разработках.

Поэтому было решено выполнить такой модуль в квазиоптическом варианте.

4. КОНСТРУКЦИЯ И СОСТАВ ПРИБОРА (СВЧ-МОДУЛЯ)

Схема прибора (СВЧ-модуля) приведена в [2]. Он состоит из СВЧ-генератора, волноводно-лучевого преобразователя (ВЛП), лучевого модуля, делителя луча, линзы, формирующей выходной пучок СВЧ-излучения, и приёмника. В состав приёмника входит поляризационный фильтр, волноводно-лучевой преобразователь, детекторная головка и усилитель. В состав прибора входит также источник питания и модулятор СВЧ-излучения. Модуляция СВЧ-мощности осуществляется по питанию генератора Ганна с частотой около 1 кГц.

Плоская линейно поляризованная волна от СВЧ-генератора, сформированная волноводно-лучевым преобразователем в квазиоптический пучок, падает на плоскую решётку из линейных проводящих элементов, которая расположена под углом 45° к направлению распространения волны. Проводники решётки параллельны электрическому полю волны и полностью отражают волну в сторону границы зондируемой (исследуемой) среды. Волна ортогональной поляризации, возникающая при рассеянии на объекте, не отражается решёткой, а полностью пропускается к приёмнику. Приёмник состоит из поляризационного фильтра, волноводно-лучевого преобразователя и детекторной головки.

Рассмотрим конструктивные особенности некоторых элементов СВЧ-модуля (**Рис. 1**).

Лучевой модуль или, как мы его будем называть, призма, выполнен из органического стекла и конструктивно является несущей конструкцией. Этот элемент (призму) мы назвали лучевым постольку, поскольку в нём сделаны цилиндрические каналы, в которых и распространяется луч (пучок) СВЧ-энергии. На нём крепятся все остальные элементы СВЧ-модуля: генератор с ВЛП, делительная

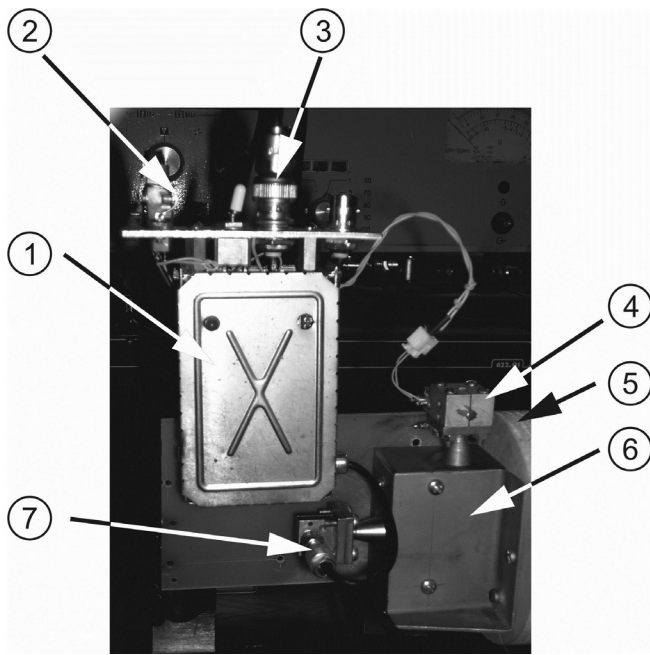


Рис. 1. 1 – блок усилителя и модулятора напряжения; 2 – разъём питания усилителя и диода Ганна; 3 – разъём выхода усилителя; 4 – генератор Ганна; 5 – тубус для крепления линзы-антенны; 6 – призма; 7 – детектор.

решётка (в некоторых случаях делительная плёнка) поляризационный фильтр, детекторная головка с ВАП и т.п.

Диаметр квазиоптического пучка был выбран равным 16 мм. Известно, что амплитудное распределение поля в раскрытии рупора аналогично распределению поля в подводящем волноводе, а фаза в апертуре меняется по квадратичному закону. Поэтому для формирования волны с плоским фронтом в раскрытии рупора ставят фазовый корректор. В нашем случае это фторопластовая линза. Если a – поперечный размер пучка, то для квазиоптической системы должно выполняться условие $ka \gg 1$, где $k = 2\pi/\lambda$. Соотношение $C = ka/L$ является параметром, характеризующим дифракционное расширение пучка при его распространении в тракте [3]. L – длина пучка или расстояние до рабочей зоны. При малых L дифракционные потери оказываются также малыми. Эти и некоторые второстепенные обстоятельства заставили нас оставить свой выбор на диаметре квазиоптического пучка равным 16 мм.

В литературе имеется описание различных

устройств, выполненных из проволочных решёток или тонких диэлектрических пластин, для управления волнами, распространяющимися в квазиоптических системах [4,5]. Если решётка расположена под углом 45° к направлению распространения волны и её проводники параллельны вектору электрического поля, то поле полностью отражается от решётки, а если они перпендикулярны – то волна полностью проходит через решётку. В модуле используется частопериодическая проволочная решётка. Она наклеена на специальную рамку из текстолита, которая вставляется в специальную проточку в призме под углом 45° к падающей волне и осуществляет отклонение луча.

На рис. 1 приведена фотография СВЧ-модуля с указанием всех элементов модуля, в том числе и тубуса, на котором крепится линза-объектив. Линза-объектив является приёмно-передающей антенной для квазиоптического пучка и позволяет сфокусировать пучок на расстоянии, необходимом для работы.

Работа модуля с линзой-антенной рассматривается ниже.

5. РАБОТА СВЧ-МОДУЛЯ С ЛИНЗОЙ-ОБЪЕКТИВОМ

Для проведения дистанционных измерений необходимо сформировать сфокусированный пучок на определённом расстоянии от СВЧ-модуля. На рис. 2 приведена схема одноканального модуля, работающего на частоте 100 ГГц, с линзой-объективом

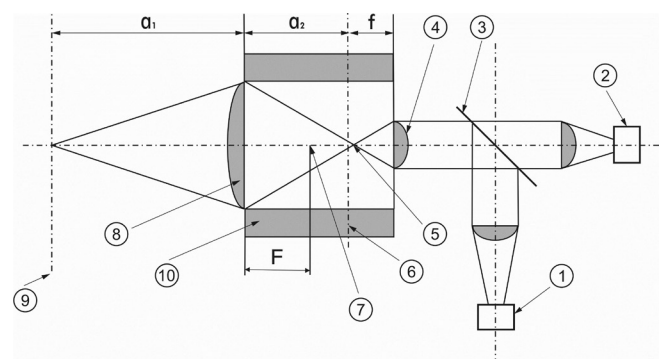


Рис. 2. 1 – генератор; 2 – приёмник; 3 – решётка; 4 – окуляр; 5 – фокус окуляра; 6 – плоскость изображения; 7 – фокус объектива; 8 – объектив; 9 – плоскость предмета; 10 – тубус.

(антенной), формирующей фокусированный пучок.

Линзовая антенна рассчитывалась по формуле [6]:

$$F = \{[D/(2(n-1) - \delta)] \cdot (n+1)\} / 2t.$$

Она изготовлена из фторопласта Ф-4 с показателем преломления $n = 1.427$. Диаметр линзы $D = 70$ мм. Фокусное расстояние линзы F , равное 90 мм, было выбрано из удобства пользования СВЧ-модулем с линзой. Толщина линзы в центре составляет $t = 13.5$ мм.

Окуляр представляет собой сферическую линзу из фторопласта Ф-4 с толщиной в центре $t = 2.3$ мм. Диаметр линзы $d = 16$. Линза рассчитывалась по формуле:

$$f = (d/2) / (2t(n-1)).$$

Фокус линзы равен 32.5 мм.

Плоскость изображения проходит через фокус окуляра (перпендикулярно оптической оси). Для оптимального использования апертуры объектива последний размещался на расстоянии a_2 от плоскости изображения, которое рассчитывалось по формуле:

$$a_2 = D \cdot f / d.$$

Это расстояние оказалось равным $a_2 = 142.2$ мм.

Теперь находим a_1 - расстояние от объектива до плоскости предмета:

$$a_1 = a_2 \cdot f / (a_2 - f).$$

Плоскость предмета располагается на расстоянии $a_1 = 244.4$ мм от объектива.

Таким образом, точка предмета отображается в точку на плоскости изображения, которая проходит через фокус окуляра перпендикулярно оптической оси системы. Затем с помощью волноводно-оптической системы модуля сигнал, соответствующий этой точке, преобразуется в сигнал, снимаемый с детектора.

Облучение точки предмета на оптической оси осуществляется волной, формируемой с помощью ВЛП, решётки, линзы-окуляра и линзы-объектива (антенны). Тубус – пенопластовая труба, конструктивно объединяющая объектив и модуль. Длина тубуса равна $a_2 + f = 174.2$.

Испытывалась возможность оптической схемы по разрешению двух проводников.

Два проводника диаметром 0.5 мм без изоляции и диаметром 0.07 мм (провод МГТФ в тефлоновой изоляции диаметром 0.5 мм) крепились на тыльной стороне пенопластовой пластины толщиной 8 мм на расстоянии 10 мм друг от друга. При перемещении пенопластовой пластины в плоскости предмета (на расстоянии ~240 мм от объектива) наблюдалась двугорбая зависимость сигнала на выходе приёмника. Величина провала составляла около 3 дБ.

В натуральных условиях прибор испытывался для поиска электропроводки, скрытой в стене производственного здания за штукатуркой. Превышение сигнала от проводов электропроводки также составляло 3 дБ.

Если вместо поляризационной отражающей решётки, стоящей в модуле под углом 45° (см. рис. 2) в призме этого СВЧ-модуля, поставить диэлектрическую (лавсановую) плёнку, а приёмник развернуть для приёма основной поляризации (которая излучается генератором), то появится возможность использования модуля в качестве рефлектометра и измерения не только внешних границ, но и внутренних неоднородностей различных материалов.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная конструкция прибора расширяет возможности его применения для обнаружения линейных объектов, скрытых в строительных конструкциях, а также разрешающую способность и другие технические характеристики, необходимые при дальнейшей работе по совершенствованию схем и параметров СВЧ-модулей для подповерхностного зондирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kharkovsky S, Zoughi R and Hepburn FL. High Resolution Millimeter Wave Imaging of Space Shuttle External Fuel Tank Spray-on Foam Insulation. *Materials Evaluation*, 2007, 65(12):1220-1229.
2. Чигряй ЕЕ, Хохлов ГИ, Игнатов БГ, Ковалев АВ, Федчишин ВГ, Матвеев ВИ, Бажанов АС,

- Скопин ВИ, Кричевский ВИ. Радиоволновый интроскоп в миллиметровом диапазоне. *Электромагнитные волны и электронные системы*, 2010, 15(1):50-54.
3. Каценеленбаум БЗ. *Высокочастотная электродинамика*. М., Наука, 1966, 240 с.
 4. Валитов РА, Дюбко СФ, Камышпан ВВ, Кузмичев ВМ, Макаренко БИ, Соколов АВ, Шейко ВП. *Техника субмиллиметровых волн*. Под ред. Валитова Р.А. М., Сов. радио, 1969, с. 299.
 5. Чигряй ЕЕ, Хохлов ГИ, Никитин ИП. Делители квазиоптического пучка на тонких диэлектрических пленках в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн. *Электронный журнал «Радиоэлектроника»*, 2016, №6.
 6. Сколник М. (ред.). *Справочник по радиолокации в 4-х т.т.*, том 2. Радиолокационные антенные устройства. Пер. с англ. М., Сов. радио, 1976, стр. 11.

Хохлов Геннадий Иванович

к.т.н., с.н.с.

ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН

Фрязино 141190, Московская обл., Россия
khokhland@rambler.ru

Денисюк Роман Николаевич

научный сотрудник

ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН

Фрязино 141190, Московская обл., Россия
ro-d@yandex.ru