

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОВОЛНОВЫХ КВАЗИОПТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ ВОЛН

Е. Е. Чигряй, Г. И. Хохлов

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
РАН, 141190, г. Фрязино Московской области, пл. Введенского, 1

Статья поступила в редакцию 17 февраля 2019 г.

Аннотация. Представлены результаты разработки ряда квазиоптических приемно-передающих радиоволновых устройств в миллиметровом и ближней области терагерцового диапазонов и результаты их тестовых испытаний. Приводятся некоторые применения для решения радиофизических задач. Показано, как на основе простого квазиоптического устройства можно создать целый ряд различных приемно-передающих устройств: для контроля проходящей мощности (или опорный канал), для измерения отражений (рефлектометр), для измерения деполяризованной компоненты поля. Разделив квазиоптический пучок на несколько идентичных каналов, можно создать многоканальные устройства и сделать линейку или даже матрицу подобных каналов. Для решения поляризационных задач нужна аппаратура, способная принимать одновременно ортогональные поляризации составляющих отражённого сигнала. В работе приводится вариант двухполяризационного модуля, способного принимать сразу две ортогональные поляризации отраженного сигнала. Для визуализации различных вытянутых металлических, а также диэлектрических объектов показана возможность создания многоканальных интроскопов, работающих на деполяризованной компоненте. Показано, что при этом энергетический потенциал устройств не ухудшается.

Ключевые слова: квазиоптические приемно-передающие радиоволновые устройства, миллиметровый и терагерцовый диапазоны, многоканальные устройства.

Abstract. The design of a number of millimeter-wave quasioptical radio-wave transceiving devices for the millimeter-wave and near-infrared bands is considered, and the results of their testing are presented. Some applications of these devices are presented for solving radiophysical problems. It is shown that, on the basis of a simple quasioptical transceiving device, one can design a whole series of radio-engineering devices: devices for monitoring transmitted power, for measuring reflections, and for measuring a depolarized component of the field. By splitting a quasioptical beam into several identical channels, one can design a multichannel device and even a matrix of such channels. The solution of polarization problems requires an equipment that can simultaneously receive orthogonally polarized components of the reflected signal. In the paper, a variant of a bipolarization unit is described that can simultaneously receive two orthogonally polarized components of the reflected signal. It is shown that multichannel introsopes operating on the depolarized component can be designed that allow the detection of hidden metallic, as well as dielectric objects.

Keywords: quasioptical radio-wave transceiving devices, millimeter and near-infrared bands, multichannel devices.

1. Введение

С развитием твердотельной электроники терагерцового (ТГц) диапазона эти волны находят всё большее практическое применение для решения научно-технических задач. Разработка относительно простых и доступных квазиоптических радиоволновых приемно-передающих устройств терагерцового диапазона важно не только для экспериментальных измерений, но и для многочисленных практических 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 применения. Большую актуальность имеют задачи исследования электродинамических параметров различных материалов, обнаружения и локализации

неоднородностей структуры, а также малоразмерных объектов как металлического происхождения, так и диэлектрических.

В последнее время в научной литературе появились публикации, в которых для решения задач исследования сред и материалов применяются устройства, выполненные на основе радиоволновых методов, которые работают как на основной поляризации [1], так и на деполяризованной компоненте [2], либо одновременно на обеих поляризациях [3]. В данной работе представлены результаты разработок нескольких приемно-передающих радиоволновых квазиоптических модулей терагерцового диапазона, способных решать упомянутые выше задачи достаточно широкого круга. Результаты данной работы докладывались на XVI Международной конференции «Радиолокация и радиосвязь», ИРЭ - МЭИ, Москва - Фирсановка, Россия, 12-16 ноября 2008г. [4], а также на XII международной конференции «Физика и технические приложения волновых процессов», Нижний Новгород, 22-26 сентября 2014 г. [5].

Указанные выше методы реализуются устройствами, основанными на конструкции и работе одноканального квазиоптического модуля, схема которого приведена в разделе 1. На базе этого модуля можно создать несколько измерительных схем: контроль проходящей мощности (или «опорный канал»), рефлектометр, измерение деполяризованной компоненты поля, с помощью диэлектрических пленок [6] можно разделить квазиоптический пучок на несколько идентичных каналов и сделать линейку [2] или даже матрицу подобных радиоволновых приемно-передающих каналов.

2. Одноканальный квазиоптический модуль

Предлагаемый одноканальный квазиоптический модуль, схема которого приведена на рис. 1, состоит из СВЧ генератора, волноводно-лучеводного перехода (или, как мы его будем называть, рупорно-линзовым преобразователем), лучеводного модуля, делителя луча, линзы, формирующей выходной пучок СВЧ излучения, и приемника. В состав прибора входит также источник питания и модулятор СВЧ излучения. Модуляция СВЧ мощности

осуществляется по питанию генератора Ганна с частотой около 1 кГц. В состав приемника входит поляризационный фильтр, рупорно-линзовый преобразователь, детектор и усилитель. Волна с линейной поляризацией от СВЧ генератора (1), сформированная рупорно-линзовым преобразователем (2) в квазиоптический пучок, падает на плоскую решетку (5) из линейных проводящих элементов, которая расположена под углом в 45° к направлению распространения волны [2]. Если вместо решетки поставить 3^{\times} dB тонкопленочный делитель, то модуль будет работать как рефлектометр.

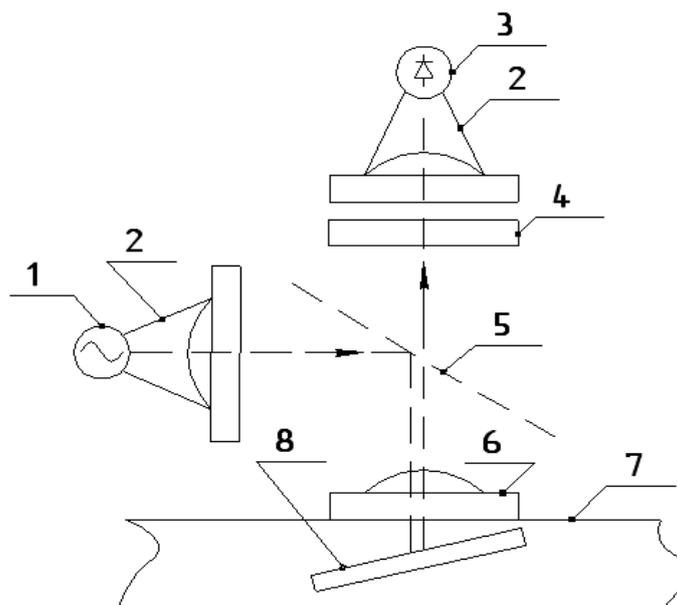


Рис.1. Принципиальная схема одноканального СВЧ – модуля
 1 - СВЧ генератор, 2 - рупорно-линзовый преобразователь, 3 - детекторная головка, 4 - поляризационный фильтр (частопериодическая решетка), 5 - делитель луча, 6 - фокусирующая линза, 7 - поверхность зондируемой среды, 8 - объект поиска.

Проводники решетки параллельны электрическому полю волны и полностью отражают волну в сторону границы зондируемой (исследуемой) среды (7). Возникшая на объекте (8) рассеянная волна ортогональной поляризации решеткой (5) полностью пропускается к приемнику (3). Приемник состоит из поляризационного фильтра (4) (аналогичен решетке (5)), он настроен на пропуск только деполяризованной компоненты поля, рупорно-линзового преобразователя (2) (здесь он используется как лучеводно-волноводный переход) и детекторной головки (3).

В состав прибора входит также источник питания и модулятор СВЧ излучения. СВЧ генератор, детекторные головки и источник питания являются покупными изделиями, и здесь мы не будем рассматривать их конструкцию. Рассмотрим особенности других элементов СВЧ-модуля. Элемент, в котором распространяется квазиоптический пучок или, как мы его будем называть, призма, выполнен из органического стекла и является несущей конструкцией СВЧ-модуля.

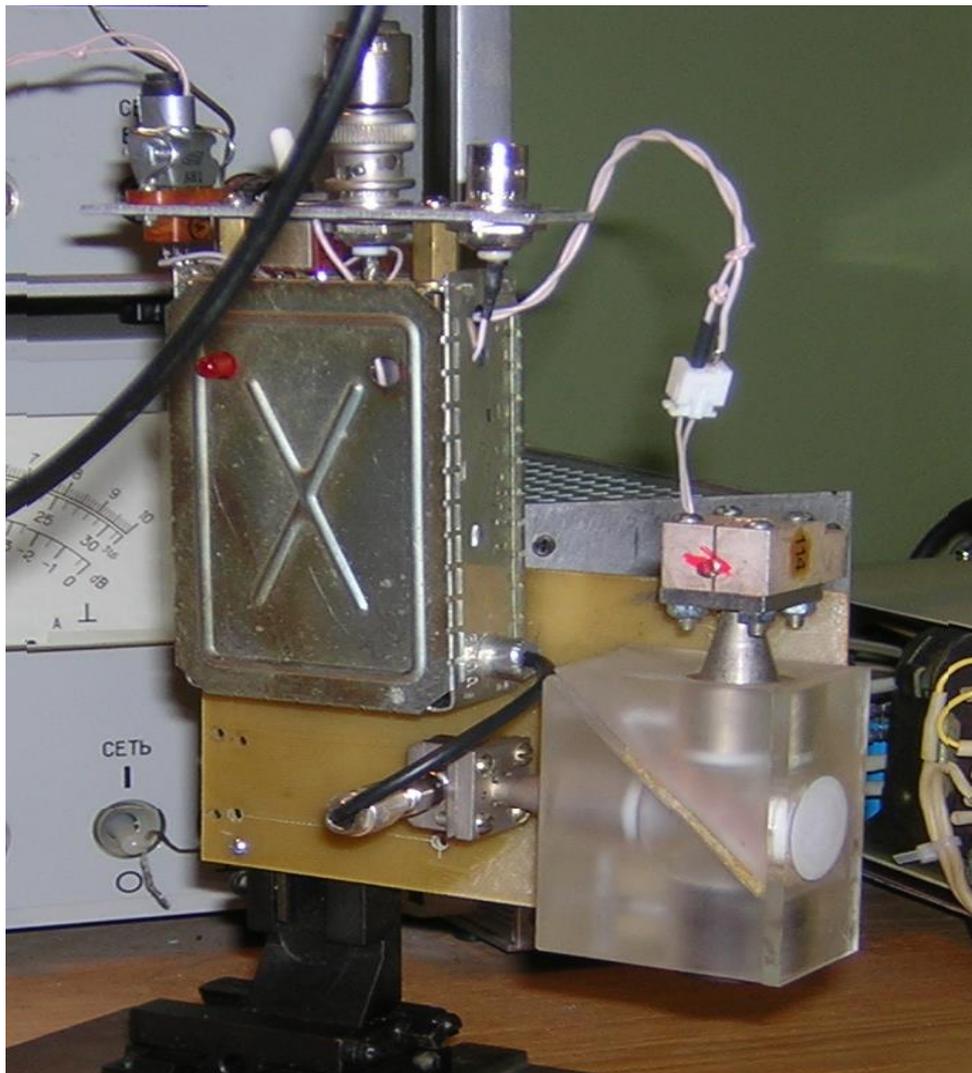


Рис. 2. Фотография модуля на частоте 100 ГГц.

Призма имеет каналы для квазиоптического пучка и посадочные гнезда для всех других элементов модуля. В них и крепятся элементы СВЧ-модуля: генератор с рупорно-линзовым преобразователем, поляризационная

отражающая решетка (в некоторых случаях делительная пленка), поляризационный фильтр, детекторная головка с рупорно-линзовым преобразователем. Диаметр квазиоптического пучка СВЧ энергии был выбран равным 16 мм. Фотография модуля приведена на рис. 2.

Как уже говорилось выше, на основе описанного модуля можно сделать две приемно-передающих радиоволновых квазиоптических разработки терагерцового диапазона. Первый модуль - рефлектометр. В нем вместо решетки (5) ставится 3^{-x} dB тонкопленочный делитель. В литературе описаны различные варианты делителей, выполненных из проволочных решеток или тонких диэлектрических пластин [6,7]. Этот модуль предназначен для измерения на частоте 100 ГГц коэффициентов отражения различными объектами, в том числе диэлектрическими и металлическими. А второй модуль - интроскоп (в качестве делителя луча применяется частопериодическая металлическая решетка), используется для измерения деполяризованной компоненты поля при измерении рассеяния назад различными вытянутыми предметами. Это могут быть границы раздела материалов с разными диэлектрическими проницаемостями ϵ , оптоволоконные кабели, электропровода, в том числе и микро, и другие объекты при обнаружении их за преградами из строительных конструкций (гипсокартон, фанера, кирпич), а также бытовыми предметами, нарушающими визуальный контакт с объектами (обои, одежда, бумага и пр.) [2,3].

Для экспериментального подтверждения возможности обнаружения различных объектов с помощью модуля на частоте 100 ГГц были проведены измерения коэффициентов отражения и коэффициентов преобразования поляризации электрических проводов с различными сечениями и изоляцией, оптоволоконного кабеля и пр. Объекты размещались на выходном срезе канала рефлектометра. На приемнике сравнивались сигналы, отраженные объектом (объект располагался вдоль линий электрического поля волны, или под углом 90°) и металлическим зеркалом. При измерении коэффициентов преобразования для управления квазиоптическим пучком ставилась

металлическая решетка, а на приемнике, который содержит поляризационный фильтр, сравнивались сигналы от объекта, расположенного на выходном срезе канала под углом 45° к вектору поляризации падающего электрического поля, и от эталонного поляризатора. Эталонный поляризатор состоит из частопериодической решетки металлических проводников и металлического зеркала, расположенного на расстоянии $\frac{1}{4}$ длины волны от решетки. Такое устройство дает 100% преобразования линейно-поляризованной волны в волну ортогональной поляризации. В качестве детектора использовался диод Шоттки, работающий в квадратичном режиме. Результаты измерений коэффициентов отражения и коэффициентов преобразования поляризации для медных проводов без изоляции представлены в таблице 1. Полностью результаты измерений опубликованы в [2,3].

При проведении измерений между рупорно-линзовым преобразователем и детектором ставился калиброванный аттенюатор, цена деления которого на шкале отсчета равна 0,1 дБ. Коэффициент отражения медных проводов растет с увеличением диаметра провода как при одной, так и при другой ориентации провода относительно вектора поляризации электрического поля падающей волны. В то же время коэффициент преобразования изменяется мало и при малых диаметрах провода приближается к коэффициенту отражения (так, для провода $\varnothing 0,20$ мм коэффициент отражения $r = -26,2 \div -22,2$ дБ, а коэффициент преобразования $t = -23,5$ дБ). Те же соотношения сохраняются и для проводов с изоляцией (МГТФ). Для оптоволоконного кабеля диаметром 3 мм коэффициент преобразования поляризации составляет -17 дБ, а коэффициент отражения равен -17 дБ и -22 дБ при расположении кабеля, соответственно, вдоль линий электрического поля и перпендикулярно им. Результаты измерений показали, что использование деполяризованной компоненты отраженной волны для обнаружения проводов с малыми диаметрами не приводит к потере энергетического потенциала прибора.

Коэффициент преобразования тонкой хлопчатобумажной нити (диаметр 100 мкм) оказался весьма малым. Однако при увлажнении нити коэффициент

преобразования возрастал до $-15 - -20$ дБ. Этот факт качественно согласуется с результатами работы [8]. При увлажнении нити диэлектрическая проницаемость ϵ значительно возрастает, что и приводит к увеличению коэффициента преобразования.

Таблица 1. Результаты измерения коэффициентов отражения и коэффициентов преобразования поляризации для медных проводов без изоляции.

Диаметр провода, мм	Коэффициент отражения, дБ		Коэффициент преобразования, дБ
	Провод перпендикулярен полю E	Провод параллелен полю E	Угол между проводом и полем $E = 45^\circ$
0,2	-26,2	-22,2	-23,5
0,49	-21,1	-15,4	-20,2
0,50	-19,4	-16,2	-19,7
0,90	-15,4	-13,4	-21,5
2,10	-14,7	-14,6	-21,4

Были проведены эксперименты по обнаружению провода в тефлоновой изоляции и стекловолоконного кабеля, скрытых за гипсокартоном толщиной 10 мм. Эксперимент проводился следующим образом. Модуль ставился на лист гипсокартона, к нижней стороне которого были приклеены провод сечением 0,08 мм в тефлоновой изоляции $\varnothing 0,5$ мм и стекловолоконный кабель $\varnothing 3$ мм. Угол между направлением поляризации поля E , излучаемого модулем, и проводом составлял 45° . В таком положении модуль вручную передвигался по листу гипсокартона. При этом величина сигнала от провода и стекловолоконного кабеля превышала уровень шумов на 10-20 дБ.

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что такая методика может быть использована как при создании устройств измерения отражательных свойств различных объектов на основной поляризации модуля, так и интроскопов ММ диапазона волн для обнаружения и локализации объектов, скрытых внутри строительных конструкций и за ними [2,3].

3. Двухполяризационный модуль

В настоящем разделе приведены результаты разработки двухполяризационного СВЧ модуля на частоте 100ГГц. На рисунке 3 приведена принципиальная схема СВЧ модуля.

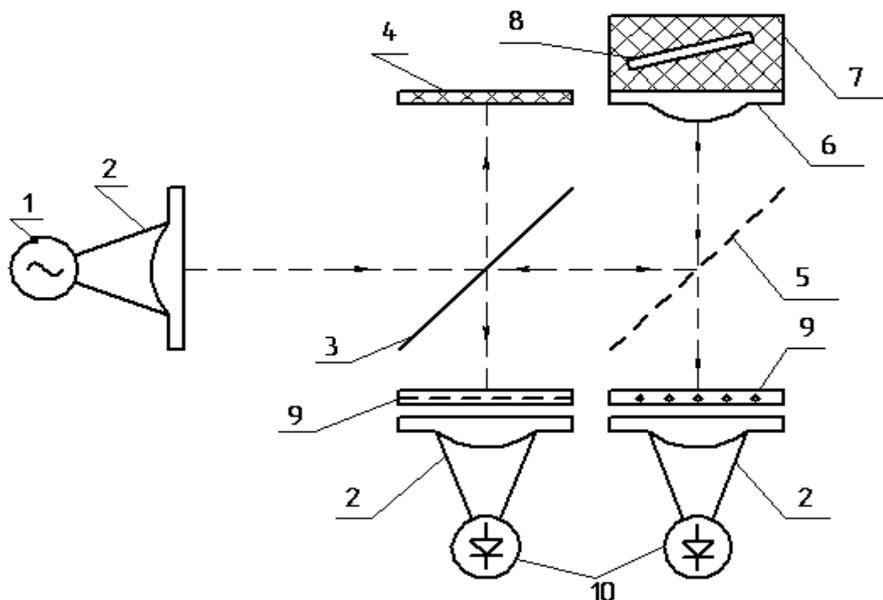


Рис 3. Принципиальная схема двухполяризационного СВЧ – модуля.
 1 - СВЧ генератор, 2 – рупорно-линзовые преобразователи, 3 – пленочный 3^x дБ делитель, 4 – поглотитель, 5- поляризационная решетка, 6 – фокусирующая линза, 7 - зондируемая среда, 8 - объект поиска, 9 - поляризационные фильтры, 10- детекторные головки.

Электромагнитная волна с линейной поляризацией от СВЧ генератора (1), рупорно-линзовым преобразователем (2) формируется в квазиоптический пучок. Он приходит на 3^x дБ делитель из лавсановой пленки (3), где часть волны отражается под углом 90^0 в сторону поглощающей нагрузки (4), а остальная часть проходит на решетку (5), проводники которой расположены параллельно электрическому полю. Решетка отражает пучок под углом 90^0 в сторону выходной линзы (6) и исследуемой среды (7). Отраженное объектом (8) излучение содержит уже две волны: с падающей и ортогональной ей (деполяризованной) поляризациями, которые разделяются поляризационной решеткой (5) и поступают на разные приемники. Деполяризованная волна имеет поляризацию перпендикулярную проводникам решетки (5) и проходит

через неё к приемнику. Приемник состоит из поляризационного фильтра (9), настроенного на пропускание только деполаризованной компоненты отраженной волны, рупорно-линзового преобразователя (2) и детекторной головки (10). Волна с основной поляризацией, параллельной проводникам решётки, отражается от неё полностью под углом 90° , попадает снова на делитель из лавсановой пленки (3). Половина мощности этой волны отражается от неё под углом 90° и попадает на второй приемник, который по составу аналогичен первому приемнику, но поляризационный фильтр, рупорно-линзовый переход и детектор настроены на пропускание и детектирование основной поляризации. Конструктивно призма двухполяризационного модуля состоит из 2-х частей: призмы А и призмы Б. Чертеж призмы А полностью совпадает с призмой одноканального модуля, а чертеж призмы Б на входе имеет проточку для соединительного кольца, которое является направляющим для совмещения осей лучеводных каналов, после чего призмы склеиваются. Фотография двухполяризационного СВЧ модуля приведена на рис. 4.

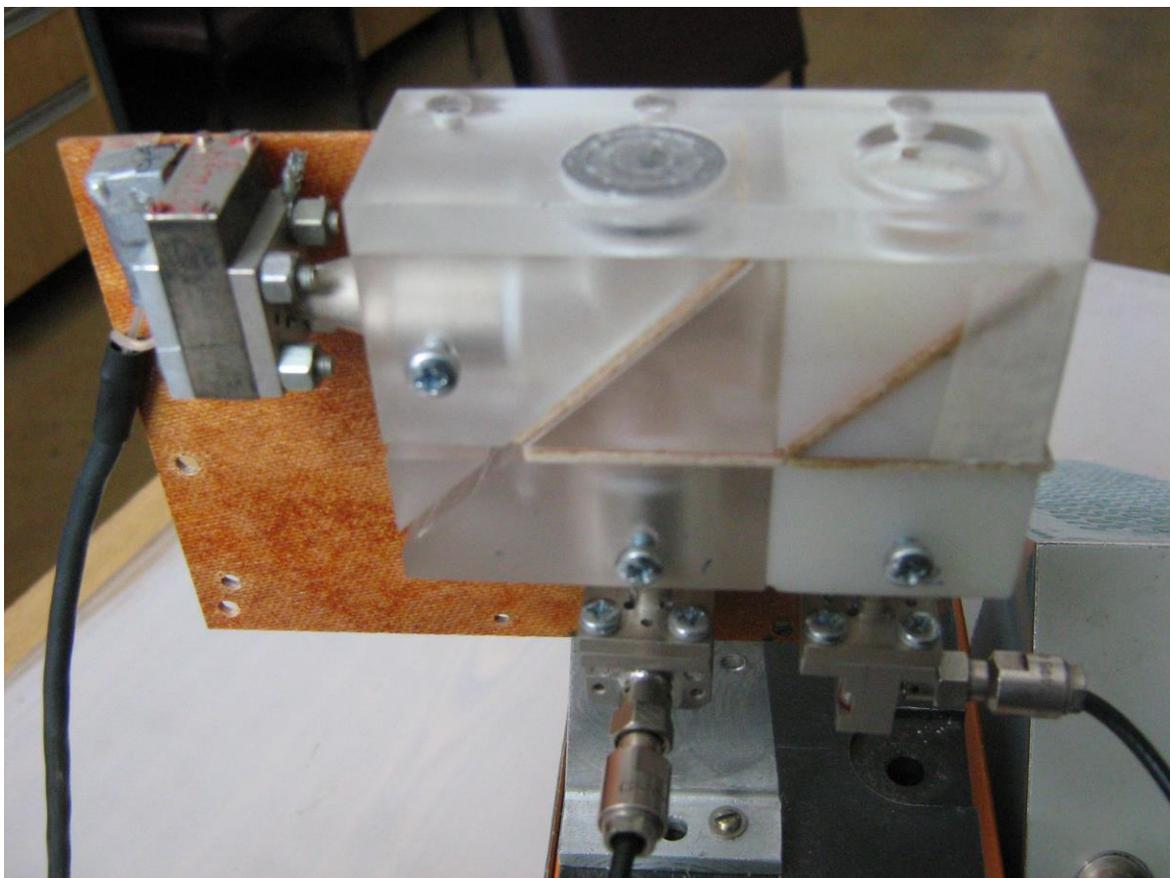


Рис. 4. Фотография двухполяризационного модуля на частоте 100 ГГц.

На рис 5 приведены осциллограммы напряжений с выходов обеих приемных каналов.

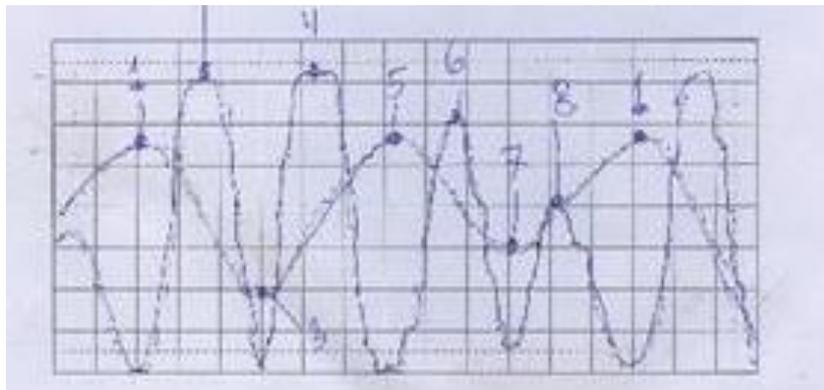


Рис.5 Осциллограммы сигналов с выходов двухполяризационного модуля.

Осциллограммы были получены следующим образом. На выходное окно модуля были произвольным образом установлены наручные часы с секундной стрелкой, а сигналы с приемных диодов подавались на цифровой многоканальный осциллограф, с выхода которого на компьютере регистрировалась приведенная осциллограмма. Различие в амплитудах сигналов приемных каналов и некоторая изрезанность осциллограмм объясняется влиянием произвольного расположения минутной и часовой стрелок относительно основной поляризации модуля.

4. Многоканальные квазиоптические устройства для задач интроскопии

Если вместо поляризационной отражающей решетки (4) в призме одноканального СВЧ модуля (рис.1) поставить тонкий пленочный диэлектрический делитель [4], а рядом к призме одноканального модуля пристыковать еще один такой же модуль (как в случае двухполяризационного модуля), то система будет уже двухканальной и т.д. Продолжая этот ряд, такая конструкция позволяет создавать структуры со многими каналами [2], что увеличивает ширину захвата поверхности при сканировании, используя только один генератор СВЧ сигнала. Количество каналов зависит от энергетического потенциала пары генератор Ганна – диод Шоттки. Оценки показали, что он составляет порядка 55-65 дБ. Такие же цифры получены и в эксперименте с помощью калиброванного аттенюатора.

Этот потенциал распределяется следующим образом - на обнаружение объектов (20-25 дБ), на достоверность обнаружения (10 дБ превышения над шумом), на развязки генератора и приемников (около 10 дБ). Остаются 10-20 дБ, которые можно использовать на распределение по каналам. Если сделать 10 одинаковых каналов, то в каждом канале мощность будет составлять 0.1 от мощности генератора. При избыточном потенциале 20 дБ таких каналов может быть 100 и можно изготовить даже активную решетку 10x10 каналов. В этом случае каждый делитель в канале генератора будет питать не один канал, а линейку из 10 модулей, пристыкованных к каждому боковому каналу в направлении, перпендикулярном направлению основного канала распространения пучка.

При использовании тонких ($h \ll \lambda$, h – толщина делительной пленки) диэлектрических делителей величина отраженной энергии зависит от коэффициента отражения этой пластины и определяется диэлектрической проницаемостью материала, углом падения волны на пленку и ее толщиной. Применение пленочных делителей СВЧ энергии и поляризационных (решеточных) фильтров на входе приемников (кроме последнего канала, где в призме стоит решеточный отражатель) является характерной особенностью таких модулей. Их применение позволило достаточно равномерно распределить СВЧ энергию генератора Ганна по всем каналам. Практический интерес представляет расчет делителя из лавсановой пленки при падении под углом $\pi/4$ [9]. Показатель преломления лавсановой пленки $n = 1.75 + i1,5 \cdot 10^{-2}$ [10]. Экспериментальная проверка характеристик лавсановых делителей показала хорошее совпадение с расчетными параметрами. Отметим одну особенность пленочных делителей. Она состоит в том, что они обладают вентиляльным эффектом для ортогональной поляризации. Так, если пленка толщиной 200 мк на частоте 100 ГГц отводит в боковой канал – 6,24 дБ, то та же пленка на ортогональной поляризации имеет коэффициент отражения только – 14,6дБ. Это явление позволяет создавать в СВЧ - линейках благоприятный режим развязки каналов. На рис. 6 приведена фотография 6-

модульной линейки на частоте 100ГГц с блоком усиления и обработки сигналов. Результаты испытания этой линейки и 4-канальной линейки на частоте 37,5 ГГц опубликованы в [2].

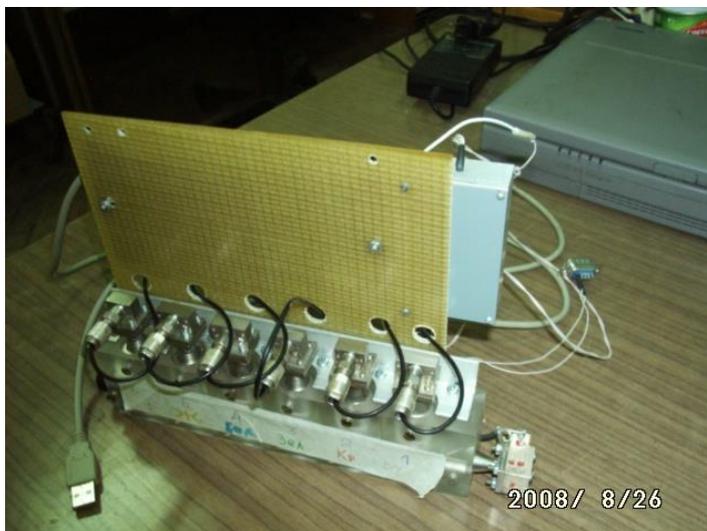


Рис 6. Внешний вид шестиканального 3 мм модуля.

5. Заключение

Изложены принципы построения ряда радиоволновых квазиоптических приемно-передающих устройств миллиметрового и терагерцового диапазонов и результаты их тестовых испытаний. Созданный одноканальный модуль позволяет измерять на частоте 100ГГц на основной поляризации коэффициенты отражения различными предметами и деполяризованную компоненту поля при рассеянии назад различными вытянутыми объектами. Результаты измерений показали, что использование деполяризованной компоненты отраженной волны для обнаружения проводов с малыми диаметрами не приводит к потере энергетического потенциала прибора. На основе одноканального модуля создан двухполяризационный приемно-передающий модуль, принимающий одновременно обе поляризации, а также многоканальный модуль для задач интроскопии.

Литература

1. Kharkovsky S., Zoughi R., Hepburn F.L. High Resolution Millimeter Wave Imaging of Space Suttle External Fuel Tank Spray-on Foam Insulation. // *Materials Evaluation*, 2007, December, p.1220–1229.
2. Чигряй Е.Е., Игнатов Б. Г., Хохлов Г.И. и др. Радиоволновый интроскоп в миллиметровом диапазоне. // *Электромагнитные волны и электронные системы*, 2010г., Т.15, № 1, с.50 – 54.
3. Чигряй Е. Е., Игнатов Б. Г., Хохлов Г.И. Приемо-передающий двухполяризационный модуль терагерцового диапазон. // *Электродинамика СВЧ, КВЧ и оптических частот*. НТО РЭС им. А. С. Попова, 2012 г., Т.17, № 2, с.13-18.
4. Чигряй Е. Е., Игнатов Б. Г., Хохлов Г.И. О возможности обнаружения скрытых линейных объектов на ММВ. *Труды XVI Международной конференции «Радиолокация и радиосвязь»*, ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН - МЭИ, Москва - Фирсановка, 12-16 ноября 2008 г., с.650-652.
5. Чигряй Е. Е., Игнатов Б. Г., Хохлов Г.И. Квазиоптический двухполяризационный модуль терагерцового диапазона волн. *Доклад на XII международной н/т. конф. «Физика и технические приложения волновых процессов»*, Нижний Новгород, 22-26 сентября 2014г. Труды конференции под редакцией проф. В. А. Неганова. Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы», Самара, 2014 г.
6. Чигряй Е.Е., Хохлов Г.И., Никитин И.П. Делители квазиоптического пучка на тонких диэлектрических пленках в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*, 2016, № 6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun16/9/text.pdf>
7. Валитов Р.А., Дюбко С.Ф., Камышан В.В., Кузмичев В.М., МакаренкоБ.И., Соколов А.В., Шейко В.П. *Техника субмиллиметровых волн*. Под ред. Валитова Р.А., М.: Сов. Радио, 1969, 299 с.
8. Калинин А.А., Манаков В.Ю., Арманд Н.А., Крылова М.С. «О механизме обратного рассеяния электромагнитных волн сосновым лесом в метровом

диапазоне длин волн», Радиотехника и электроника, 2008, Т. 53, № 10, с.1223 – 1235.

9. Борн М., Вольф Э.. Основы оптики. М.: Наука, 1970, 855 с.

10. Загатин В.И., Мериакри В.В., Мисежников Г.С., Чигряй Е.Е., Штейншлегер В.Б.. Отражательные и поглощательные характеристики различных физических объектов в миллиметровом диапазоне волн. ДАН, Физика, 2000, Т. 374, №4, с. 476-477.

Для цитирования:

Е. Е.Чигряй, Г. И.Хохлов. Разработка и применение радиоволновых квазиоптических устройств в терагерцовом диапазоне волн. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 3. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar19/3/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.3.3