

На правах рукописи
УДК 681.78



Долганова Ирина Николаевна

**МЕТОД АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРИРОВАННЫХ
РАСSEИВАЮЩИХ СРЕД НА ПАРАМЕТРЫ КАЧЕСТВА
ТЕРАГЕРЦОВЫХ ИЗОБРАЖАЮЩИХ СИСТЕМ**

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» на кафедре лазерных и оптико-электронных систем.

Научный руководитель –

Карасик Валерий Ефимович,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Гольцман Григорий Наумович,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой Московского
педагогического государственного университета

Спектор Игорь Евсеевич,
кандидат технических наук, заведующий
лабораторией Института общей физики
имени А.М. Прохорова РАН

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский
университет «МЭИ»

Защита диссертации состоится «17» мая 2017 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью организации, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.19.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



Д.А. Семеренко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Изображающие системы терагерцового (ТГц) диапазона, частоты которого лежат в пределах от 0,1 до 10 ТГц, применяются для дефектоскопии конструкционных композитных материалов, спектроскопии органических соединений, диагностики заболеваний, для решения задач обеспечения безопасности и противодействию терроризму. Синтез изображающих систем предусматривает проведение анализа свойств среды распространения излучения, влияющих на работу такой системы. Если среда является неоднородной и размеры частиц в ее составе сопоставимы с длиной волны излучения, то при анализе рассеивающих свойств такой среды необходимо учитывать не только многократный характер рассеяния излучения, но и интерференцию волн. Когда частицы среды образуют частично либо полностью упорядоченную структуру (такие среды далее называются структурированными), интенсивности когерентно и некогерентно рассеянного излучения становятся соизмеримыми. Условия применимости приближения неупорядоченной среды не выполняются при расчете таких характеристик, как индикатриса однократного рассеяния, дифференциальное сечение рассеяния, угловое распределение яркости многократно рассеянного излучения. Если явление интерференции не учитывать, то возможно возникновение ошибок в расчете таких параметров изображающей системы, как модуляционная передаточная функция и разрешающая способность, которые обычно используются для оценки качества работы системы.

Такие особенности процесса рассеяния ТГц излучения проявляются при его распространении в тканях одежды, в композитных и некоторых упаковочных материалах. Рассеяние излучения в подобных структурированных средах, расположенных между изображающей системой и исследуемым объектом, оказывает отрицательное влияние на качество формируемых изображений.

Вопросы рассеяния ТГц излучения и разработки ТГц изображающих систем рассматривались рядом научных коллективов. Исследования в области ТГц спектроскопии рассеивающих сред, когерентных эффектов рассеяния излучения, ТГц изображающих систем, проводимые группами исследователей в МГУ им. М.В. Ломоносова, СНИГУ им. Н.Г. Чернышевского, Университете Мемфиса, Университете Портленда, Политехническом институте Ренсселера, Университете Райса, выполняются для специфичных областей применения таких систем, но не касаются вопросов анализа структурированных сред.

Существующие методы анализа параметров ТГц изображающих систем учитывают влияние однородной либо случайно-неоднородной среды распространения излучения. Отсутствуют методы расчета характеристик рассеяния излучения структурированными средами и параметров ТГц изображающих систем, учитывающих влияние таких сред. В связи с этим тема диссертационной работы, посвященная разработке численного метода анализа влияния структурированных рассеивающих сред на параметры качества ТГц изображающих систем, представляется актуальной в научном плане и практически значимой.

Цель диссертационной работы заключалась в разработке и экспериментальном подтверждении метода анализа влияния структурированных рассеивающих сред на параметры качества ТГц изображающих систем.

Для достижения указанной цели в диссертации были поставлены и решены следующие **задачи**:

- разработан метод расчета индикатрисы рассеяния и углового распределения яркости излучения ТГц диапазона, рассеянного структурированной средой;
- реализованы алгоритм численного моделирования распространения ТГц излучения в случайных и структурированных средах и алгоритм расчета параметров ТГц изображающей системы, на основании которых можно оценить качество этой системы;
- проведена классификация рассеивающих сред, основанная на анализе углового распределения яркости рассеянного этими средами ТГц излучения;
- разработан стенд для экспериментальных исследований характеристик ТГц излучения, рассеянного структурированными средами, и на основании полученных результатов проведена верификация результатов численных расчетов;
- разработана система, синтезирующая изображение в ТГц диапазоне на основе обработки изображений, формируемых в активном и пассивном режимах работы изображающей системы;
- экспериментально получены согласующиеся с результатами расчетов значения модуляционной передаточной функции и разрешающей способности ТГц изображающей системы при наблюдении тестовых объектов через различные рассеивающие структурированные среды.

Объектом исследования является полученное при наблюдении через рассеивающие среды изображение в ТГц диапазоне длин волн.

Предметом исследования являются методы расчета параметров качества ТГц изображающих систем.

Методы исследований

При решении поставленных задач были использованы методы вычислительной электродинамики, численные методы решения интегральных уравнений, методы теории линейных оптических систем.

Научная новизна исследований заключается в том, что:

- показано, что разработанный метод расчета характеристик рассеянного структурированными средами излучения позволяет оценивать модуляционную передаточную функцию и разрешающую способность ТГц изображающей системы;
- показано, что, основываясь на предложенной классификации структурированных рассеивающих сред, можно применить один из трех базовых методов расчета индикатрисы рассеяния ТГц излучения, являющийся наилучшим для данных условий.

Положения, выносимые на защиту

- Использование для численного решения уравнения переноса ТГц излучения в структурированной среде модели индикатрисы рассеяния, полученной в результате численного решения уравнений Максвелла, позволяет предсказать конечную погрешность расчетов.
- При выполнении сформированной системы условий модуляционная передаточная функция слоя структурированной среды может быть определена на основе метода двойной локальной оценки яркости поля излучения, рассеянного этим слоем среды.
- Синтез изображения объекта на основе пары изображений, сформированных в активном и пассивном режимах работы ТГц изображающей системы, позволяет минимизировать отрицательное влияние структурированной среды на качество этого изображения и увеличить его контраст.

Практическая ценность работы

Метод определения передаточных функций и разрешающей способности активно-пассивной ТГц изображающей системы может быть использован на предприятиях оборонных отраслей промышленности для создания современных систем безопасности, досмотра и контроля в местах массового скопления людей. Предложенная система синтеза изображений и методы численного анализа характеристик рассеивающих сред могут применяться для технологического контроля производства композитных материалов на предприятиях авиационной промышленности.

Реализация и внедрение результатов исследований

Результаты диссертации внедрены в ООО «Систематика». Материалы диссертации использованы в учебном процессе кафедры лазерных и оптико-электронных систем МГТУ им. Н.Э. Баумана. Реализация результатов работы подтверждается соответствующими актами внедрения.

Апробация результатов работы

Основные положения диссертации докладывались на 11 международных научно-технических конференциях и симпозиумах: симпозиуме «Optics and its Applications». Ереван, Аштарак (Армения), 2014, 2015; Российско-Японско-Американском симпозиуме «Fundamental and Applied Problems of Terahertz Devices and Technologies». Айзу, Сендай (Япония), 2012; Москва, 2013; Баффало (США), 2014; Черноголовка (МО), 2015; конференции «IX International Conference of Young Scientists and Specialists «Optics–2015»». Санкт-Петербург, 2015; 8-ой международной конференции «Современные проблемы оптики естественных вод». Санкт-Петербург, 2015; 16-ой конференции «Laser Optics». Санкт-Петербург, 2014; конференции «SPIE Optics + Photonics». Сан-Диего (США), 2013; 2-ой международной конференции «Terahertz and Microwave radiation: Generation, Detection and Applications» (TERA-2012). Москва, 2012.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 12 статьях в научно-технических журналах, входящих в Перечень ВАК РФ, общим объемом 8,31 п.л.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, общих выводов и списка литературы, включающего 125 библиографических описаний, изложена на 138 страницах машинописного текста, включает 53 рисунка и 8 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна и практическая ценность. Приведена структура диссертации, формы апробации и реализации результатов.

В **первой главе** проведен обзор основных типов ТГц изображающих систем и существующих методов анализа влияния рассеивающих сред в процессе формирования изображения. Выделены основные требования, предъявляемые к изображающим системам ТГц диапазона: максимальная детектируемая мощность сигнала, высокое быстродействие, максимальное разрешение и отношение сигнал/шум, компактность и удобство эксплуатации. Для определения схемы, удовлетворяющей данным требованиям и позволяющей получать приемлемое качество изображения, была проведена классификация существующих ТГц изображающих систем. Как показал анализ, среди активных изображающих систем, регистрирующих отраженное от объекта (либо прошедшее через него) излучение, предпочтительно использовать системы, использующие непрерывный метод генерации излучения. При этом лампа обратной волны (ЛОВ) является наиболее эффективным источником ТГц излучения. Среди пассивных систем, регистрирующих собственное тепловое излучение объекта, предпочтительно использовать схемы, построенные по гетеродинному принципу детектирования. Ввиду отсутствия эффективных матричных ТГц детекторов для формирования изображения удаленного объекта требуется также использовать сканирование его мгновенным полем зрения.

Показано, что отдельно ни активный, ни пассивный режимы работы не обеспечивают максимального контраста изображения во всем диапазоне пространственных частот, поэтому была предложена схема, совмещающая два режима работы – схема гибридной ТГц изображающей системы. Она обладает каналом подсветки объекта, а приемный канал является общим для двух режимов. Среда распространения излучения, имеющая рассеивающую структуру, оказывает различное влияние на работу системы в активном и пассивном режимах. Анализ характеристик рассеивающей среды необходим для расчета параметров качества ТГц изображающих систем. Характеристики среды зависят от ее структуры, которая может быть как случайно неоднородной, так и состоять из частично или полностью упорядоченных рассеивателей. Примерами таких сред являются ткани одежды и композитные конструкционные материалы.

В работе рассмотрены основные методы исследования таких характеристик рассеянного излучения, как индикатриса однократного рассеяния и угловое распределение яркости многократно рассеянного излучения. Из-за характерных размеров элементов структуры неоднородных сред (размеры плотноупакованных

рассеивателей и расстояния между ними сравнимы с длиной волны излучения) процесс рассеяния излучения приобретает многократный характер и строго может описываться уравнениями теории многократного рассеяния. Они не имеют аналитического решения, поэтому широко применяются приближенные методы. Используемые ранее в ТГц диапазоне приближения не учитывают высшие порядки рассеяния излучения, поэтому они не могут в полной мере описывать характеристики рассеянного излучения структурированными средами, в которых наблюдается интерференция волн, рассеянных на близко расположенных упорядоченных частицах.

В связи с этим рассматривались численные методы определения характеристик рассеянного ТГц излучения: прямое численное решение уравнений Максвелла и метод Т-матриц. Точность последнего зависит от количества членов в разложении поля по сферическим функциям, соответственно, требуется проводить исследование на сходимость решения. Также необходимо учитывать ограничения на выпуклость формы рассматриваемых частиц. Численное решение уравнений Максвелла не имеет данных ограничений, поэтому является более предпочтительным методом. Оба метода требуют значительных вычислительных ресурсов, поэтому эффективно могут быть использованы только для небольшого объема среды.

Используя данные выводы, в диссертационной работе предложено использовать методы теории переноса излучения для определения характеристик рассеянного ТГц излучения структурированными средами. Из-за отсутствия аналитического решения уравнения переноса излучения (УПИ) и невыполнения условий для использования известных приближений применялись численные методы решения УПИ для структурированной среды. Это уравнение для яркости в интегральной форме имеет следующий вид:

$$L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{m}}) = L_0(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{m}}) + \int_V \left[\frac{\Lambda \varepsilon}{4\pi} \oint \chi(\hat{\mathbf{m}}, \hat{\mathbf{m}}') L(\mathbf{r}', \hat{\mathbf{m}}') d\hat{\mathbf{m}}' \delta \left(\frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} - \hat{\mathbf{I}} \right) \right] \frac{\exp(-\varepsilon |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|)}{(\mathbf{r} - \mathbf{r}')^2} d^3 \mathbf{r}',$$

где $L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{m}})$ – яркость излучения в точке пространства \mathbf{r} в направлении $\hat{\mathbf{m}}$, $L_0(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{m}})$ – ослабленная падающая яркость излучения, Λ – альбеда однократного рассеяния, ε – коэффициент экстинкции, $\chi(\hat{\mathbf{m}}, \hat{\mathbf{m}}')$ – индикатриса однократного рассеяния, V – объем рассеивающей среды. УПИ является интегральным уравнением второго рода, поэтому для его решения можно воспользоваться численными методами Монте-Карло. Индикатриса рассеяния характеризует свойства элементарного объема среды, описывает одиночный акт рассеяния излучения на некоторой обобщенной частице рассеивающего объема. Чтобы учесть интерференцию и связанные с ней эффекты локализации электромагнитных волн ТГц излучения, которые проявляются в виде усиления интенсивности рассеянного излучения в определенных направлениях, предложено определять индикатрису рассеяния излучения в структурированной среде с помощью методов вычислительной электродинамики. При этом будет достигаться погрешность расчетов, которая будет ограничена погрешностью дискретизации пространства численного моделирования и погрешностью метода Монте-Карло.

Во **второй главе** обоснована методика определения индикатрисы однократного рассеяния излучения с помощью численного решения уравнений Максвелла методом конечных разностей и численного решения дифракционного интеграла Кирхгофа. Показано, что при таком подходе учитывается интерференция волн на упорядоченных частицах структурированной среды в отличие от результата применения индикатрисы Хеньи-Гринштайна, часто используемой для решения УПИ в случайно-неоднородной среде. В качестве элементарного объема структурированной среды предложено рассматривать группу упорядоченных частиц (структурную группу), образующую структуру рассеивающей среды и наиболее часто в ней встречающуюся. Для упрощения процедуры численного расчета рассматривались протяженные цилиндрические частицы, длина которых много больше длины волны излучения. Ориентация группы рассеивателей и направления поля падающего излучения представлены на Рис. 1, а.

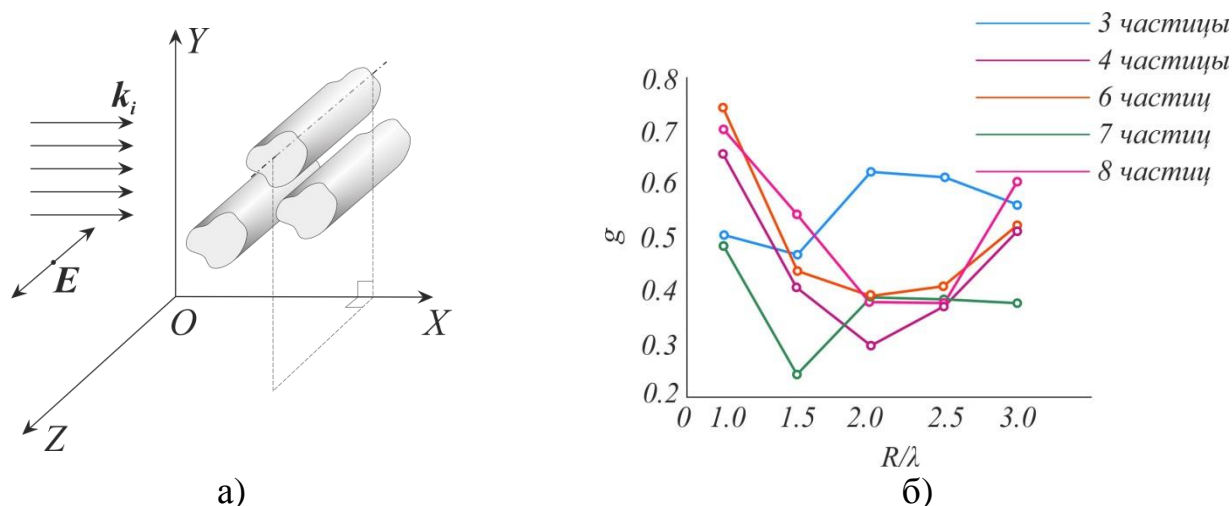


Рис. 1. Ориентация в пространстве группы рассеивателей произвольного поперечного сечения (а), где \mathbf{k}_i – волновой вектор падающего излучения; \mathbf{E} – вектор напряженности электрического поля падающего излучения; параметр анизотропии g индикатрисы рассеяния излучения структурными группами (б)

Для анализа индикатрис рассеяния проводились три серии численных расчетов. Исследовалось влияние относительных размеров частиц, их количества и концентрации в группе на вид индикатрисы рассеяния. В результате численных расчетов показано, что индикатриса рассеяния имеет анизотропный характер, амплитуда и положение ее побочных максимумов зависят как от отношения поперечного размера частиц R к длине волны излучения λ , так и от их взаимного расположения в пространстве. Зависимость параметра анизотропии от относительного размера частиц имеет различный характер для разных положений и количества частиц в группе (Рис. 1, б). При увеличении количества частиц в группе, сохраняется направление основных побочных максимумов индикатрисы, обусловленных структурой группы и сохранением относительных размеров частиц. В то же время происходит увеличение интенсивности в направлении рассеяния «вперед» (Рис. 2).

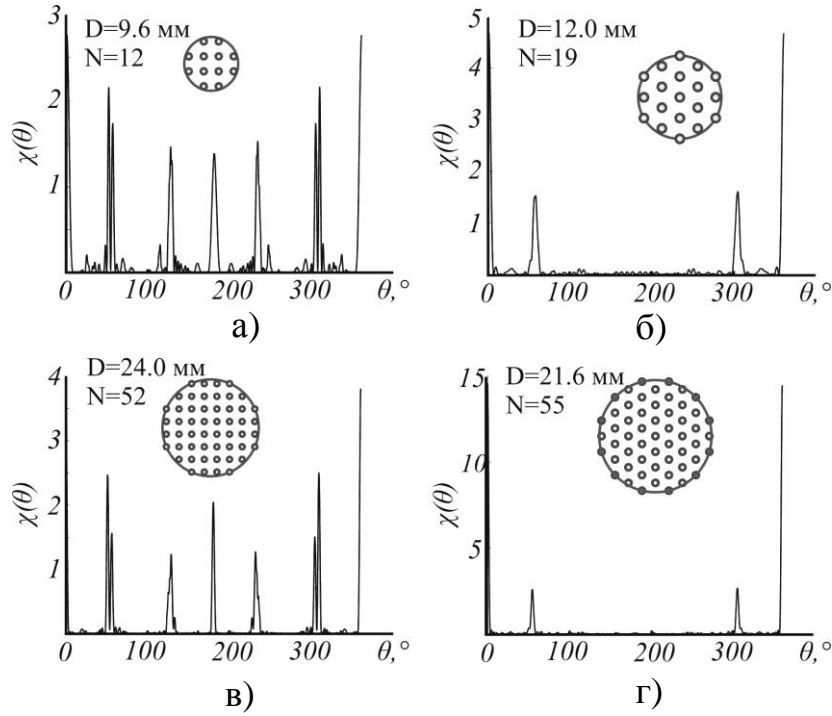


Рис. 2. Индикатриса рассеяния излучения структурными группами с двумя типами структур и различным числом N упорядоченных частиц, D – диаметр группы частиц

Используя полученные индикатрисы, отражающие интерференцию волн, рассеянных частицами структурных групп, численно было решено УПИ с помощью метода Монте-Карло, без применения приближенных подходов. Метод Монте-Карло предполагает априорное определение параметров исследуемой среды, необходимых для записи УПИ, и заключается в последовательном моделировании числа траекторий N распространения одиночных фотонов или их пакетов в рассеивающей среде и в статистическом усреднении результатов.

УПИ для яркости излучения $L(x)$ в точке фазового пространства $x(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{m}})$

$$L(x) = L_0(x) + \int_V k(x, x') L(x') dx'$$

имеет ядро $k(x, x')$, содержащее дельта-функцию Дирака:

$$k(x, x') = \frac{\Lambda \varepsilon}{4\pi} \chi(\hat{\mathbf{m}}, \hat{\mathbf{m}}') \delta\left(\frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} - \hat{\mathbf{m}}\right) \frac{\exp(-\varepsilon|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|)}{(\mathbf{r} - \mathbf{r}')^2}.$$

Такой вид ядра затрудняет определение яркости излучения в заданном направлении в точке пространства от точечного источника. Переход к двойной локальной оценке позволяет провести такой расчет и на основе полученного результата определить передаточную функцию слоя пространства. Для двойной локальной оценки рассматривается УПИ в виде ряда Неймана по кратностям рассеяния:

$$L(x) = L_0(x) + L_1(x) + \int_V k_I(x, x') L(x') dx',$$

$$k_I(x, x') = \left(\frac{\Lambda \varepsilon}{4\pi}\right)^2 \chi(\hat{\mathbf{m}}', \hat{\mathbf{m}}'') \chi(\hat{\mathbf{m}}'', \hat{\mathbf{m}}) \frac{\exp(-\varepsilon|\mathbf{r}'' - \mathbf{r}'|)}{(\mathbf{r}'' - \mathbf{r}')^2},$$

$$L_1(\theta) = \frac{\Lambda \varepsilon \exp(-\varepsilon r)}{4\pi r \sin \theta} \int_{\theta}^{\pi} \chi(\eta) \exp \left[-\varepsilon r \sin \theta \left(\tan \frac{\eta}{2} - \tan \frac{\theta}{2} \right) \right] d\eta,$$

$$L_2(x) = M\xi(x), \quad \xi(x) = \sum_{i=1}^N Q_i h_1(x_i), \quad h_1(x_i) = \chi_1(\theta_1) \chi_2(\theta_2) \frac{\exp(-\varepsilon|r-r'|)}{(r-r')^2},$$

где $L_2(x)$ – яркость высших кратностей рассеяния излучения, $L_1(x)$ – яркость первой кратности рассеяния излучения, $L_0(x)$ – яркость нерассеянного излучения, θ – угол рассеяния, Q_i – «весовой» множитель для i -ой реализации траектории.

Данная методика использовалась для анализа углового распределения яркости ТГц излучения, рассеянного слоем структурированной среды. Среднеквадратичное отклонение полученных в результате численных расчетов значений яркости рассеянного излучения не превышало 0,82% от среднего значения, что подтвердило правильность выбранных параметров моделирования. В результате численных расчетов продемонстрировано влияние конструктивной интерференции волн в структурированной среде на угловое распределение яркости излучения. При определенных параметрах среды, несмотря на случайное расположение структурных групп в ее объеме, наблюдаются усиления яркости рассеянного излучения в выделенных направлениях. Проанализировано рассеяние ТГц излучения в слое среды, в котором присутствуют различные степени упорядоченности частиц, что соответствует реальным неоднородным средам. Показано, что при расчете углового распределения яркости излучения использование индикатрисы, полученной для структурной группы частиц с усредненными параметрами вместо полного набора индикатрис для имеющихся групп частиц, ошибка составляет менее 5%. Используя данный подход, можно значительно сократить время вычислений.

В работе была проведена классификация неоднородных сред по параметрам: толщина слоя, отношение размера частиц и расстояния между ними в группе к длине волны излучения. Результатом предложенной классификации является рекомендация по выбору метода расчета применяемой в решении УПИ индикатрисы рассеяния: использование функции Хензи-Гринштайна с определяемым для структурной группы параметром анизотропии, расчет индикатрисы на основе решения уравнений Максвелла, расчет индикатрисы для случая усредненной группы частиц.

Используя теорию линейных систем и рассчитанные значения яркости многократно рассеянного излучения, получены значения модуляционных передаточных функций (МПФ) пассивной ТГц изображающей системы $T_p(\mathbf{v}) = T_d(\mathbf{v}) \cdot T_s(\mathbf{v})$ и активной $T_a(\mathbf{v}) = T_d(\mathbf{v}) \cdot T_s(\mathbf{v}) \cdot T_s(\mathbf{v})$, где $T_d(\mathbf{v})$ – МПФ дифракционно-ограниченной изображающей системы, $T_s(\mathbf{v})$ – МПФ слоя рассеивающей среды, определяемые из выражений:

$$T_d(\mathbf{v}) = \frac{2}{\pi} \left[\arccos \left(\frac{\lambda \mathbf{v}}{D} \right) - \left(\frac{\lambda \mathbf{v}}{D} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda \mathbf{v}}{D} \right)^2} \right],$$

$$T_s(\mathbf{v}) = \frac{\pi D^2}{4f'^2} \left| \int_{-\infty}^{\infty} L(\boldsymbol{\rho}) \exp(-i\mathbf{v}\boldsymbol{\rho}) d^2\boldsymbol{\rho} \right|,$$

где D/f' – относительное отверстие приемного объектива изображающей системы, ρ – радиус-вектор в плоскости изображения, D – диаметр входного зрачка изображающей системы, l – расстояние от входного зрачка до плоскости детектора, λ – длина волны излучения, ν – пространственная частота.

Для трех случаев работы изображающей системы при наблюдении объекта через слой структурированной рассеивающей среды, были получены МПФ и проведена оценка разрешающей способности по уровню порогового контраста 0,6 (результаты представлены в итоговой Таблице 1). Таким образом, с помощью предложенной методики численно проведена оценка параметров ТГц изображающей системы, используемых для оценки качества ее работы.

В третьей главе приведено экспериментальное подтверждение результатов численных расчетов. Для этого разработана методика и стенд для экспериментальных исследований индикатрисы рассеяния ТГц излучения структурной группой частиц (Рис. 3). Разработаны экспериментальные образцы нескольких групп, представляющих собой структуру из параллельных цилиндрических частиц, оси которых расположены перпендикулярно направлению распространения излучения. Образец закреплялся в разработанном держателе, который позволял установить частицы параллельно друг относительно друга с погрешностью 0,15 мм на длине 50 см.

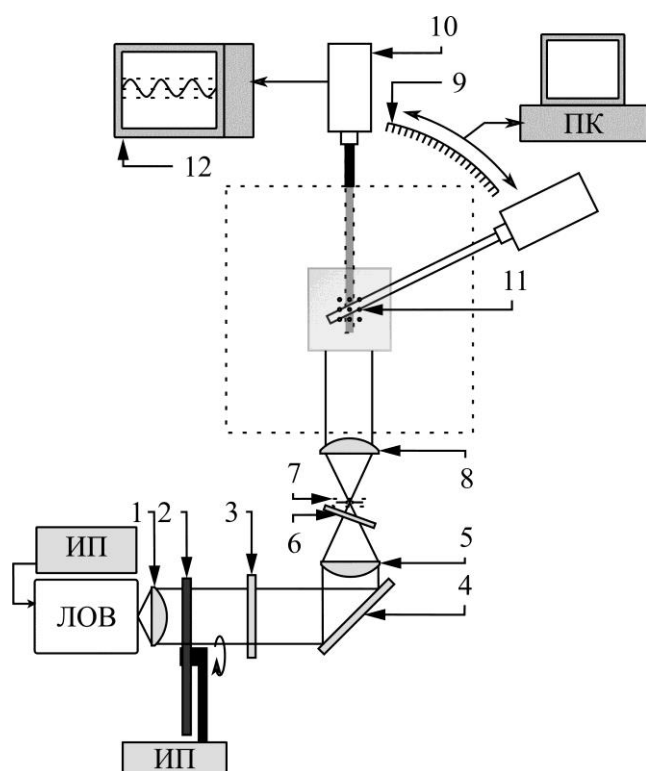


Рис. 3. Схема стенда для экспериментальных исследований индикатрисы рассеяния излучения группами частиц: 1, 5, 8 – линзы с фокусным расстоянием 50 мм, 120 мм и 100 мм, соответственно; 2 – модулятор, 3 – аттенюатор, 4 – плоское зеркало, 6 – четвертьволновая пластинка, 7 – диафрагма, 9 – автоматизированный блок углового перемещения, 10 – детектор (ячейка Голея), 11 – блок установки образца, 12 – осциллограф, ИП – источник питания, ПК – персональный компьютер

Для анализа индикатрисы рассеяния из измеренного сигнала была выделена составляющая рассеянного излучения (Рис. 4, а). При увеличении числа частиц в образце сохранялось положение побочного максимума в угловом распределении рассеянной интенсивности излучения, его амплитуда при этом возрастала. Влияние ошибки точной ручной установки частиц приводила к незначительному росту погрешности δ определения побочного максимума при увеличении количества частиц в группе. Ее значения не превышали 25% (Рис. 4, б).

Данные экспериментальных исследований подтвердили результаты математического моделирования, в частности, неоднородность индикатрисы рассеяния излучения группой упорядоченных частиц и влияние на нее числа частиц в группе.

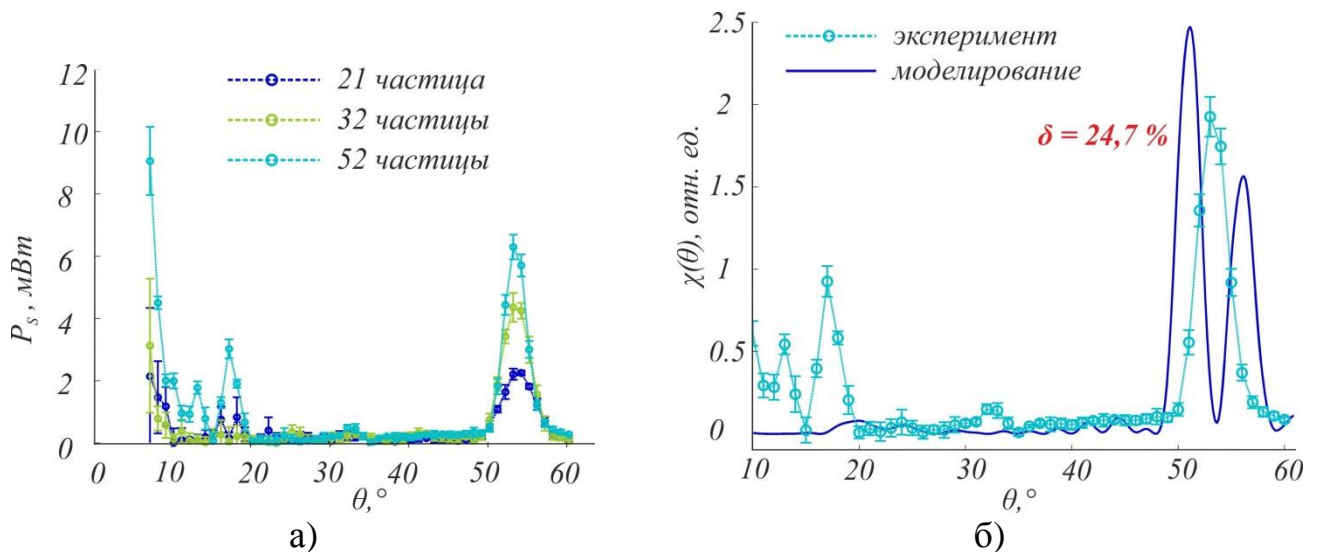


Рис. 4. Результат измерений интенсивности рассеянного излучения группами упорядоченных частиц (а); сравнение экспериментально полученных значений и результатов численного моделирования индикатрисы рассеяния излучения группой из 52 частиц и погрешность δ определения $\chi(\theta)$ (б)

На основании предложенной схемы активно-пассивной ТГц системы видения разработан макетный образец и стенд для проведения экспериментальных исследований формирования изображений в ТГц диапазоне при наблюдении объектов через структурированные рассеивающие среды (Рис. 5).

Для равномерной подсветки области исследуемого объекта в работе предложено использовать интегратор, состоящий из пластиковых сферических частиц, помещенных в полую металлическую призму.

Для проведения экспериментальных исследований был приготовлен набор тест-объектов (шпальных мир), изготовленных из чередующихся металлических и картонных полос (Рис. 6). Между изображающей системой и объектом помещался слой рассеивающей среды (одежды). На основании сформированных изображений тест-объектов (Рис. 7) был проведен анализ системной МПФ в активном и пассивном режимах. Применяя гармоническую аппроксимацию методом наименьших квадратов для усредненных кривых интенсивности по горизонтальному сечению в области присутствия мира

$$I = A + B \sin(2\pi\nu x + C),$$

где x – горизонтальная координата в плоскости изображения, отношение коэффициентов B и A определяет МПФ на данной пространственной частоте ν .

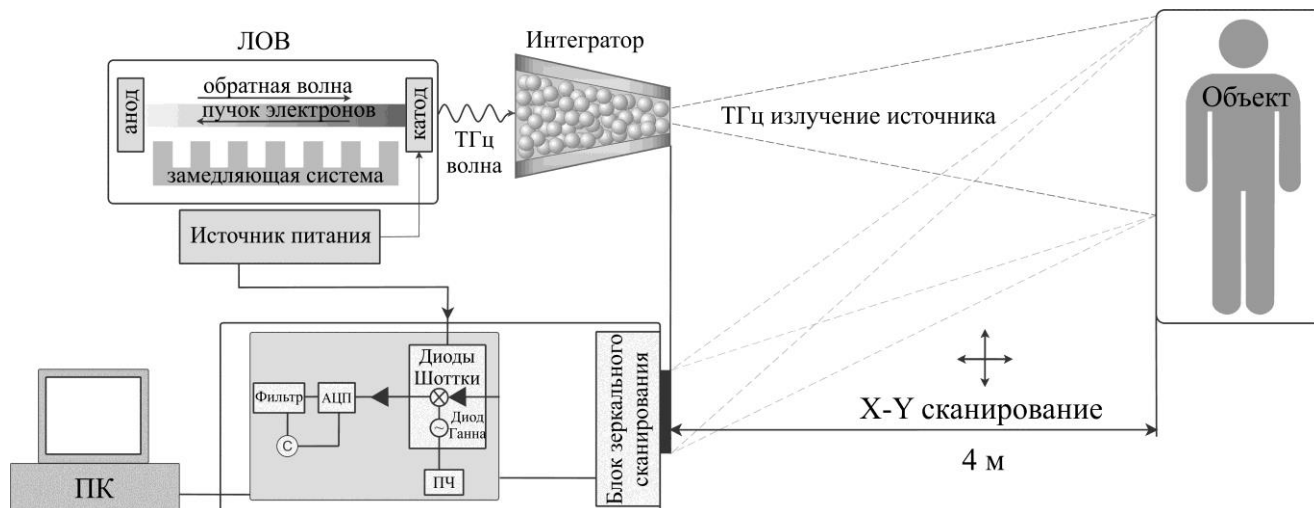


Рис. 5. Структурная схема макета активно-пассивной ТГц изображающей системы

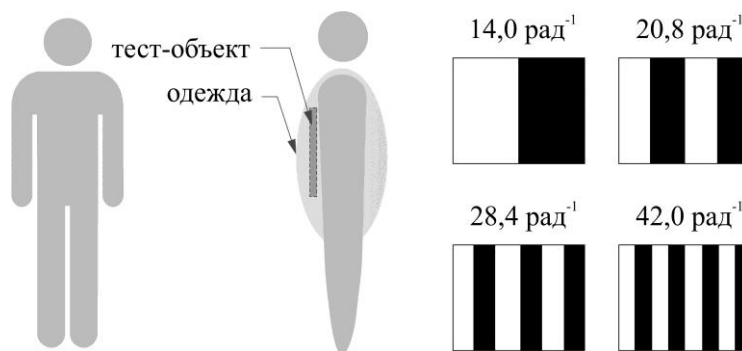


Рис. 6. Схематичное изображение человека, слоя одежды и тест-объектов различных пространственных частот

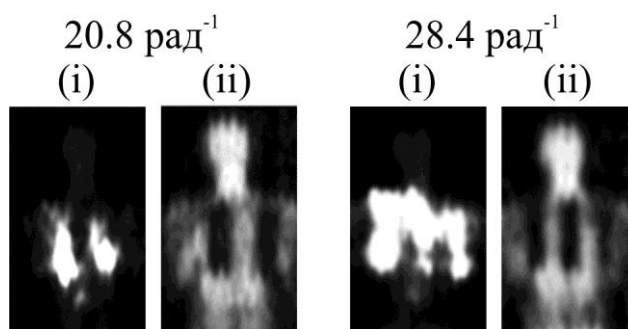


Рис. 7. Примеры ТГц изображений тест-объектов, полученных при распространении излучения через слой рассеивающей среды, в активном (i) и пассивном (ii) режимах работы системы

На Рис. 8 приведены полученные значения МПФ в активном и пассивном режимах работы системы, демонстрирующие эффективность активного режима для передачи низких пространственных частот и пассивного режима – для высоких (красные и синие области на графиках, соответственно). В качестве структурированных рассеивающих сред были выбраны следующие образцы одежды: футболка (образец 1, (б)), пиджак (образец 2 (в)) и пальто (образец 3 (г)).

Отличия МПФ в двух режимах обусловлены, главным образом, присутствием рассеивающих сред, в которых излучение внешнего источника (ЛОВ) распространяется дважды, в то время как собственное излучение объекта проходит через тот же слой однократно.

Для получения максимальных значений МПФ во всей частотной области предложено комбинировать изображения посредством псевдо-цветового представления, используя алгоритм пороговой фильтрации изображения (Рис. 9). За счет использования изображения, полученного в пассивном режиме, уменьшается влияние рассеивающей среды и увеличивается разрешающая способность. За счет использования изображения, полученного в активном режиме, увеличивается контраст изображения на низких пространственных частотах.

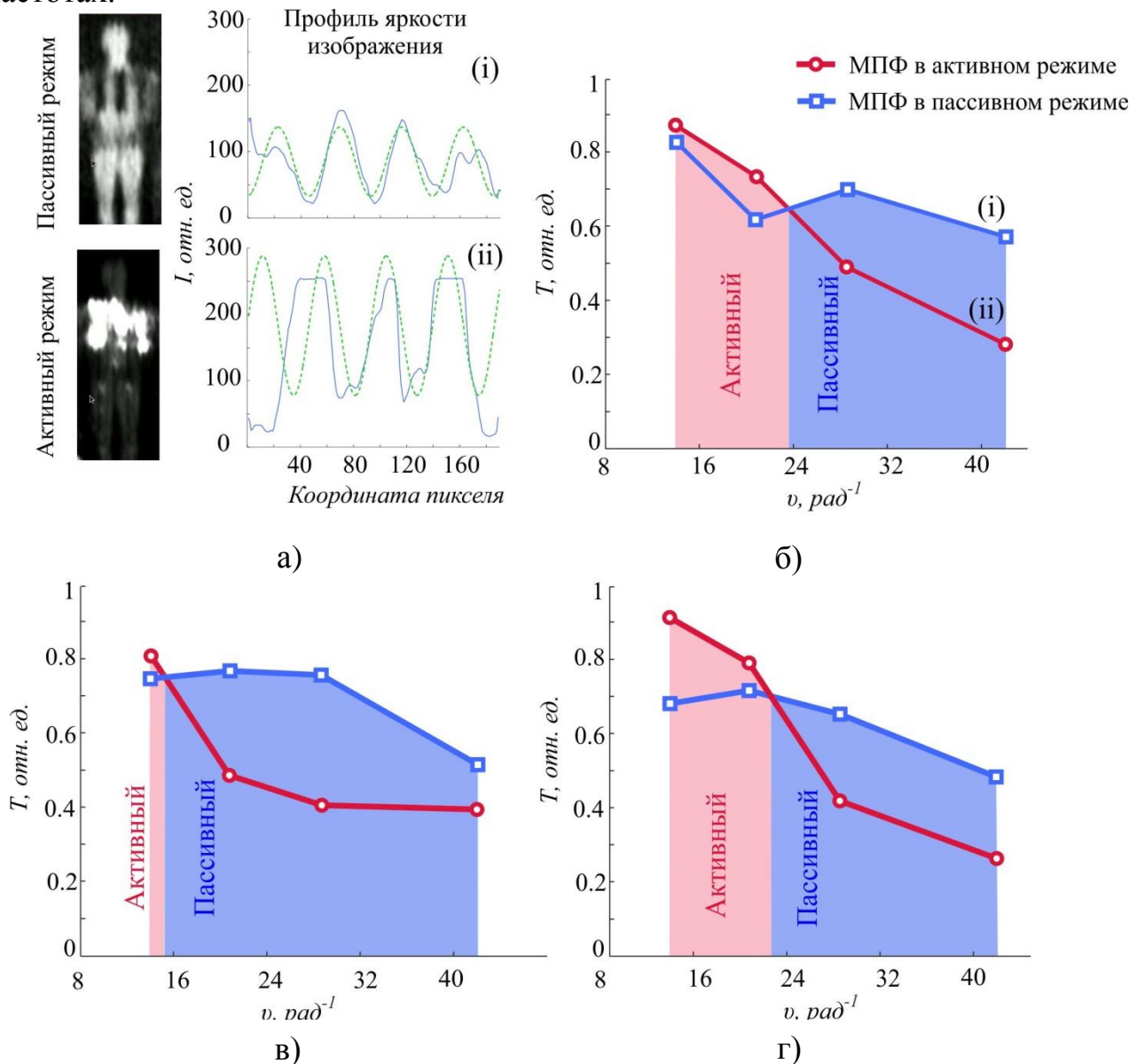


Рис. 8. Пример профиля яркости ТГц изображения (непрерывные линии) и его гармоническая аппроксимация (штриховые линии) (а); МПФ системы $T(v)$ в активном и пассивном режимах для тест-объектов при наблюдении через три образца рассеивающей среды (б – г)

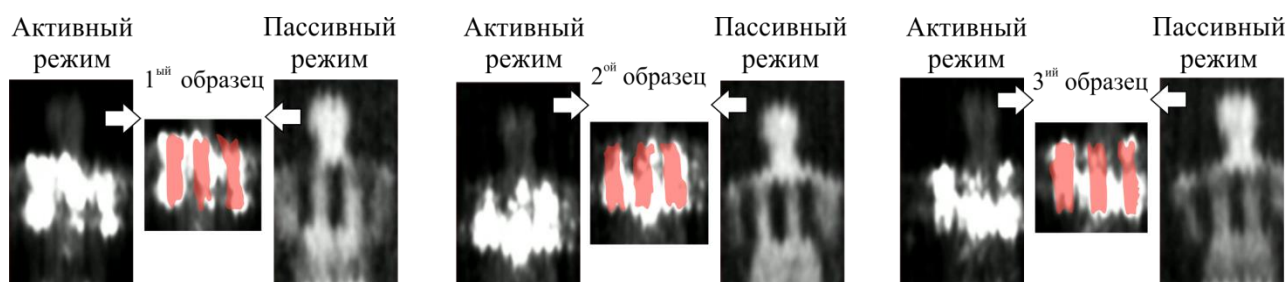


Рис. 9. Примеры комбинированных изображений тест-объектов при наблюдении через рассеивающие среды

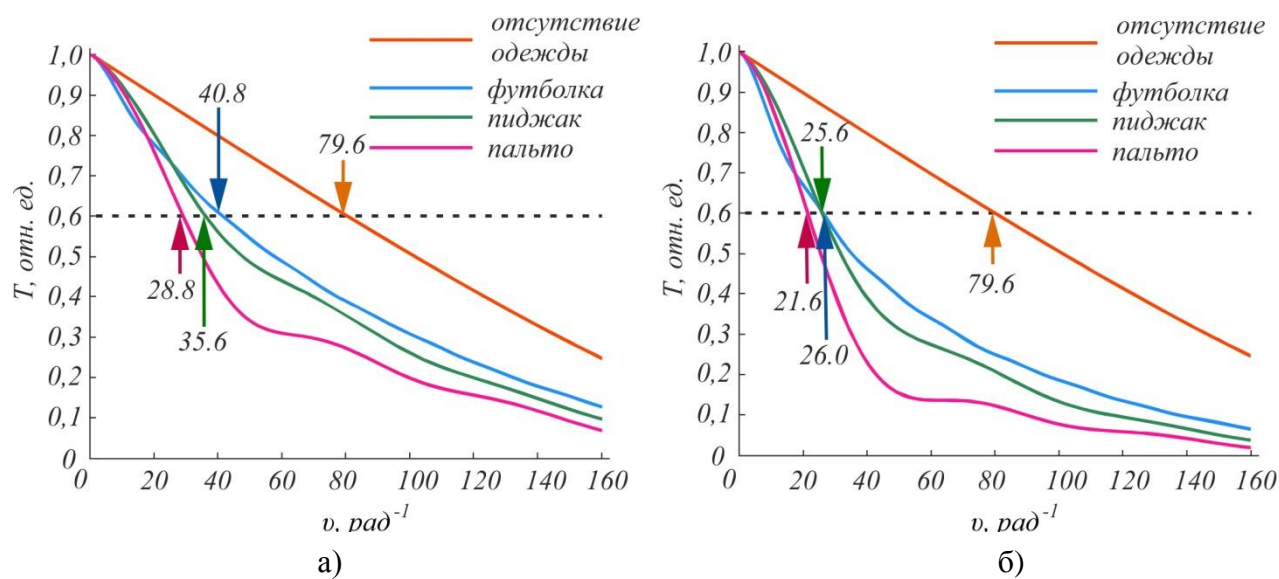
Для подтверждения результатов численных расчетов МПФ и разрешающей способности изображающей системы был произведен анализ полученных значений для рассмотренных сред в активном и пассивном режимах работы и определена разрешающая способность изображающей системы в каждом случае. Значение порогового контраста в соответствии с приведенным численным расчетом было принято равным 0,6. Сравнение полученных во второй главе результатов численных расчетов с экспериментальными значениями показало, что предложенный методик расчета позволяет с большой достоверностью моделировать МПФ изображающей системы, а также вычислять ее разрешающую способность (Рис. 10), осуществляя в дальнейшем оценку качества работы ТГц изображающих систем и влияния на него рассеивающей среды. Полученные значения разрешающей способности в результате численных расчетов и экспериментальных исследований приведены в Таблице 1. Средняя погрешность численного расчета не превышала 15%.

Представленные результаты экспериментальных исследований индикатрисы рассеяния и формирования изображений в ТГц диапазоне при наблюдении через рассеивающие среды подтвердили результаты применения предложенного в диссертации методика расчета характеристик рассеяния структурированных сред и параметров изображающих систем. Полученные значения МПФ и разрешающей способности также подтвердили предположение о линейности ТГц изображающей системы, сделанное во второй главе.

Таблица 1.
Разрешающая способность изображающей системы, результаты численного расчета (расч.) и экспериментальных (эксп.) исследований

Тип рассеивающей среды	Разрешающая способность, рад ⁻¹			
	Пассивный режим		Активный режим	
	расч.	эксп.	расч.	эксп.
футболка	26,0	25,2	40,8	38,8
пиджак	25,6	18,8	35,6	38,0
пальто	21,6	24,8	28,8	33,6

Результаты численных расчетов



Результаты экспериментальных измерений

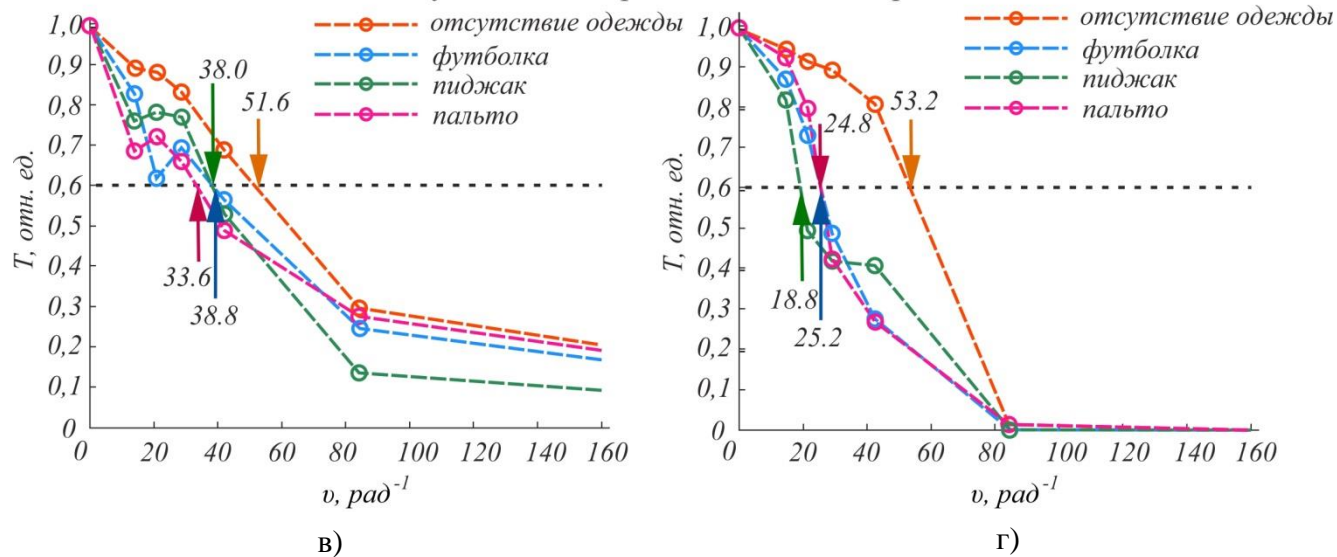


Рис. 10. Результаты численного расчета и экспериментального исследования МПФ в пассивном (а, в) и активном (б, г) режимах работы с учетом образцов рассеивающих сред: ткань футболки, пиджака и пальто

В **общих выводах** сформулированы основные результаты, полученные в ходе проведения работы.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

- Предложен метод расчета индикатрисы рассеяния и углового распределения яркости ТГц излучения, многократно рассеянного структурированными средами, на основе численного решения уравнения переноса излучения. Метод позволяет учесть влияние интерференции волн, рассеянных на частицах структурированной среды.
- Реализованы алгоритм численного моделирования распространения ТГц излучения в случайных и структурированных средах и алгоритм расчета модуляционной передаточной функции и разрешающей способности ТГц изображающей системы. Численные результаты подтвердили влияние структурированных сред на ослабление прошедшего через них ТГц излучения и параметры формируемого изображения.
- Проведена классификация структурированных рассеивающих сред, основанная на анализе многократно рассеянного такими средами ТГц излучения. В зависимости от соотношения параметров среды (толщина слоя, характерный размер частиц, среднее расстояние между частицами) и длины волны ТГц излучения можно применить один из методов определения индикатрисы рассеяния и моделирования переноса излучения в среде, способствующий оптимизации численных расчетов.
- Разработан стенд для экспериментальных исследований характеристик ТГц излучения, рассеянного структурированными средами. Результаты экспериментальных исследований подтвердили влияние упорядоченности частиц среды, размеры которых сравнимы с длиной волны ТГц излучения, на появление эффектов локализации волн рассеянного излучения.
- Разработана система синтеза изображений в ТГц диапазоне, осуществляющая обработку изображений, формируемых изображающей системой в активном и пассивном режимах работы. Экспериментально показано, что синтез изображения позволяет использовать высокое пространственное разрешение за счет работы в пассивном режиме и высокий контраст изображений на низких пространственных частотах за счет работы в активном режиме.
- Экспериментально полученные значения модуляционных передаточных функций и разрешающей способности, согласующиеся с данными численных расчетов, позволяют обосновать использование теории линейных систем для анализа характеристик ТГц изображающих систем.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

1. BWO based THz imaging system / A. N. Perov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2014. Vol. 486, № 1. P. 012027. (0,57 п.л./ 0,45 п.л.).
2. Scattering in structured two-layered medium / I. N. Dolganova [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2015. Vol. 584, № 1. P. 012019. (0,69 п.л./ 0,52 п.л.).
3. Peculiarity of Terahertz Waves Scattering / I. N. Dolganova [et al.] // International Journal of High Speed Electronics and Systems. 2015. Vol. 24. P. 1520002. (0,69 п.л./ 0,55 п.л.).
4. A hybrid continuous-wave terahertz imaging system / I. N. Dolganova [et al.] // Review of Scientific Instruments. 2015. Vol. 86. P. 113704. (0,69 п.л./ 0,54 п.л.).
5. Combined terahertz imaging system for enhanced imaging quality / I. N. Dolganova [et al.] // Optical and Quantum Electronics. 2016. Vol. 48, № 6. P. 325. (0,92 п.л./ 0,75 п.л.).
6. Problem of light scattering in complex media / E. V. Yakovlev [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2015. Vol. 584. № 1. P. 012025. (0,46 п.л./ 0,25 п.л.).
7. Impact of structure geometry on scattering in partially-ordered media / I. N. Fokina [et al.] // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2014. Vol. 149. P. 108 – 116. (1,04 п.л./ 0,98 п.л.).
8. Scattering of terahertz radiation in thin layers of dielectric materials / I. N. Fokina [et al.] // Proceedings of SPIE. 2013. Vol. 8846. P. 88460A. (0,69 п.л./ 0,45 п.л.).
9. Исследование возможности использования терагерцевых изображающих систем для медицинской диагностики / К. И. Зайцев [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2012. №. 4. С. 45–64. (0,61 п.л./ 0,21 п.л.).
10. Radiation scattering on growing ordered structures / I. N. Dolganova [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 673, № 1. P. 012011. (0,57 п.л./ 0,40 п.л.).
11. Neganova A. S., Dolganova I. N., Karasik V. E. Numerical simulations of radiation transfer in partially-ordered stratified media using Monte Carlo methods // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 672, № 1. P. 012001. (0,69 п.л./ 0,50 п.л.).
12. The active-passive continuous-wave terahertz imaging system / I. N. Dolganova [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 735. № 1. P. 012075. (0,69 п.л./ 0,50 п.л.).