

# Неразрушающая терагерцовая дефектоскопия конструкционных материалов методом безлинзовой визуализации

А.В. Перевалов, Д.А. Пидотова, А.И. Бердюгин, А.В. Бадьин, Д.С. Кателина, А.К. Берзин,  
К.В. Дорожкин

Томский государственный университет

**Аннотация:** в данной статье описывается программная реализация методов восстановления волновых параметров объектных изображений когерентной дифракционной визуализации. В работе осуществлена апробация представленного программного обеспечения по модельным данным. Проведена численная апробация птихографического метода визуализации в ТГц диапазоне. Продемонстрирована возможность обнаружения в объёме образца непоглощающего дефекта на фазовом распределении объектной функции.

**Ключевые слова:** ТГц, неразрушающий контроль, визуализация дефектов, птихография

## 1. Введение

В ряде технологий техники используются конструкционные материалы такие как сплавы меди, алюминия, или различные полимеры. Наибольший интерес представляют последние, так как являются более простыми в механической обработке и позволяют производить отливку готового изделия. В аддитивном производстве используются конструкции из термопластичных материалов с неоднородным заполнением, которые представляют оболочку с перекрёстными рёбрами жёсткости в внутреннем заполнении. Это позволяет снизить затраты материала и массу готового изделия. В настоящее время прослеживаются тенденции к ускорению времени производства объектов FDM технологии, при этом главным путём оптимизации является компенсация инерционности механики принтера за счёт алгоритмических решений, а также повышения скорости печати внутреннего заполнения. Это приводит к повышению количества дефектов, возникающих при производстве, часть из которых располагается во внутреннем объёме изделия и не поддаётся обнаружению путём внешнего осмотра.

Сегодня развиваются методы терагерцовой [1,2] дефектоскопии конструкционных материалов в совокупности с алгоритмами искусственного интеллекта [3-5], преимущественно оценивают вероятность локализации дефекта в анализируемом объекте [6,7].

Для верификации полученного результата работы алгоритма требуется их уточнение с использованием методов фаза-контрастной визуализации, таких как голография и птихография. Данные методы позволяют обнаруживать слабоконтрастные неоднородности внутри объекта с высоким пространственным разрешением. Несмотря на высокое развитие метода голографии, имеются ограничения его применимости, связанные с размерами исследуемого объекта и применяемой квазиоптической схемой [8]. Одним из путей преодоления этих ограничений является использование безлинзовой визуализации на основе метода цифровой птихографии.

## 2. Используемые методы

Птихография представляет собой совокупность принципов и методик натурной визуализации произвольных объектов, позволяющая восстановить по совокупности дифракционных изображений, полученных из эксперимента, волновые параметры объекта и зондирующей функции, характеризующей источник излучения. Центральная идея птихографии [9] заключается во введении первоначально полностью или частично известного источника излучения (как правило, это поле произвольного излучателя, ограниченного диафрагмой), при помощи которого производится поочерёдное сканирование объекта. На некотором расстоянии от объекта должен располагаться детектор, регистрирующий дифракционную картину прошедшего излучения.

Восстановление изображение объекта производится при помощи вычислительных алгоритмов, одним из которых является метод extended Ptychographical Iterative Engine (ePIE) [10]. Он позволяет по заданным начальным приближениям зондирующей волны и объектной функции последовательно получить комплексное изображение объекта. В каждой итерации алгоритма по текущим значениям  $O_j$  и  $P_j$  рассчитывается функция, называемая выходной волной  $f_j(r)$ . Она представляет собой амплитудно-фазовое распределение электромагнитной волны, распространяющейся в направлении детектора:

$$f_j(r) = O_j(r)P_j(r - r_j), \quad (5)$$

где  $f_j$  – электромагнитное поле (далее поле), прошедшее через диафрагму и провзаимодействовавшее с образцом (выходная волна),  $P_j$  –  $j$ -ое уточнение распределения амплитуды и фазы поля диафрагмы на поверхности объекта (зондирующая волна),  $O_j$  –  $j$ -ое уточнение распределения функции, искажающей амплитуду и фазу поля зондирующей волны (объектная функция),  $r$  – радиус-вектор точки в плоскости объекта,  $r_j$  – радиус-вектор  $j$ -го смещения диафрагмы,  $j$  – порядковый номер итерации алгоритма.

На рисунке 1 представлена функциональная схема программной реализации метода.

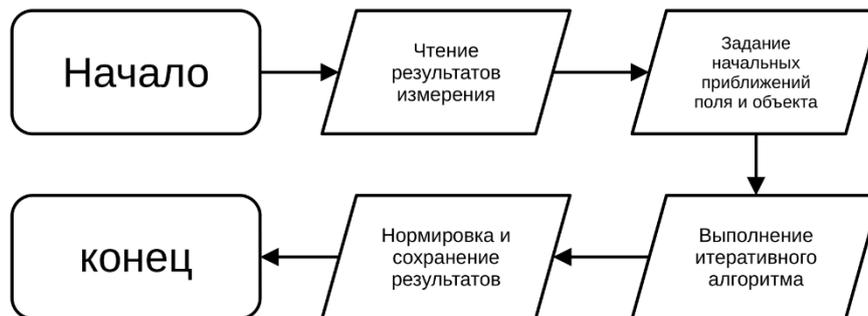
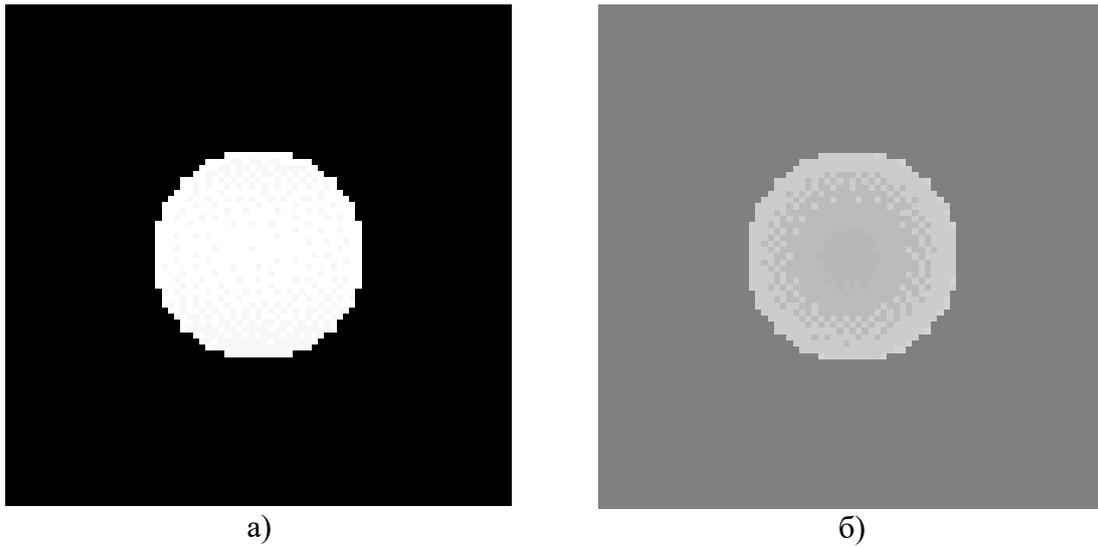


Рисунок 1. Двумерное распределение интенсивности прошедшего через образец излучения рупора

## 3. Полученные результаты

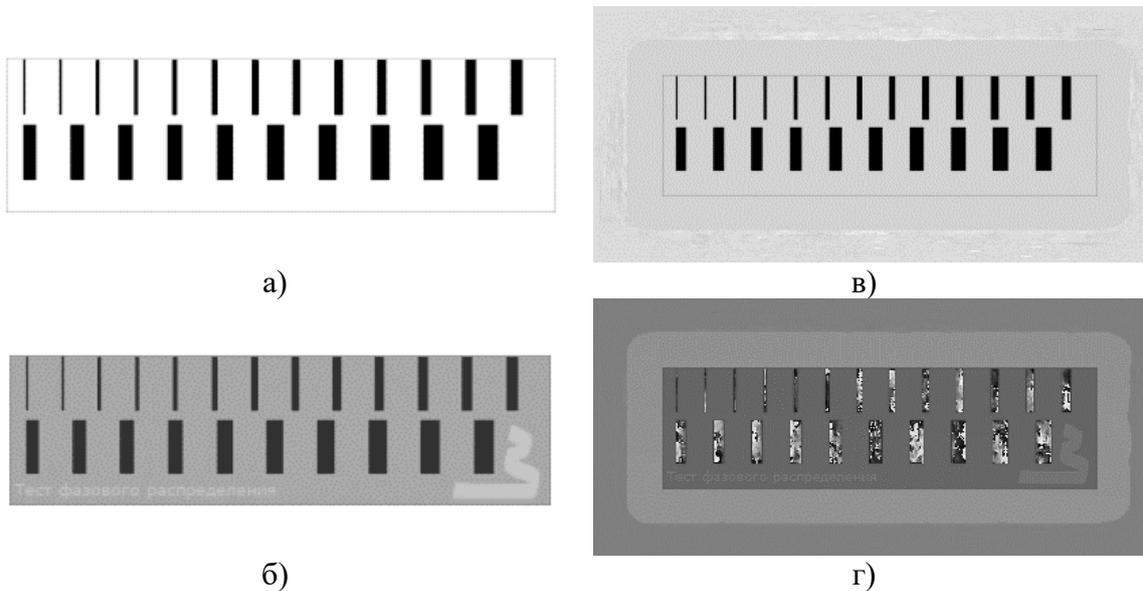
Для апробации предложенного метода исследования объекта был сгенерирован набор дифракционных картин для схемы птихографа с излучателем в виде рупора размерами раскрыва 3x5 мм, работающего на основном виде колебаний. На расстоянии 30 см от него расположена ограничивающая диафрагма диаметром 17 мм. На рисунке 2 изображено амплитудное и фазовое распределение напряжённости электрического поля за диафрагмой, которое представляет собой комплексную зондирующую функцию.



а) – двумерное распределение амплитуды; б) – двумерное распределение фазы

**Рисунок 2.** Комплексная зондирующая функция

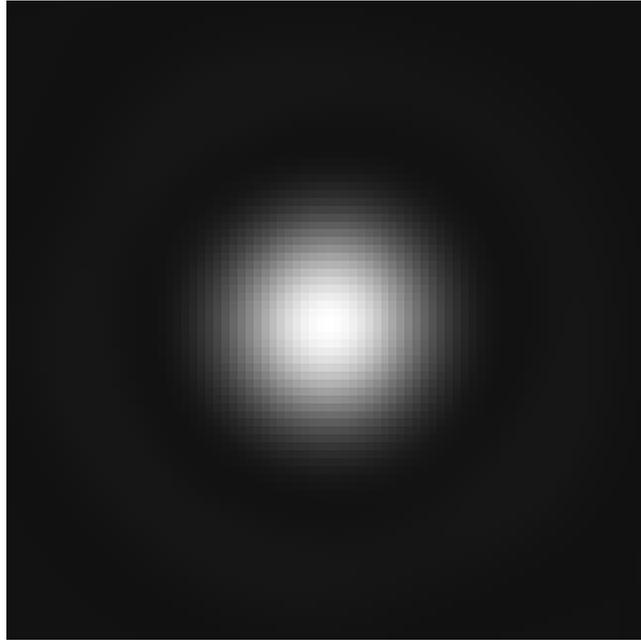
В качестве фаза-контрастного объекта выбран образец, предложенный для натурального эксперимента (рисунок 3а,б). В его объём внесена неоднородность, не влияющая на интенсивность прошедшего излучения (рисунок 3).



а, в) – двумерное распределение амплитуды; б, г) – двумерное распределение фазы

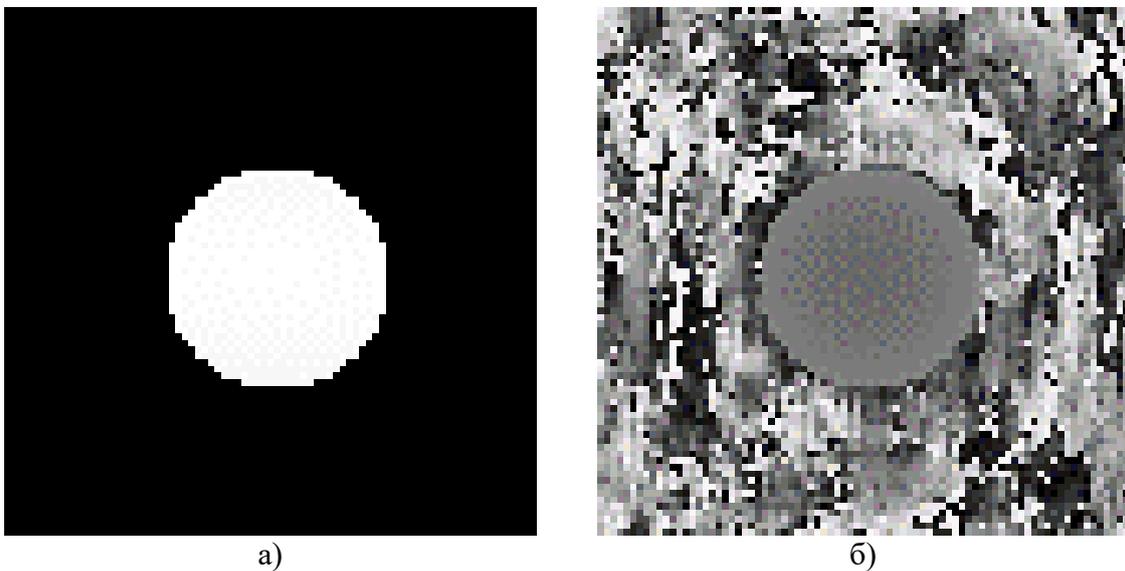
**Рисунок 3.** Комплексная объектная функция, используемая при моделировании эксперимента (а, б), восстановленная комплексная объектная функция (в, г)

При помощи быстрого преобразования Фурье было рассчитано распространение дифрагированного излучения для каждого положения объекта относительно диафрагмы. Пример полученной дифрагированной картины представлен на рисунке 4.



**Рисунок 4.** Двумерное распределение интенсивности прошедшего через образец излучения рупора

В ходе выполнения программы для достижения критерия останова потребовалось 17 итераций, за которые удалось восстановить комплексное изображение объекта (рисунок 3 в,г) и зондирующую функцию 5.



а) – двумерное распределение амплитуды; б) – двумерное распределение фазы

**Рисунок 5.** Восстановленная комплексная зондирующая функция

На полученных изображениях видно соответствие заданным при генерации параметрам. На фазовом распределении объекта отчётливо видно рисунок не поглощающего дефекта, при этом данное изображение не имеет своей тени на амплитудном распределении, что указывает на их независимость друг от друга. Можно заметить, что в областях с малым значением амплитуды восстановленных функций наблюдается шумоподобное распределение фазы. Данный факт можно объяснить малой амплитудой излучения в данной области, что приводит к росту

ошибки восстановления фазы. Это указывает на ограниченность метода при исследовании материалов, обладающих высоким коэффициентом поглощения в ТГц диапазоне.

### 3. Заключение

В результате работы представлена программная реализация методов восстановления волновых параметров объектных изображений когерентной дифракционной визуализации. Осуществлена апробация представленного программного обеспечения по модельным данным. Проведена численная апробация птихографического метода визуализации в ТГц диапазоне. Продемонстрирована возможность обнаружения в объёме образца не поглощающего дефекта на фазовом распределении объектной функции.

Разработанный метод предоставляет возможность обнаруживать дефекты в объёме объектов со слабым контрастом диэлектрической проницаемости. Данное преимущество позволяет применять данный метод для задач неразрушающей диагностики композиционных корпусов радиоэлектронных приборов.

К недостаткам метода можно отнести время затратный процесс получения набора цифровых птихограмм на измерительной установке непрерывно волнового ТГц спектрометра особенно при использовании точечного детектора.

Исследование выполнено за счет **гранта Российского научного фонда (проект № 24-79-00314, [https://rscf.ru/prjcard\\_int?24-79-00314](https://rscf.ru/prjcard_int?24-79-00314))**

#### Список литературы

1. Aizheng L. I. et al. Study on non-destructive detection technology of water content and defects in construction materials based on transmission terahertz system //Journal of Building Engineering. – 2025. – С. 112452.
2. Ibrahim M. E. et al. Nondestructive testing of defects in polymer–matrix composite materials for marine applications using terahertz waves //Journal of Nondestructive Evaluation. – 2021. – Т. 40. – №. 2. – С. 37.
3. Farhad A., Pyun J. Y. Terahertz meets AI: The state of the art //Sensors. – 2023. – Т. 23. – №. 11. – С. 5034.
4. Park H., Son J. H. Machine learning techniques for THz imaging and time-domain spectroscopy //Sensors. – 2021. – Т. 21. – №. 4. – С. 1186.
5. Liu H. et al. Supervised Semantic Segmentation of Murine THz Spectroscopy Images with Imprecise Annotations //2024 IEEE 18th International Conference on Semantic Computing (ICSC). – IEEE, 2024. – С. 69-76.
6. Bauer M. et al. Fast FMCW terahertz imaging for in-process defect detection in press sleeves for the paper industry and image evaluation with a machine learning approach //Sensors. – 2021. – Т. 21. – №. 19. – С. 6569.
7. Zhang Z., Ding D., Wang L. THz Wave Defect Detection Technology Based on Attention Autoencoder and Semisupervised Ladder Network //IEEE Sensors Journal. – 2023. – Т. 23. – №. 8. – С. 8961-8972.
8. Anitha V., Beohar A., Nella A. THz imaging technology trends and wide variety of applications: a detailed survey //Plasmonics. – 2023. – Т. 18. – №. 2. – С. 441-483.
9. Волновой пакет в фазовой проблеме оптики и птихографии / Попов Н. Л. и др. // Успехи физических наук. – 2020. – Т. 190., №. 8. – С. 820–828.
10. Maiden A. M. An improved ptychographical phase retrieval algorithm for diffractive imaging / Maiden A. M., Rodenburg J. M. // Ultramicroscopy. – 2009. Т. 109, №.10.– С. 1256–1262.