

## Применение корреляционного анализа паттернов пространственного модулятора терагерцового излучения для повышения качества фантомных изображений

Т.В. Благова\* И.Ш. Хасанов†

*Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук  
Россия, 117342, Москва, ул. Бутлерова, 15*

(Поступила в редакцию 22.07.2024; подписана в печать 23.07.2024)

Терагерцовое (ТГц) излучение обладает уникальными свойствами, делающими его перспективным для широкого спектра применений, включая медицинскую диагностику, неразрушающий контроль и безопасность. Однако существующие многопиксельные камеры имеют ограничения по чувствительности и разрешению. Метод фантомных изображений (ФИ), использующий однопиксельный приемник и пространственный модулятор света (ПМС), позволяет преодолеть эти ограничения. Одной из особенностей ТГц ПМС является то, что размер пикселей сопоставим с длиной волны, что может приводить к значительным дифракционным искажениям. С целью повышения качества восстанавливаемых изображений в работе проводится оптимизация метода фантомных изображений при помощи корреляционного анализа паттернов пространственного модулятора терагерцового излучения. В частности, анализируется эффективность выбора паттернов освещения, основанных на различных ортогональных матрицах, таких как матрицы дискретного Фурье-преобразования, дискретного косинусного преобразования, преобразования Адамара и преобразования Хаара. Также показано, что корреляционный анализ позволяет выбрать стратегию субпиксельного сканирования для получения изображений сверхвысокого разрешения. Таким образом, показано, что корреляционный анализ является эффективным способом оценки качества оптических систем для формирования фантомных изображений.

PACS: 07.57.-c, 42.30.Va.

УДК: 535-1

Ключевые слова: фантомное изображение, терагерцовое излучение, пространственный модулятор света, корреляция, ортогональные матрицы, субпиксельное сканирование.

### ВВЕДЕНИЕ

Терагерцовое (ТГц) излучение, охватывающее частоты от 0.1 до 10 ТГц и длины волн от 30 мкм до 1 мм, остается относительно малоизученным и слабо используемым в прикладных технологиях. Это явление известно как «терагерцовый провал» (THz gap), который характеризуется отсутствием эффективных источников излучения и приемников.

В видимом и инфракрасном диапазонах широко применяются CCD и CMOS фотоприёмники на основе полупроводников, таких как InGaAs и HgCdTe, а в радиочастотном диапазоне — антенные решётки и радиометры. Однако для ТГц диапазона долгое время не существовало коммерчески доступных многопиксельных камер с достаточным разрешением и чувствительностью. Современные ТГц решения, такие как матрицы микроболометров, имеют свои ограничения: низкая чувствительность, малое число пикселей и ограниченное поле зрения, необходимость криогенного охлаждения и высокая стоимость, что делает их непрактичными для широкого применения. В результате разработка многопиксельных камер для ТГц излучения остаётся сложной задачей, требующей значительных усилий и инноваций [1].

Для преодоления ограничений, связанных с использованием ТГц-камер, было предложено использовать

метод фантомных изображений (ghost imaging) [2]. Этот метод позволяет получать изображения объектов с использованием однопиксельного приёмника, обладающего лучшими характеристиками чувствительности и более низким уровнем шума по сравнению с ТГц и ИК многопиксельными камерами. Отметим, что метод ФИ может быть реализован, как с помощью классического света, так с помощью квантовых источников света [3–5], для которых наш анализ не применим. Однако ввиду сложности абсолютных измерений энергетических параметров ТГц излучения [6], наиболее практичным на данный момент способом реализации метода ФИ в ТГц диапазоне является использованием пространственной модуляции классического света. Замена многопиксельных камер пространственными модуляторами света снижает стоимость оптической системы [7] и увеличивает скорость и соотношение сигнал/шум за счёт приёма интегрального сигнала от объекта для построения изображения по сравнению с другими сканирующими системами, которые за каждое измерение получают информацию только об отдельных участках изображения. Отсутствие механических перемещений приёмника в методе ФИ также позволяет повысить надёжность и скорость проводимых измерений.

Вместо механического сканирования в методе фантомных изображений используется пространственная модуляция, которая может быть реализована как классическим методом с помощью спекл-полей [8–10], так и с помощью специального устройства — пространственного модулятора света. За последние годы в ТГц-

\* [blagova.tv@ntcup.ru](mailto:blagova.tv@ntcup.ru)

† [khasanov@ntcup.ru](mailto:khasanov@ntcup.ru)

диапазоне было предложено множество типов пространственных модуляторов света на различных физических принципах [11]: микрзеркала, управляемые электростатическими силами, для отклонения ТГц излучения; жидкокристаллические модуляторы, контролируемые ориентацию молекул жидких кристаллов под воздействием электрического поля для изменения показателя преломления и модуляции ТГц волн [12]; модуляторы на основе графена и углеродных нанотрубок [13], под действием напряжения меняющие концентрации носителей заряда, что позволяет модулировать поглощение ТГц излучения; полупроводниковые модуляторы, использующие электрическое смещение или оптическую накачку для изменения концентрации носителей заряда и модуляции ТГц-волн [14]; спинтронные ТГц-излучатели, использующие эффект Холла для преобразования спинового тока в электрический для генерации ТГц-излучения [15].

Однако ввиду различных технологических ограничений получение высокого разрешения и высокой скорости модуляции по-прежнему остаётся актуальной задачей. При этом высокая скорость модуляции, необходимая для того, чтобы сократить время измерений, число которых в методе ФИ сопоставимо с числом пикселей модулятора, связана с ограничением на максимальный размер пикселя модулятора. Так как, как правило, увеличение размера пикселя приводит к уменьшению его быстродействия и стабильности работы. Однако, когда размеры пикселей сопоставимы с длиной волны ТГц-излучения, дифракционные эффекты начинают доминировать, приводя к размытию и искажению изображений, что ограничивает минимально допустимый размер пикселя. Поэтому задача выбора размера пикселя модулятора играет ключевую роль для метода фантомных изображений в ТГц-диапазоне. Эту задачу можно решить с помощью корреляционного анализа влияния размера пикселя пространственного модулятора на качество фантомных изображений. Такой анализ позволит оптимизировать оптическую систему и улучшить пространственное разрешение изображений, что критично для успешного применения ТГц-визуализации в медицине, безопасности и научных исследованиях. Таким образом, целью данного исследования является показать то, как применение корреляционного анализа позволяет повысить качество фантомных изображений.

## 1. ТЕОРИЯ

Метод фантомных изображений — это метод восстановления изображения объекта путем расчета корреляционной функции второго порядка между пространственным распределением интенсивности опорного пучка и интегральной интенсивностью света после объекта. В данном методе механическое сканирование заменяется статистическим набором различных пространственных распределений, проецируемых с ПМС на объект (рис. 1) [16].

Изображение можно восстановить как результат ста-

стистической суммы паттернов:

$$O(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} S_i P_i(x', y'), \quad (1)$$

где  $S_i = \iint M(x, y) P'_i(x, y) dx dy$  — интегральный сигнал, измеренный однопиксельным приёмником,  $M(x, y)$  — функция отклика объекта.

Одним из ключевых аспектов при реализации метода фантомных изображений является выбор оптимального набора паттернов для освещения объекта. Это позволяет не только оптимизировать процесс измерений, но и детектировать объекты с заданными пространственными частотами. В простейшем случае набор измерений с различными пространственными распределениями можно реализовать с помощью случайных распределений интенсивности, проецируемых с ПМС. Однако такая стратегия требует значительного количества измерений, что увеличивает время получения одного изображения и поэтому не является оптимальной.

Для уменьшения количества измерений необходимо, чтобы каждое измерение несло новую информацию об объекте. Этой цели можно достичь, если каждый паттерн освещения будет иметь собственный набор пространственных частот, не пересекающийся с другими, или, говоря на языке математики, если такой набор будет ортогональным. В общем случае такой набор пространственных частот можно представить как набор ненулевых векторов, образующих базис. На основе ортогональных базисов построено множество преобразований, используемых в науке и технике для фильтрации сигналов, кодирования, хранения и передачи изображений. Среди них можно выделить дискретное Фурье-преобразование, дискретное косинусное преобразование, преобразование Адамара, вейвлет-преобразования и т.д.

Для получения фантомного изображения из каждой строки или столбца ортогонального базиса формируется независимый паттерн для освещения объекта. Проецирование паттернов с пространственного модулятора света на объектную плоскость требует использования оптической системы, которая в идеальном случае может быть представлена в виде тонкой линзы. Изображение паттерна, формируемое линзой, можно найти путем свертки с импульсным откликом линзы [17]:

$$h(x, y) = \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot \lambda^2 \cdot d_1 \cdot d_2} \cdot \frac{2 \cdot J_1(\beta)}{\beta}, \quad (2)$$

где  $\beta = \frac{\pi \cdot D \cdot \rho}{\lambda \cdot d_2}$ ,  $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ ,  $J_1$  — функция Бесселя первого порядка;  $D$  — диаметр апертуры линзы;  $\lambda$  — длина волны излучения;  $d_1$  — расстояние от модулятора до линзы;  $d_2$  — расстояние от линзы до объектной плоскости.

При формировании изображения паттерна используется  $4f$ -схема, поэтому  $d_1 = d_2 = 2f$ , где  $f$  — фокусное расстояние линзы.

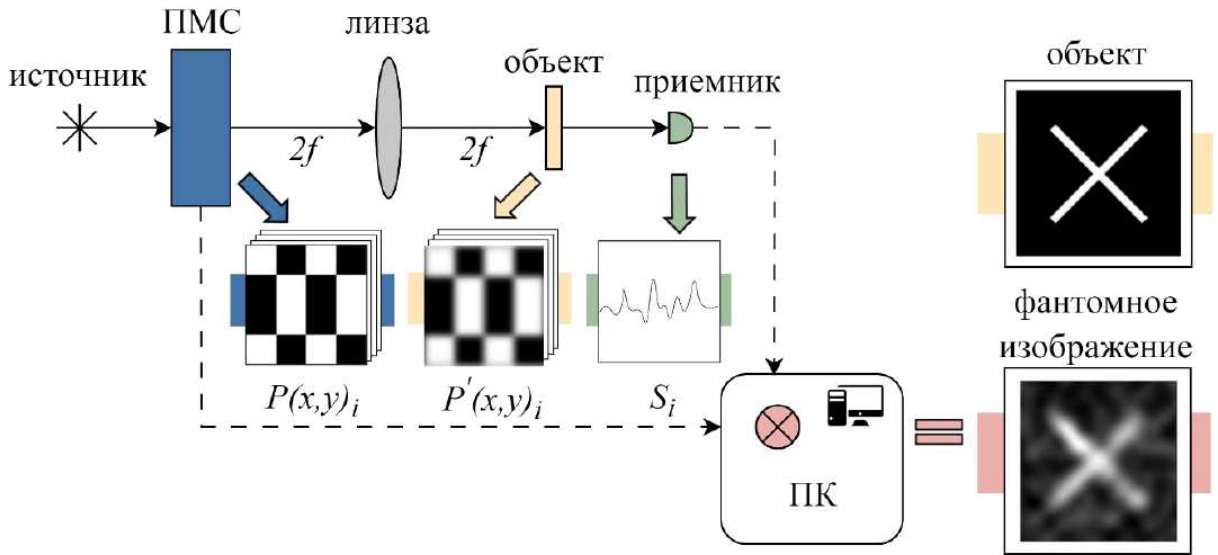


Рис. 1. Схема получения фантомных изображений объекта с помощью однопиксельного приёмника

Для нахождения проекции паттерна модулятора в объектную плоскость рассчитывается свертка:

$$P'(x, y) = P(x, y) \times h(x, y). \tag{3}$$

Тогда само фантомное изображение имеет вид:

$$O(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \left( \int \int M(x, y) P(x, y) h(x, y) dx dy \right) P_i(x', y'). \tag{4}$$

На качество фантомных изображений влияет множество факторов, не только статических, как аберрации, но и динамических, как набор сменяемых паттернов освещения. В настоящее время не существует единой методики оценки качества оптических систем формирования фантомных изображений. Нами было продемонстрировано [18], что корреляционный анализ является эффективным средством для оценки влияния различных типов аберраций на качество фантомных изображений. Коэффициент корреляции между паттерном в плоскости модулятора и паттерном в объектной плоскости позволяет оценить степень дифракционных искажений, что напрямую влияет на качество фантомного изображения. Коэффициент корреляции между паттернами не зависит от свойств конкретного объекта, изображение которого необходимо получить, и поэтому может быть использован в качестве целевой функции в задачах оптимизации.

Коэффициент линейной корреляции рассчитывается как:

$$r_{XY} = \frac{cov_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y}, \tag{5}$$

где  $\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$  — стандартное отклонение величины;  $cov_{XY} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (X_t - \bar{X})(Y_t - \bar{Y})$  —

ковариация. Коэффициент корреляции может принимать значения от  $-1$  до  $1$ . При этом значение равно  $1$  означает, что  $X$  и  $Y$  линейно пропорциональны друг другу, и в тривиальном случае равны друг другу. При этом значение коэффициента корреляции равное  $0$  подразумевает отсутствие линейной зависимости между данными.

## 2. КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ПАТТЕРНОВ ПРОСТРАНСТВЕННОГО МОДУЛЯТОРА

Нами был проведен корреляционный анализ паттернов пространственного модулятора в одномерном случае с числом пикселей равным  $64$ , результаты которого представлены на рис. 2. Из графиков среднего коэффициента корреляции проекции паттернов с исходным паттерном на модуляторе видно, что в условиях, когда размер пикселя модулятора превышает радиус диска Эйри, линейный коэффициент корреляции стремится к  $1$ . Такие условия обычно соответствуют случаю пространственной модуляции в видимом диапазоне. В терагерцовом диапазоне размер пикселя ПМС зачастую может быть меньше диска Эйри. В этом случае коэффициент корреляции ниже, что негативно сказывается на качестве фантомных изображений. Поэтому ока-

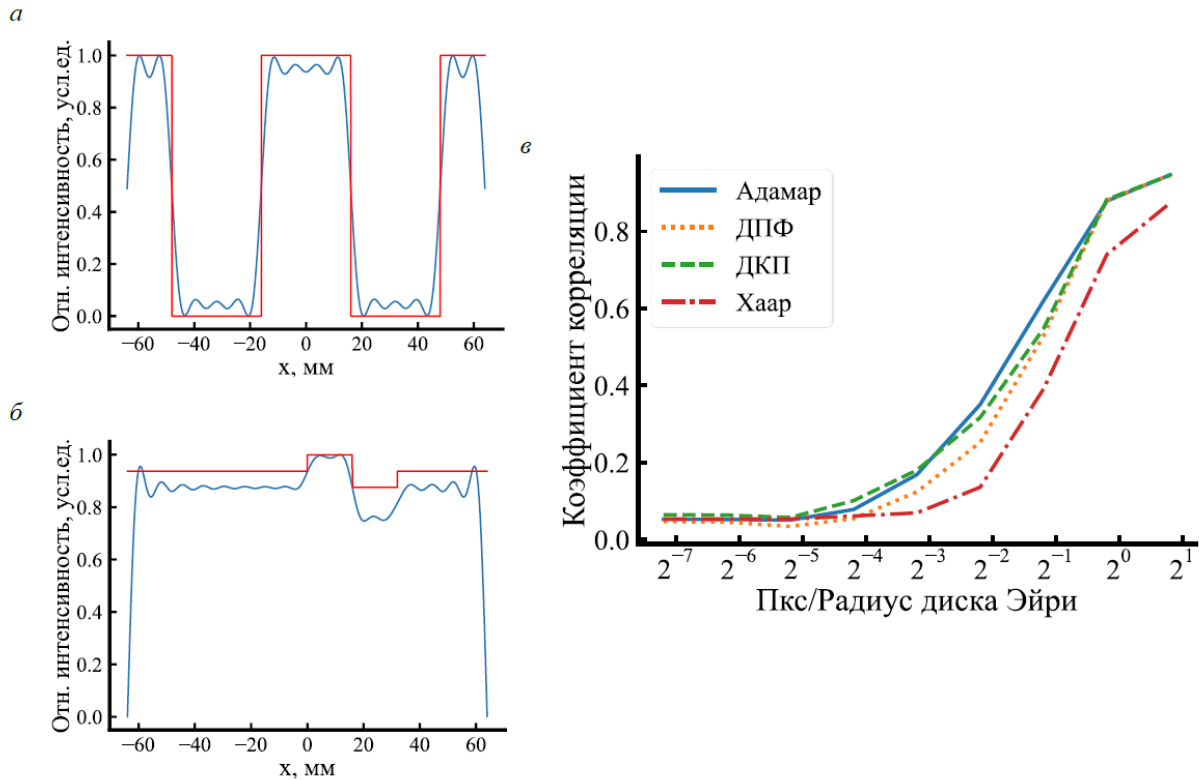


Рис. 2. Сравнение качества передачи оптической системой различных паттернов на основе ортогональных матриц преобразований: *a* – Адамара; *б* – Хаара; *в* – зависимость коэффициента корреляции от отношения размера пикселя модулятора к радиусу диска Эйри

зывается важным вид выбранных паттернов. Поэтому в ТГц-диапазоне несмотря на то, что паттерны могут быть выбраны из ортогонального базиса, их коэффициент корреляции может различаться, что вызвано дифракционными искажениями, особенно для высоких пространственных частот. Например, паттерны на основе матриц преобразования Хаара в среднем имеют меньший коэффициент корреляции, чем паттерны на основе матриц преобразования Адамара (рис. 2, *в*).

Зависимость среднеквадратической ошибки восстановленных фантомных изображений от отношения размера пикселя модулятора к радиусу диска Эйри, а также примеры восстановленных фантомных изображений представлены на рис. 3, *а, б*. Из результатов анализа видно, что паттерны, сформированные на основе базиса преобразования Хаара, приводят к большим ошибкам в фантомном изображении (рис. 3, *в*), так как хуже передаются оптической системой, как было показано ранее.

Отметим, также, что на основе корреляционного анализа возможно ранжировать паттерны из одного и того же ортогонального базиса по уровню искажений, вносимых дифракцией. Это позволяет использовать при восстановлении фантомных изображений паттерны с наибольшим коэффициентом корреляции, что способствует оптимизации качества фантомных изоб-

ражений, особенно в контексте отбора паттернов при неполном семплировании в алгоритмах сжимающих измерений.

Ещё одним примером применения корреляционного анализа является выбор стратегии микросканирования для достижения сверхразрешения. Одним из вариантов микросканирования является субпиксельное сканирование за счет перемещения приемника излучения на расстояния, кратные размеру пикселя [19]. Таким образом, изначально данный вариант сканирования предполагает использование многопиксельной камеры. При этом использование камеры несет в себе описанные ранее недостатки, а также приводит к неточностям, связанным с ее механическими перемещениями. В методе фантомных изображений при субпиксельном сканировании однопиксельный приёмник остаётся неподвижен и происходит «виртуальное» перемещение паттернов модулятора, посредством смещения проецируемых паттернов. Существуют две основных стратегии субпиксельного сканирования [20]: полное и четвертичное.

При полном сканировании субпиксель модулятора заполняется целиком, что позволяет восстанавливать несколько фантомных изображений с низким разрешением. Эти изображения затем комбинируются с учётом их смещений для восстановления изображения с более высоким разрешением. При четвертичном сканирова-

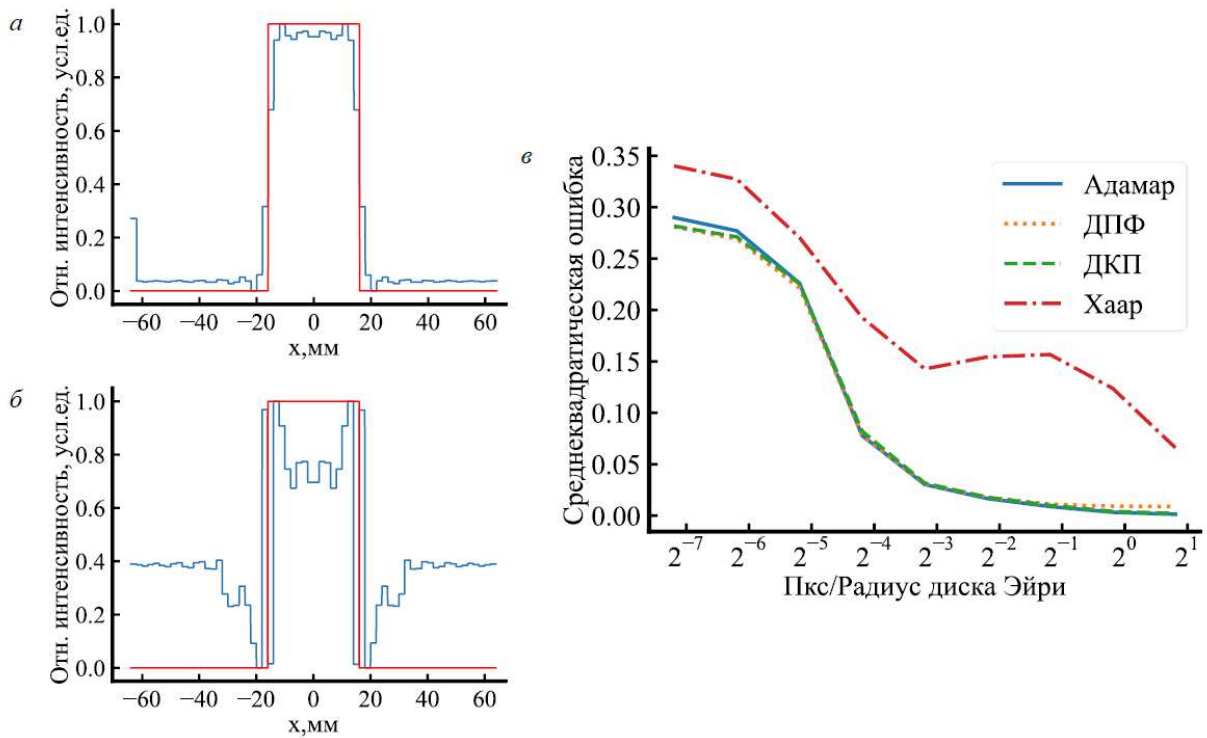


Рис. 3. Сравнение качества фантомных изображений при использовании различных видов ортогональных базисов: вид фантомного изображения совмещенного с видом объекта, при использовании матриц преобразования *a* — Адамара; *б* — Хаара; *в* — среднеквадратическая ошибка восстановленных фантомных изображений объекта

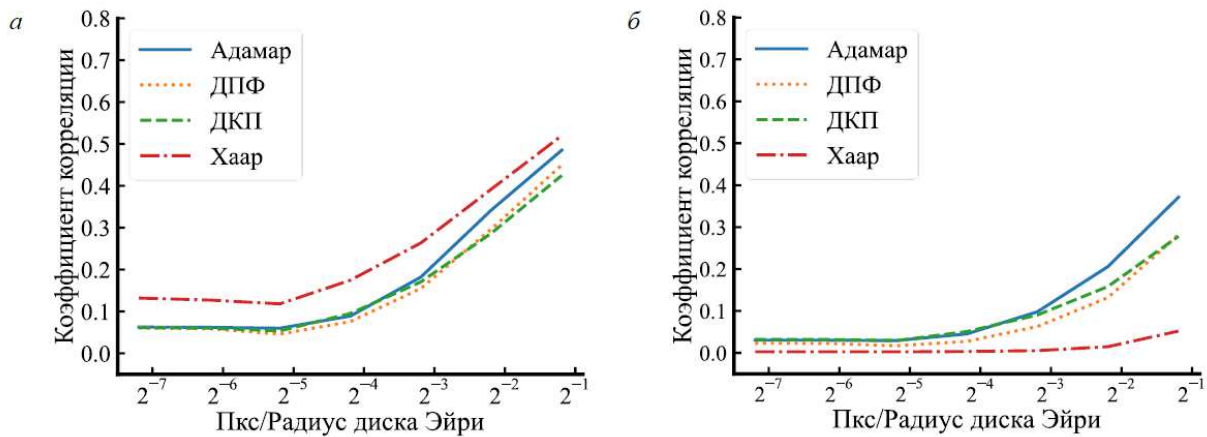


Рис. 4. Сравнение качества передачи оптической системой различных паттернов на основе ортогональных матриц преобразований при разных стратегиях субпиксельного сканирования: *a* — полное; *б* — четвертичное

нии субпиксель модулятора заполняется на четверть (половину в одномерном случае), но также позволяет получить четыре фантомных изображения с низким разрешением, которые комбинируются в одно изображение высокого разрешения.

Нами было проведено моделирование проецирования паттернов модулятора на объект при различных вариантах субпиксельного сканирования. Результаты в ви-

де зависимостей среднего коэффициента корреляции от отношения размера субпикселя к радиусу диска Эйри представлены на рис. 4. Из данных зависимостей можно сделать вывод о том, что полное сканирование показывает лучшие результаты по сравнению с четвертичным, так как не происходит дополнительного повышения пространственных частот в паттернах модулятора.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была проведена оптимизация метода фантомных изображений в терагерцовом диапазоне с помощью корреляционного анализа паттернов пространственного модулятора света с целью повысить качество восстановленных изображений. Метод фантомных изображений, основанный на использовании однопиксельного приёмника и различных пространственных распределений, проецируемых с модулятора света, демонстрирует значительный потенциал для преодоления существующих ограничений ТГц визуализации, таких как низкая чувствительность, ограниченное разрешение и высокая стоимость оборудования.

Исследование показало, что выбор паттернов освещения играет ключевую роль в оптимизации процесса измерений и повышении качества фантомных изображений. Корреляционный анализ подтвердил, что паттерны, сформированные на основе базиса преобразо-

вания Хаара, менее эффективны из-за преобладания высоких пространственных частот, подверженных искажениям вследствие дифракции.

Было установлено, что корреляционный анализ позволяет обосновать выбор стратегии субпиксельного сканирования. А именно, что полное сканирование обеспечивает лучшее качество фантомных изображений по сравнению с четвертичным, что объясняется отсутствием дополнительного повышения пространственных частот в паттернах модулятора.

Полученные результаты демонстрируют, что применение корреляционного анализа является валидным критерием для оценки качества оптических систем для формирования фантомных изображений.

В перспективе предполагается проанализировать влияние правила отбора паттернов модулятора на основе корреляционного анализа при различных уровнях семплирования на качество фантомных изображений при использовании сжимающих измерений для оптимизации скорости получения изображений.

- 
- [1] *Guerboukha H., Nallappan K., Skorobogatiy M.* // *Adv. Opt. Photonics*. **10**, N 4. 843 (2018).
- [2] *Chan W.L., Charan K., Takhar D. et al.* // *Appl. Phys. Lett.* **93**, N 12. 121105. (2008).
- [3] *Balakin D., Belinsky A.* // *J Russ Laser Res.* **36**, N 6. 608 (2015).
- [4] *Zhang X.C., Shkurinov A., Zhang Y.* // *Nature Photonics*. **11**. 16 (2017).
- [5] *Леонтьев А.А. и др.* // *Письма в ЖЭТФ*. **114**, № 9–10(11). 635 (2021).
- [6] *Сафроненков Д.А., Китаева Г.Х.* // *Письма в ЖЭТФ*. **120**, № 1. 11 (2024).
- [7] *Edgar M.P., Gibson G.M., Padgett M.J.* // *Nat. Photonics*. **13**, N 1. 13 (2019).
- [8] *Khasanov I.Sh. et al.* // *AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics*. **2299**, N 1. 030008 (2020).
- [9] *Leibov L. et al.* // *Sci Rep.* **11**, N 1. 20071 (2021).
- [10] *Аганов Д.П. и др.* // *ЖЭТФ*. **162**, N 2. 215 (2022).
- [11] *Guan S., Cheng J., Chang S.* // *Micromachines*. **13**, N 10. 10 (2022).
- [12] *Kuznetsov S.A., Marcotegui J.A., Lapanik V.I.* *Electrically Tunable Quasioptical Notch Filter Based on a Liquid-Crystal-Metastructure for the Short Millimetre-Wave Range* // *2021 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*. Chengdu, China: IEEE, 2021. 1.
- [13] *Paukov M.I. et al.* // *Ultrafast Science. American Association for the Advancement of Science*. **3**. 0021 (2023).
- [14] *Solyankin P.M. et al.* // *J. Infrared Milli Terahz Waves*. **39**, N 12. 1203 (2018).
- [15] *Никитов С.А. и др.* // *УФН*. **190**. № 10. 1009 (2020).
- [16] *Shapiro J.H.* // *Phys. Rev. A*. **78**, N 6. 061802 (2008).
- [17] *Салех Б., Тейх М.* *Оптика и фотоника. Принципы и применения. Том 1.* Интеллект, 2012.
- [18] *Blagova T.V., Khasanov I.S.* // *J. Phys. Conf. Ser.* **2091**, N 1. 012009 (2021).
- [19] *Khasanov I.S., Blagova T.V.* // *J. Opt. Technol.* **90**, N 11. 691 (2023).
- [20] *Sun M.-J., Edgar M.P., Phillips D.B., Gibson G.M., Padgett M.J.* // *Opt. Express*. **24**, N 10. 10476 (2016).

## Application of correlation analysis of terahertz spatial light modulator patterns to improve the quality of ghost imaging

T.V. Blagova<sup>a</sup>, I.S. Khasanov<sup>b</sup>

<sup>1</sup>*Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences  
Moscow 117342, Russia*

*E-mail: <sup>a</sup>blagova.tv@ntcup.ru, <sup>b</sup>khasanov@ntcup.ru*

Terahertz (THz) radiation has unique properties that make it promising for a wide range of applications, including medical diagnostics, non-destructive testing, and security. However, existing multi-pixel cameras have limitations in sensitivity and resolution. The ghost imaging (GI), which utilises a single-pixel detector and a spatial light modulator (SLM), makes it possible to overcome these limitations. One of the features of THz SLM is that the pixel size is comparable to the wavelength, which can lead to significant diffraction distortions. In order to improve the quality of the reconstructed images, this work optimizes the ghost imaging method using correlation analysis of terahertz

spatial modulator patterns. In particular, the efficiency of the selection of lighting patterns based on various orthogonal matrices, such as discrete Fourier transform, discrete cosine transform, Hadamard transform and Haar transform, is analyzed. It is also shown that correlation analysis enables the selection of subpixel scanning strategy for super-resolution imaging. Thus, it is shown that correlation analysis is an effective way to evaluate the quality of optical systems for ghost imaging.

PACS: 07.57.-c, 42.30.Va.

*Keywords:* image, terahertz radiation, spatial light modulator, correlation, orthogonal matrices, subpixel scanning.

*Received 22 July 2024.*

#### **Сведения об авторах**

1. Благова Татьяна Владиславовна — мл. науч. сотрудник; e-mail: blagova.tv@ntcup.ru.
2. Хасанов Илдус Шевкетович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: khasanov@ntcup.ru.