

УДК 535.8

## КОМПЕНСАЦИЯ ПЕРЕЭКСПОЗИЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ДЛЯ ИТЕРАЦИОННОГО МНОГОПЛОСКОСТНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФАЗЫ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

Циплакова Е.Г. (Университет ИТМО)

Научный руководитель – д.ф.-м.н., доцент Петров Н.В. (Университет ИТМО)

**Введение.** В последние десятилетия ТГц излучение находит все большее применение в задачах визуализации и интравидения благодаря прозрачности многих диэлектриков в ТГц диапазоне, а также сравнительно небольшим длинам волн, которые позволяют получать изображения с разрешением до 100 мкм. Существующие техники количественной фазовой визуализации с источниками непрерывного излучения включают в себя методы цифровой голографии [1-2] и методы восстановления фазы из интенсивности [2-4]. Последние обладают рядом преимуществ, среди которых: (i) однолучевая схема регистрации данных, что делает их надежным методом фазовой визуализации в ТГц диапазоне частот, где мощность большинства доступных источников невелика; (ii) простота юстировки освещающего объекта пучка; (iii) отсутствие мнимого изображения по сравнению с методом осевой голографии [5]. Кроме того, методы восстановления фазы из интенсивности привлекательны тем, что на сегодняшний день хорошо развиты. Существует большое количество техник, которые позволяют при помощи вычислительных методов повышать пространственное разрешение восстанавливаемых распределений [6] и решать проблемы, связанные с разными физическими ограничениями метода поиска фазы из интенсивности [7-10]. В ТГц диапазоне частот применение методов восстановления фазы из интенсивности также возможно, как и в оптической области спектра. Однако в ТГц диапазоне существует ряд ограничений, которые способны затруднить применение хорошо развитых алгоритмов восстановления фазы. Они связаны в первую очередь с меньшей мощностью источников и чувствительностью детекторов, большей длиной волны излучения по сравнению с оптическим диапазоном. В связи с этим разработка новых методов восстановления фазы, ориентированных на применение в ТГц диапазоне частот, является актуальной задачей.

Одним из таких ограничений является малый динамический диапазон одиночных синхронных усилителей по сравнению с динамическим диапазоном сигнала, регистрируемого в схеме на отражение [11]. В случае настройки детектирующей системы для регистрации максимума распределения поля, ее динамического диапазона не хватает для регистрации слабого ТГц сигнала на периферии распределения. Как правило, одиночный синхронный усилитель имеет аппаратное ограничение динамического диапазона около 30 дБ. Существует способ повысить динамический диапазон за счет использования нескольких синхронных усилителей, которые, однако, являются дорогостоящим оборудованием [11]. Целью работы являлась разработка метода компенсации влияния переэкспозиции, присутствующей в распределениях интенсивности из-за использования усилителя с меньшим динамическим диапазоном, чем динамический диапазон сигнала, при регистрации данных в схеме на отражение. Таким образом, разрабатываемый метод позволит использовать один синхронный усилитель в задаче восстановления фазы ТГц волны малой мощности и упростить процедуру сбора данных.

**Основная часть.** Подход к восстановлению фазы из распределений интенсивности, содержащих переэкспонированные участки, основан на итерационном алгоритме многоплоскостного поиска фазы SBMIR (англ. Single Beam Multiple Intensity Reconstruction) [7]. В алгоритме SBMIR для восстановления фазы используется набор дифракционных распределений интенсивности, зарегистрированных на различных расстояниях от объекта. Итерационный поиск фазы основывается на численных методах распространения оценочной функции поля между плоскостями регистрации данных. В каждой плоскости регистрации производится замена вычисленного амплитудного распределения на измеренное, а фаза определяется в ходе последовательных приближений.

В задаче поиска фазы слабого ТГц сигнала, отраженного от объекта, использование одного синхронного усилителя с недостаточным динамическим диапазоном приводит к появлению переэкспозиции в распределениях интенсивности, и, как следствие, к искажению восстанавливаемого с помощью алгоритма SBMIR волнового фронта. Для компенсации переэкспозиции предложено использование техники экстраполяции данных. В ходе итерационной процедуры алгоритма SBMIR производится замена амплитуды поля на измеренное значение только в областях с корректно зарегистрированными данными; амплитуда переэкспонированных участков вычисляется на каждом шаге итерации и не подвергается замене. Такой подход позволяет в ходе последовательных приближений накопить дополнительную информацию о распределении фазы и утраченной части волнового фронта в областях переэкспозиции, что обеспечивает сходимость итерационной процедуры SBMIR.

**Выводы.** В работе на экспериментальных данных ТГц диапазона была продемонстрирована техника компенсации переэкспозиции распределений интенсивности для их эффективного использования в итерационных методах многоплоскостного восстановления фазы. Показано, что метод позволяет упростить процесс регистрации данных в схеме на отражение, используя одиночный синхронный усилитель, при этом обеспечивая высокую сходимость алгоритма SBMIR.

#### **Список использованных источников:**

1. Locatelli M. et al. Real-time terahertz digital holography with a quantum cascade laser //Scientific Reports. – 2015. – Vol. 5. – №. 1. – P. 1-7.
2. Shevkunov I. A., Balbekin N. S., Petrov N. V. Comparison of digital holography and iterative phase retrieval methods for wavefront reconstruction //Holography, Diffractive Optics, and Applications VI. – International Society for Optics and Photonics, 2014. – Vol. 9271. – P. 927128.
3. Gerchberg R. W. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction pictures //Optik. – 1972. – Vol. 35. – №. 2. – P. 237-246.
4. Fienup J. R. Phase retrieval algorithms: a comparison //Applied Optics. – 1982. – Vol. 21. – №. 15. – P. 2758-2769.
5. Jin X. et al. Iterative denoising phase retrieval method for twin-image elimination in continuous-wave terahertz in-line digital holography //Optics and Lasers in Engineering. – 2022. – Vol. 152. – P. 106986.
6. Litychevskaya T., Fink H. W. Resolution enhancement in digital holography by self-extrapolation of holograms //Optics Express. – 2013. – Vol. 21. – №. 6. – P. 7726- 7733.
7. Pedrini G., Osten W., Zhang Y. Wave-front reconstruction from a sequence of interferograms recorded at different planes //Optics letters. – 2005. – Vol. 30. – №. 8. – P. 833-835.
8. Petrov, N. V. Phase retrieval method for multiple wavelength speckle patterns / N. V. Petrov, V. G. Bespalov, A. A. Gorodetsky // Proceedings of SPIE. – 2010. – Vol. 7387. – P. 73871T
9. Lu J. T., Lu C. H., Fleischer J. W. Enhanced phase retrieval using nonlinear dynamics //Optics Express. – 2016. – Vol. 24. – №. 22. – P. 25091-25102.
10. Xu C. et al. Enhancing Multi-Distance Phase Retrieval via Unequal Interval Measurements //Photonics. – Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021. – Vol. 8. – №. 2. – P. 48.
11. Petrov N. V. et al. Terahertz phase retrieval imaging in reflection //Optics Letters. – 2020. – Vol. 45. – №. 15. – P. 4168-4171.