

Алгоритмы восстановления фазы в терагерцовом диапазоне частот по разноудаленным распределениям интенсивности

Н. В. Петров¹, Ж.-Б. Перро², А. Чопард^{2, 3}, Ж.-П. Гийе², Е. Г. Циплакова¹, О. А. Смолянская¹, П. Моне²

¹ Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

² Университет Бордо, Бордо, Франция

³ Lytid, Париж, Франция

В докладе будут рассмотрены алгоритмы восстановления фазы объектного волнового фронта из набора распределений интенсивности, которые сформированы монохроматическим терагерцовым излучением и зарегистрированы на различном удалении от объекта. экспериментальных данных, записанных при облучении пропускающих и отражающих объектов.

Ключевые слова: восстановление фазы, терагерцовое излучение, итерационный алгоритм, экстраполяция.

Цитирование: Петров, Н. В. Алгоритмы восстановления фазы в терагерцовом диапазоне частот по разноудаленным распределениям интенсивности / Н. В. Петров, Ж.-Б. Перро, А. Чопард, Ж.-П. Гийе, Е. Г. Циплакова, О. А. Смолянская, П. Моне // HOLOEXPO 2021 : XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. — С. 29–34.

Введение

Голографическая визуализация с использованием непрерывного излучения терагерцового диапазона частот получила интенсивное развитие в последние годы. Обеспечиваемый этими методами доступ к комплексной амплитуде волны, посредством решения уравнений, описывающих процесс распространения волн, позволяет сформировать сфокусированное изображение объекта из рассеянного комплексного объектного волнового поля, восстановленного на удалении от объекта. Среди методов голографической визуализации можно выделить: 1) техники цифровой голографии, основанные на регистрации аналого-цифровыми средствами детектирования числовой модели дифракционной структуры, формируемой в результате интерференции опорной и объектной волны и 2) методы восстановления фазы из интенсивности, относящиеся к теории решения обратных задач в оптике. Методы восстановления фазы используют набор данных, содержащих информацию об амплитуде волны, для получения информации о ее фазовом набеге. Важной отличительной особенностью большинства из таких методов является регистрация данных с использованием однолучевой оптической схемы без формирования отдельной опорной волны. Следствием этого является высокая устойчивость к вибрациям и более низкие, по сравнению с методами цифровой голографии, требования к энергии источника излучения, что особенно актуально, например, для терагерцового (ТГц) диапазона частот. Еще одним преимуществом методов восстановления фазы перед большинством методов внеосевой цифровой голографии является оптимальное использование пространственной базы сигнала [1], в потенциале способное обеспечить более высокое пространственное разрешение. В отличие от осевой цифровой голографии, регистрация

данных в которых производится в аналогичной однолучевой схеме, методы восстановления фазы алгоритмически гарантируют формирование изображения объекта без паразитного влияния мнимого изображения [2].

Существует множество подходов и методов восстановления фазы, которые можно разделить на две категории [3]: детерминированные и итерационные. К первой категории относятся методы, в которых решение может быть получено напрямую из уравнения, в то время как во второй категории это обеспечивается в ходе последовательных приближений. Алгоритмы, рассматриваемые в данной работе, относятся к итерационным методам, берущим свое начало в работе Герчберга — Сэкстона [4]. Известная проблема сходимости к локальному минимуму, присущая алгоритмам типа Герчберга — Сэкстона, использующим информацию о модуле комплексной амплитуды поля в Фурье-плоскости и плоскости объекта, решается за счет регистрации и использования набора разноудаленных от объекта распределений интенсивности. Оригинальный метод, реализующий это, получил название SBMIR от англ. Single Beam Multiple Intensity Reconstruction [5]. Впоследствии были предложены его различные модификации: использующие при регистрации специальный диффузор, обеспечивающий формирование частично-развитой спекл-структуры [6], регистрацию одновременно на различных расстояниях и с использованием различных длин волн [7], неупорядоченное распространение волнового фронта [8], экстраполяцию данных за пределы области регистрации [9].

Следует отметить, что несмотря на большое количество работ по использованию методов класса SBMIR, алгоритмов стохастического использования распределений интенсивностей [8] и самоэкстраполяции данных за пределы области регистрации [9] еще не применялись для восстановления фазы ТГц объектного волнового фронта из набора разноудаленных распределений интенсивности. Поэтому в данной работе мы исследовали особенности этих итерационных алгоритмов и их эффективность при работе с данными, сформированными двумя источниками излучения: диодом Ганна с умножением частоты и квантово-каскадным лазером.

1. Краткое описание рассматриваемых алгоритмов

В данной работе исследуется производительность алгоритмов, в качестве данных для восстановления фазы которые используют идентичные наборы распределений интенсивности. Рассмотрим кратко принципы этих алгоритмов.

1.1. Алгоритм SBMIR

Одним из итерационных алгоритмов восстановления фазы, использующим информацию о зарегистрированных распределениях интенсивности в объеме дифракционного поля на различном удалении от объекта, является метод SBMIR (Single Beam Multiple Intensity Reconstruction, англ.), описанный в работе [5]. Основу метода составляют уравнения распространения волнового поля между плоскостями регистрации, решаемые на каждом шаге итерационного процесса (в оригинале метод углового спектра плоских волн). Итерационная про-

цедура реализуется посредством следующего алгоритма. В первой плоскости изначально задаются фазовое и амплитудное распределения, и при распространении поля на каждом шаге алгоритма до последующей плоскости происходит замена интенсивности рассчитанного поля на экспериментально измеренную интенсивность, при этом информация о фазе остается неизменной. В плоскости объекта искомое распределение поля определяется по окончании итерации.

1.2. Алгоритм SBMIR-U

Алгоритм, реализующий неупорядоченное распространение оценочного волнового фронта между плоскостями [8], наследует операции, выполняемые алгоритмом SBMIR, а именно — после расчета оценочной функции волнового поля в новой плоскости, получившаяся в результате расчета амплитуда заменяется на измеренную, а фаза сохраняется. Отличительной особенностью этого алгоритма является использование распределений интенсивности в стохастическом порядке. В данной работе для краткости мы будем называть этот алгоритм SBMIR-U от *unordered* — неупорядоченное распространение волнового фронта [8].

1.3. Алгоритм SBMIR-S

Алгоритм, реализующий экстраполяцию волнового поля за пределы области, пространственно-ограниченной в процессе регистрации кратко можно описать следующим образом. На первой итерации происходит увеличение размеров расчетной сетки путем дополнения нулями границ области расчета. На всех последующих итерациях производится замена центральной части синтезированной итерационным оператором распределения амплитуды на амплитуду, полученную посредством вычисления квадратного корня из физически зарегистрированного распределения интенсивности. Для улучшения сходимости алгоритма используется аподизирующая маска, ограничивающая распределение энергии в области объекта. Условимся называть этот алгоритм SBMIR-S от англ. *self-extrapolation* — экстраполяции данных за пределы области регистрации [10].

2. Оптические схемы для регистрации данных

В наших экспериментах мы работали со схемами как на пропускание [11], так и на отражение [12] (см. рис. 1), а также с источниками, различающимися частотой излучения: диодом Ганна с умножением частоты (частота $\nu = 0,287$ ТГц, советующая длина волны $\lambda = 1044,57$ мкм, мощность 14 мВт) и милливатным квантово-каскадным лазером от Lytid ($\nu = 2,5$ ТГц (советующая длина волны $\lambda = 119,91$ мкм). Кроме того, в экспериментах были использованы разные приемники излучения: диод с барьером Шоттки, измеряющий распределение интенсивности в режиме растрового сканирования (динамический диапазон 71 дБ), и матричные приемники от INO (288×384 пикселей размером 35 мкм) и I2S (288×384 размер пикселя 50 мкм).

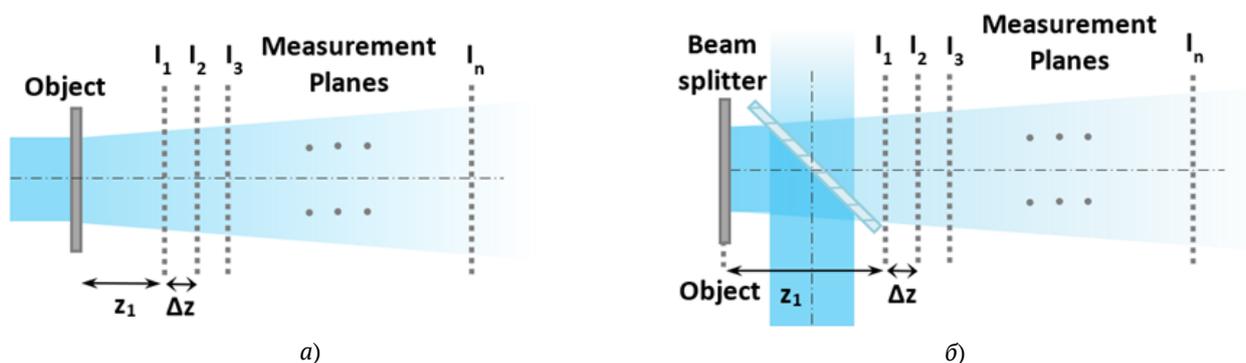


Рис. 1. Используемые конфигурации схем регистрации данных в экспериментах по восстановлению фазы: на пропускание (а) и отражение (б)

На рис. 1а показана более простая схема экспериментальной установки в режиме на пропускание. В этом режиме были проведены несколько три серии экспериментов: с 1) диодом Ганна в качестве источника и с диодом с барьером Шоттки в качестве приемника, (2) квантово каскадным лазером и матричным приемником от INO, 3) квантово каскадным лазером и матричным приемником от I2S. Параметры сбора данных в этих экспериментах следующие.

1. Регистрация в 11 плоскостях в режиме растрового сканирования с поперечной сеткой: 240×240 , поперечный шаг сканирования (размер пикселя в сформированном распределении интенсивности) $\Delta x = 500$ мкм, расстояние от объекта до первой плоскости $z_1 = 15$ мм, расстояние между плоскостями $\Delta z = 13$ мм.

2. Регистрация распределений интенсивности с разрешением 288×384 пикселей размером $\Delta x = 35$ мкм в 20–35 плоскостях, z_1 варьировалось от 0,95 до 13 мм, $\Delta z = 1$ мм (для ближайших 20 плоскостей и $\Delta z = 2$ мм для оставшихся 15).

3. Регистрация распределения интенсивности с разрешением 288×384 пикселей размером $\Delta x = 50$ мкм в 51 плоскости, $z_1 \cong 0,97$, $\Delta z = 2$ мм.

В режиме регистрации пространственных распределений интенсивности на отражение можно выделить два возможных варианта. В первом, при освещении объекта перпендикулярно его поверхности, используется светоделитель, который приводит к потерям энергии, но позволяет использовать стандартные уравнения дифракции, описывающие распространение волнового фронта между двумя плоскостями, поперечными к оптической оси. Вторая схема более энергосберегающая и иногда обеспечивает немного более высокое разрешение, но при решении уравнений дифракции к волновому фронту следует применять дополнительные преобразования вращения. Мы использовали схему со светоделителем которая представлена на рис. 1б. ТГц излучение было сколлимировано и расширено до подходящей площади примерно 8×8 см и при помощи светоделителя направлено на статично расположенный объект в области расширенного коллимированного поля. После отражения от объекта и прохождения через светоделитель, дифрагированное поле регистрировалось при помощи растрового сканирования изображений в нескольких плоскостях на разных расстояниях вдоль оси z .

Регистрация в режиме на отражение проводилась при следующих параметрах: 11 плоскостей: 240×240 , размер пикселя в сформированном распределении интенсивности $\Delta x = 500$ мкм, $z_1 = 83$ мм, $\Delta z = 13$ мм.

Обычно регистрация в режиме на пропускание позволяет расположить детектор ближе, обеспечивая тем самым более высокое разрешение за счет захвата более высоких пространственных частот по сравнению с режимом на отражение, когда физический размер элементов экспериментальной установки или самого объекта препятствует близкому размещению детектора. Схема на отражение хорошо подходит для исследования образцов с высоким поглощением в ТГц диапазоне, например, биологических образцов [13].

3. Обсуждение результатов

В процессе восстановления волнового фронта итерационным алгоритмом важно последовательно подавать распределения интенсивности, обладающие достаточными различиями с одной стороны, что накладывает ограничение на минимальный интервал между используемыми распределениями интенсивности. С другой стороны, ввиду недостатка мощности ТГц источников и ограниченной чувствительности приемников излучения, поперечный размер пучка не может быть сильно увеличен, что в свою очередь приводит к формированию дифракционных картин при малых числах Френеля. В результате экспериментов с использованием различных итерационных алгоритмов было установлено, что использование большого количества разноудаленных распределений интенсивности негативно сказывается на пространственном разрешении, поскольку самые дальние изображения регистрируются с самой низкой числовой апертурой. Восстановленный волновой фронт, сфокусированный в плоскость объекта в случае с использованием распределений интенсивности в количестве более 20, включая распределения, характеризующиеся малыми числами Френеля, содержит крупные спеклы. При восстановлении волнового фронта изображений из данных, записанных на первых 20 плоскостях, сравниваемые алгоритмы обеспечивают получение сопоставимых результатов, но изображение, полученное с использованием техник стохастического использования интенсивности и самоэкстраполяции, выглядит немного более резким. Относительно восстановления по данным, записанным в первых 5 плоскостях, можно утверждать, что алгоритм SBMIR-U демонстрирует лучшее качество изображения в тех областях объекта, которые были облучены. Объясняется это увеличением возможных вариантов путей распространения волнового фронта в итерационной процедуре.

Заключение

Таким образом, в работе были рассмотрены современные алгоритмы восстановления фазы из набора распределений интенсивности, записанных при облучении пропускающих и отражающих объектов, сформированными двумя источниками излучения: диодом Ганна с умножением частоты и квантово-каскадным лазером.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке международного гранта РФФИ № 1-52-15035 НЦНИ_a.

Список источников

- [1] **Shevkunov, I. A.** [Comparison of digital holography and iterative phase retrieval methods for wavefront reconstruction](#) / I. A. Shevkunov, N. S. Balbekin, N. V. Petrov // Proceedings of SPIE. — 2014. — Vol. 9271. — P. 927128.
- [2] **Hu, J.** [Research on the superimposed frame number of terahertz digital holograms in double-exposed phase retrieval algorithm](#) / J. Hu, Q. Li, G. Chen // Proceedings of SPIE. — 2015. — Vol. 9674. — P. 96740F.
- [3] **Zuo, C.** [Transport of intensity equation: a tutorial](#) / C. Zuo, J. Li, J. Sun, Y. Fan, J. Zhang, L. Lu, R. Zhang, B. Wang, L. Huang, Q. Chen // Optics and Lasers in Engineering. — 2020. — Vol. 135. — P. 106187.
- [4] **Gerchberg, R. W.** A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures / R. W. Gerchberg, W. O. Saxton // Optik (Stuttg). — 1972. — Vol. 35. — P. 237–246.
- [5] **Pedrini, G.** [Wavefront reconstruction from a sequence of interferograms recorded at different planes](#) / G. Pedrini, W. Osten, Y. Zhang // Optics Letters. — 2005. — Vol. 30. — P. 833–835.
- [6] **Almoro, P. F.** [Enhanced deterministic phase retrieval using a partially developed speckle field](#) / P. F. Almoro, L. Waller, M. Agour, C. Falldorf, G. Pedrini, W. Osten, S. G. Hanson // Optics Letters. — 2012. — Vol. 37. — № 11. — P. 2088–2090.
- [7] **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.
- [8] **Binamira, J. F.** [Accelerated single-beam multiple-intensity reconstruction using unordered propagations](#) / J. F. Binamira, P. F. Almoro // Optics Letter. — 2019. — Vol. 44. — P. 3130.
- [9] **Huang, Z.** [Multiplane digital holography based on extrapolation iterations](#) / Z. Huang, C. Kuang, L. Xu L. Cao // Optics Communications. — 2021. — Vol. 481. — P. 126526.
- [10] **Balbekin, N. S.** [Increasing the resolution of the reconstructed image in terahertz pulse time-domain holography](#) / N. S. Balbekin, M. S. Kulya, A. V. Belashov, A. Gorodetsky, N. V. Petrov // Scientific Reports. — 2019. — Vol. 9. — № 1. — P. 180.
- [11] **Petrov, N. V.** [Terahertz Multiple-Plane Phase Retrieval](#) / N. V. Petrov, J.-B. Perraud, A. Chopard, J.-P. Guillet, O. A. Smolyanskaya, P. Mounaix // Imaging and Applied Optics 2020. — Optical Society of America, 2020. — P. HF4G.8.
- [12] **Petrov, N. V.** [Terahertz phase retrieval imaging in reflection](#) / N. V. Petrov, J.-B. Perraud, A. Chopard, J.-P. Guillet, O. A. Smolyanskaya, P. Mounaix // Optics Letters. — 2020. — Vol. 45. — P. 4168.
- [13] **Cassar, Q.** [Pilot study of freshly excised breast tissue response in the 300–600 GHz range](#) / Q. Cassar, A. Al-Ibadi, L. Mavarani, P. Hillger, J. Grzyb, G. MacGrogan, T. Zimmer, U. R. Pfeiffer, J.-P. Guillet, P. Mounaix // Biomedical Optics Express. — 2018. — Vol. 9. — P. 2930–2942.