

ИМПУЛЬСНАЯ ТЕРАГЕРЦОВАЯ ГОЛОГРАФИЯ С РАЗРЕШЕНИЕМ ВО ВРЕМЕНИ В ДИСПЕРСИОННЫХ СРЕДАХ

Н.С. Балбекин¹, М.С. Куля¹, Н.В. Петров¹
¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Рассмотрена математическая модель голографического восстановления рельефа фазового объекта из дифракционных картин импульсного терагерцового излучения, записанных в дисперсионной среде. Дополнены алгоритмы численного распространения волнового фронта для учёта дополнительного фазового набега на каждой частотной компоненте, возникающего из-за распространения в дисперсионной среде. Проведено сравнение восстановленных фазовых изображений для случаев учёта и неучёта дисперсии среды. Показано, что для суммированного по частотам двумерного изображения нормированное среднеквадратичное отклонение при неучёте дисперсии среды составляет 0,3 при распространении волнового фронта на расстояние 10 мм и увеличивается до 0,45 с увеличением расстояния до 70 мм.

Ключевые слова: цифровая голография, терагерцовая оптика, формирование изображений, дисперсионные среды.

Цитирование: Балбекин, Н.С. Импульсная терагерцовая голография с разрешением во времени в дисперсионных средах / Н.С. Балбекин, М.С. Куля, Н.В. Петров // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 3. – С. 348-355. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-3-348-355.

Введение

В последние несколько лет системы ТГц-спектроскопии нашли своё применение в таких областях, как биология и медицина [1–3], охранные системы [4], фармакология [5], неразрушающий контроль [6]. Отдельным большим пластом применений ТГц-излучения являются методы формирования изображения. Актуальность использования ТГц-диапазона для этих целей обуславливается следующими параметрами: высокая проникающая способность; длина волны ТГц-излучения позволяет получать изображения с субмиллиметровым разрешением, широкая полоса частот в пределах от 100 ГГц до 10 ТГц обеспечивает возможность производить спектроскопические измерения образцов, чьи спектральные особенности лежат в этом диапазоне. К таким объектам относятся многие взрывчатые вещества, органические молекулы и сложные полимеры. Также ТГц-излучение характеризуется низкой энергией фотонов, что обуславливает его неионизирующий характер, позволяя использовать его в медицине. При прямом детектировании временной зависимости напряженности электрического поля ТГц-излучения возможно получение комплексных спектров, таким образом, регистрируя полную информацию об амплитуде и фазе прошедшей или отражённой от образца волны.

Формирование изображения, визуализация внутренней структуры объектов, неразрушающий контроль изделий, томография и голография в ТГц-диапазоне частот представляют значительный интерес как для научных, так и для практических применений [7, 8]. В настоящее время в ТГц-оптике большое внимание уделяется задаче измерения фазовых характеристик ТГц-поля, а также трёхмерных геометрических характеристик сложных фазовых объектов с пространственным и/или частотным распределением показателя преломления в ТГц-диапазоне. Также ТГц-излучение используется для получения

полного трёхмерного изображения объектов [9–13], в том числе скрытых внутри дисперсионных сред.

Импульсная ТГц-голография с разрешением во времени [14] представляет собой перспективный метод измерения фазовых характеристик ТГц-поля. Эта техника обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с ТГц-спектроскопией с разрешением во времени, так как предполагает измерения в коллимированном пучке, что буквально означает, что объект может быть стационарно расположен в любом месте внутри него, что часто требуется при проведении измерений в реальном времени. Вдобавок для практической реализации измерений требуется минимальное количество оптических элементов ТГц-диапазона, поскольку регистрация поля производится сканирующей диафрагмой или матрицей фотодетекторов в широкоапертурном коллимированном пучке, прошедшем через объект. При такой конфигурации качество восстановления не зависит от оптики, используемой в установке. И что самое важное, достижимое разрешение, которое сопоставимо с длиной волны [15], значительно выше, чем у конкурирующей техники ТГц-спектроскопии с разрешением во времени [16], где разрешение ограничено размером перетяжки пучка.

Метод импульсной терагерцовой голографии предполагает регистрацию данных рассеянного объектом широкополосного излучения в зоне дифракции с последующим численным решением уравнения распространения волн для пространственного распределения комплексной амплитуды на каждой из спектральных компонент [14]. Во всех предыдущих работах по данной тематике [17–20] рассматривалось распространение волн в среде с пренебрежимо малой дисперсией или без неё. В то же время на практике часто встречаются материалы, обладающие характерной зависимостью показателя преломления от частоты. На рис. 1 представлены неко-

торые из таких сред из числа актуальных и часто встречающихся в литературе по исследованиям в ТГц-тематике. Стоит отметить, что проблема дисперсии среды может также возникать в случае сложных слоистых объектов или объектов, скрытых внутри других.

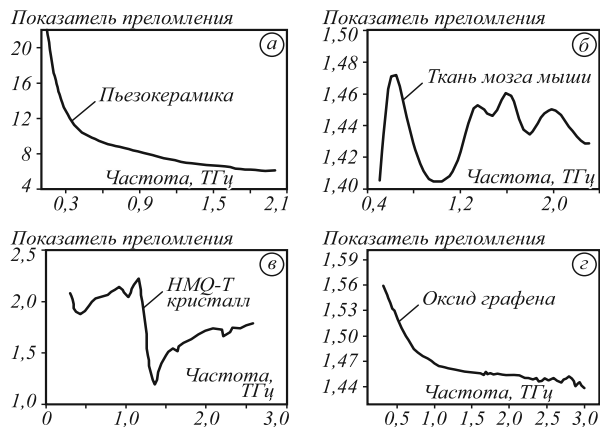


Рис. 1. Дисперсия показателя преломления: в пьезокерамике [21] (а), ткани мозга мыши с болезнью Альцгеймера [22] (б), НМО-Т кристалле в направлении оси А [23] (в), восстановленном оксиде графена [24] (г)

В данной работе мы адаптируем модель голографического восстановления изображения объекта, основанную на математическом аппарате скалярной теории дифракции для случая распространения волнового поля в дисперсионной среде, в которую помещён исследуемый объект, а также показываем влияние учёта дисперсии среды на восстановление фазовых характеристик и рельефа объекта на этапах записи и восстановления голограммы. Таким образом расширяется класс задач, связанных с восстановлением изображений объектов.

1. Предложенная математическая модель

В работе [14] была предложена математическая модель записи и восстановления голограммы, которая осуществляется по методу ТГц импульсной голографии с разрешением во времени с использованием численного расчёта распространения волнового фронта в пространстве, основанная на алгоритмах представления поля через угловой спектр плоских волн (УС):

$$u(x, y, l) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} U(f_x, f_y) \exp[2\pi i(f_x x + f_y y)] \times \exp\left[(2\pi i \Delta l / \lambda) \sqrt{1 - (f_x)^2 - (f_y)^2}\right] df_x df_y, \quad (1)$$

где f_x, f_y – пространственные частоты, получаемые при разложении в двумерный Фурье-спектр, λ – длина волны, Δl – расстояние, для которого производится численный расчёт распространения.

Метод свёртки поля с импульсным откликом системы (С) определяется выражением:

$$U(x, y, l) = u(x', y', 0) \otimes h(x, y, l), \quad (2)$$

где h – импульсный отклик системы:

$$h(x, y, l) = (\exp[2\pi i r / \lambda] / i \lambda r) (l/r) \quad (3)$$

и r – расстояние между выбранной точкой на объектной плоскости и плоскости регистрации:

$$r = \sqrt{l^2 (x - x')^2 + (y - y')^2}. \quad (4)$$

В формулах (1), (2) предполагается модель, при которой показатель преломления постоянный и равен 1. Для расчёта как дифракционных картин, отражающихся получаемые в эксперименте данные [25], так и для восстановления по этим данным амплитудно-фазовых характеристик объекта, представленные уравнения решаются для всех частот рассматриваемого нами ТГц-диапазона (0,5–2,0 ТГц). Согласно определению, дисперсия есть зависимость показателя преломления среды от частоты. При распространении широкополосного цуга электромагнитных волн в дисперсионных средах наблюдается различие фазовых скоростей в зависимости от их частоты. В работе [25] показано влияние длины волны на пространственные частоты дифрагированного на объекте излучения. Для учёта дисперсии показателя преломления в нашей математической модели распространения волнового фронта уравнения для метода УС дополнены функцией ($n(\lambda)$):

$$u(x, y, l) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} U(f_x, f_y) \exp[2\pi i(f_x x + f_y y)] \times \exp\left[(2\pi i \Delta l / \lambda n(\lambda)) \sqrt{1 - (f_x)^2 - (f_y)^2}\right] df_x df_y \quad (5)$$

и аналогично для метода С:

$$U(x, y, l) = u(x', y', 0) \otimes h'(x, y, l), \quad (6)$$

где

$$h'(x, y, l) = (\exp[2\pi i r / \lambda n(\lambda)] / i \lambda r) (l/r). \quad (7)$$

Область применения методов углового спектра и свертки с учётом дисперсии среды определяется неравенством:

$$v \geq v_0 = c / n(\lambda) N \Delta x^2, \quad (8)$$

где v – частота, c – скорость света, N – количество пикселей в дискретном представлении поля, Δx – размер пикселя.

Формула (8) устанавливает соотношение между частотой излучения и расстоянием l . Согласно этому неравенству, при $v \geq v_0$ используется метод УС, а при $v \leq v_0$ – метод С.

Расчёт распространения поля проводился для случаев без учёта дисперсии среды, с учётом дисперсии только при записи голограммы и с учётом дисперсии при записи и восстановлении. Под терминами «запись голограммы» и «восстановление голограммы» мы подразумеваем численный расчёт распространения волнового поля из плоскости объекта в плоскость голограммы и из плоскости голограммы в плоскость объекта соответственно. В реальном эксперименте голограмма представляет собой поле, зарегистрированное после прохождения амплитудно-фазового объекта на определённом расстоянии l , в той плоско-

сти, где располагается растровая сканирующая диафрагма (рис. 2, увеличенный фрагмент). В эксперименте мы имеем возможность получить распределение терагерцового поля только в плоскости голограммы (что равносильно термину плоскость регистрации). Соответственно, результаты численного моделирования с учётом дисперсии только при записи голограммы являются отражением проблемы, возникающей в реальном эксперименте, а именно: при распространении поля после прохождения объекта в плоскость регистрации происходит дополнительный фазовый набег в дисперсионной среде, и неучёт этой дисперсии при дальнейшей численной обработке результатов приводит к значительным искажениям в восстанавливаемом изображении.

В данной работе рассматривается случай поиска скрытого объекта в мозговой ткани мыши с болезнью Альцгеймера, которая обладает дисперсией в диапазоне 0,5–2,0 ТГц (рис. 1б). Проводимое нами математическое моделирование является компьютерной симуляцией эксперимента по записи и восстановлению импульсных ТГц-голограмм по схеме, описанной в работе [14] (рис. 2).

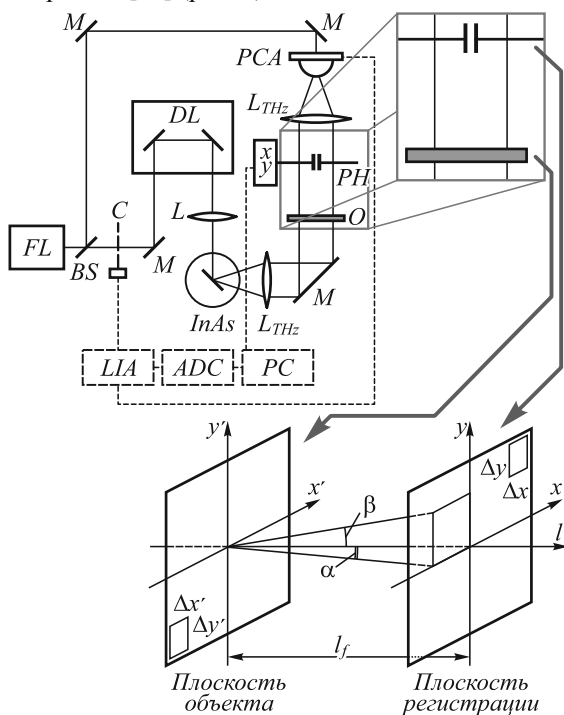


Рис. 2. Принципиальная схема численного моделирования. Увеличенный фрагмент демонстрирует объект исследования (O) и диафрагму (PH), которые в предложенной численной модели представляют собой плоскость объекта и плоскость регистрации соответственно

2. Результаты численного моделирования

Для моделирования записи и восстановления терагерцовых голограмм в приближении тонкого транспаранта были использованы амплитудная (распределение Гаусса, рис. 3а) и фазовая («фазовый конь», рис. 3б) маски исследуемого объекта, а также смоделирован

идеальный однопериодный импульс, представляющий собой одно колебание электрического поля длительностью порядка 2 пикосекунды с шириной спектральной полосы до 2,5 ТГц (рис. 3в). Также на рис. 3 показаны распределения фазы сразу после объекта на разных частотах ТГц-спектра.

После моделирования записи и восстановления голограммы были получены пространственно-частотные распределения фазы в плоскости объекта. Для корректной оценки фазовых изображений был применён стандартный алгоритм развёртки фазы по спектральной частоте. На рис. 4 показаны фазовые портреты восстановленных голограмм на отдельных частотах ТГц-спектра для случаев учёта дисперсии при записи и восстановлении (рис. 4а-в) и для случаев учёта дисперсии показателя преломления только при записи (рис. 4г-е).

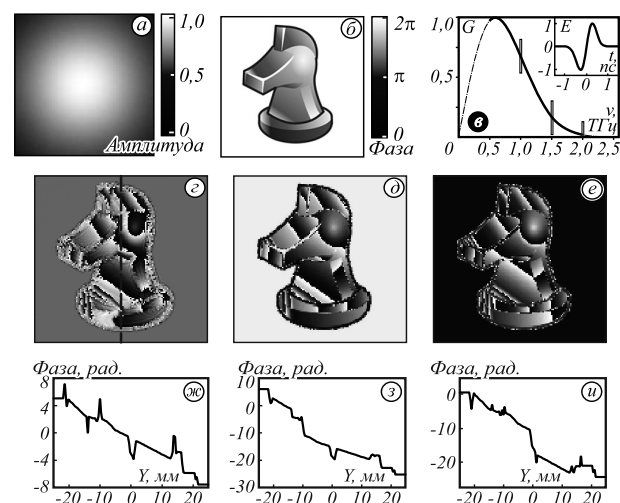


Рис. 3. Начальное распределение амплитуды (а) и фазы (б) объекта, используемый в моделировании ТГц-спектр (в), распределение фазы сразу после объекта на частоте 1 ТГц (г), распределение фазы сразу после объекта на частоте 1,5 ТГц (д), распределение фазы сразу после объекта на частоте 2 ТГц (е). Сечения фазового изображения (ж-и) – для случаев (г-е) соответственно

При сравнении изображений на одинаковых частотах отчётливо видна разница в пространственном распределении фазовых характеристик, вызванная дополнительным фазовым набегом в среде при распространении поля.

Механизм появления ошибок в случае, если дисперсия среды имеет место, а в математическом моделировании восстановления голограммы она не учитывается, следующий: при распространении назад в случае, если показатель преломления среды зависит от частоты излучения, происходит смещение плоскости численной фокусировки для каждой из компонент широкого спектра, и величина этого смещения зависит от характера кривой дисперсии. Если закон дисперсии линейный, то смещение плоскости численной фокусировки будет эквидистантным. В общем виде характер смещения этой плоскости зависит от производной дисперсионной кривой.

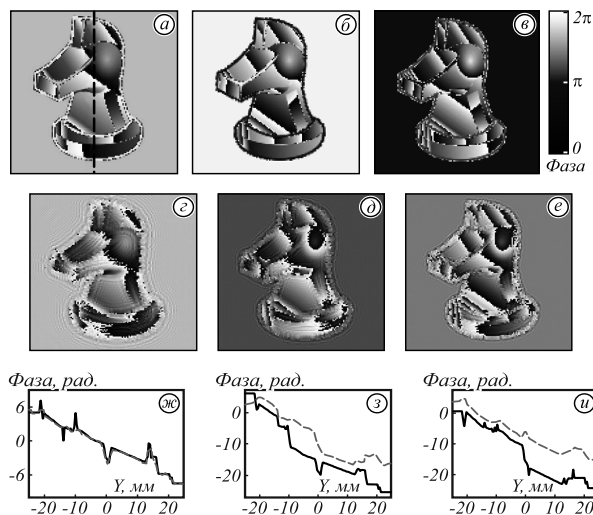


Рис. 4. Восстановленные фазовые изображения: с учетом дисперсии среды (а-в) и без учёта дисперсии на различных частотах в ТГц диапазоне (г-е). – Сечения поверхностей (ж-и): сплошная линия для случаев (а-в) и пунктирная линия – для случаев (г-е). Рисунок (ж) иллюстрирует случай, при котором для выбранной спектральной компоненты (1 ТГц) набег фазы совпадает

При сравнении фазовых портретов с теми, которые формировались непосредственно сразу за объектом (рис. 3г-е), стоит отметить, что для случая полного учёта дисперсии в обоих направлениях распространения поля фазовые характеристики совпадают для всех частот спектра, что объясняется компенсацией фазового набега при распространении в среде на расстояние l обратным фазовым набегом при распространении назад в плоскость объекта на расстояние $-l$. При этом неучёт дисперсии среды при восстановлении голограммы приводит к некорректному восстановлению исходных фазовых характеристик поля, что приводит к искажению получаемого изображения и к ошибке в расчёте рельефа, поскольку для перехода от фазы поля на всех частотах к профилю объекта необходимо считать суммарную картину на всех длинах волн. Рельеф структуры в случае, когда объект состоит из однородного материала, будет иметь вид:

$$h(x_0, y_0) = \frac{1}{m} \left(\sum_{i=1}^m \frac{\Delta\varphi(x_0, y_0, \lambda_i) \lambda_i}{2\pi(n-1)} \right), \quad (9)$$

где $\Delta\varphi$ – значение фазы поля в точке объекта для каждой длины волны, (x_0, y_0) – координаты, c – скорость света, n – показатель преломления объекта.

Если анализировать поведение фазы во всей рассматриваемой нами частотной области в одной из произвольно выбранных точек объекта (рис. 4а), то здесь также усматривается изменение динамики фазового набега при восстановлении голограммы без учёта дисперсии среды, поскольку в зависимости фазы от частоты для каждой спектральной компоненты появляется свой коэффициент угла наклона фазы, вызванный дисперсией среды.

Если перейти от фазовых характеристик для всей частотной области к рельефу (уравнение 9), то неучёт

дисперсии при восстановлении приводит к появлению флуктуаций рельефа на частотной шкале, что является очевидно некорректным, поскольку параметр высоты объекта в точке не зависит от длины волны излучения, с помощью которой этот рельеф восстанавливается (рис. 5б).

На рис. 5 учёт дисперсии (УД) и неучёт дисперсии (БД) даёт одинаковый результат при численном моделировании расчёта записи и обратного восстановления голограммы, что подтверждает правильность предложенной модели: случай, дополненный дисперсией, даёт дополнительный набег фазы при распространении вперёд и обратный набег фазы при последующем распространении назад в среде.

Следовательно, дополнительные фазовые набег корректно компенсируются при распространении вперёд и затем назад, что не противоречит более простой модели без дисперсии вообще. Однако, если не учитывать дисперсию при восстановлении голограммы при её наличии при записи, то будет накапливаться ошибка. Это является важным обстоятельством, так как в реальном эксперименте дисперсия при записи голограммы присутствует априори, и при последующей численной обработке отказ от её рассмотрения приводит к ошибке в восстановлении изображения и рельефа.

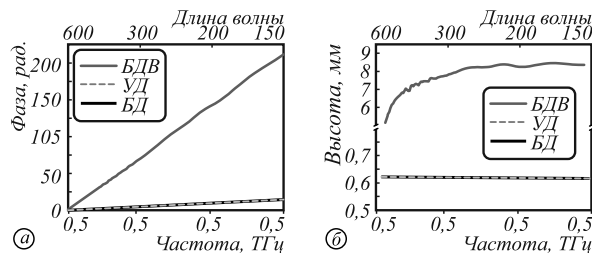


Рис. 5. Восстановленные характеристики объекта в точке: изменения в фазовом запаздывании в точке изображения с координатами $(x = 5, y = 25)$ (а); зависимость рельефа объекта в частотном диапазоне в точке с координатами $(x = 5, y = 25)$ (б). Обозначения: УД – с учётом дисперсии при записи и восстановлении изображения, БД – без учёта дисперсии при записи и восстановлении изображения, БДВ – без учёта дисперсии только при восстановлении изображения

При расчёте рельефа с учётом суммирования по всей частотной области ошибка будет проявляться в виде отклонений функции рельефа восстановленного объекта от эталонного. При этом примечательно, что при увеличении расстояния l между плоскостью объекта и плоскостью голограммы происходит накопление ошибки, поскольку такое увеличение расстояния по сути подразумевает увеличение длины дисперсионной среды. На рис. 6 приведён суммарный по всему спектру восстановленный рельеф объекта для обсуждаемых в работе случаев.

Процесс накопления ошибки в восстановлении изображения объекта визуализирован на рис. 7, показывающем рост искажений при увеличении расстояния до плоскости голограммы. Также приведены значения нормального среднеквадратичного отклонения (НСКО), рассчитанные по формуле:

$$E^2 = \frac{\sum |g(x, y) - f(x, y)|^2}{\sum |f(x, y)|^2}, \quad (10)$$

где $g(x, y)$ и $f(x, y)$ – суммарные фазовые изображения для восстановленного и эталонного объекта соответственно. НСКО возрастает от 0,30 до 0,45 по мере увеличения расчётного расстояния распространения.

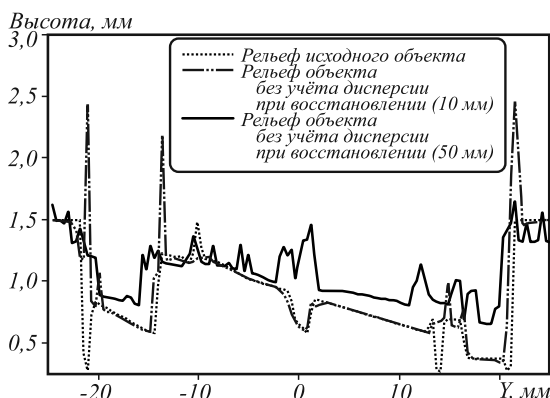


Рис. 6. Сечения поверхности восстановленного объекта: точечная линия – эталонный рельеф тест-объекта; штрихпунктирная линия – восстановленный рельеф без учёта дисперсии при восстановлении на расстоянии $l = 10$ мм; сплошная линия – восстановленный рельеф без учёта дисперсии при восстановлении на расстоянии $l = 50$ мм

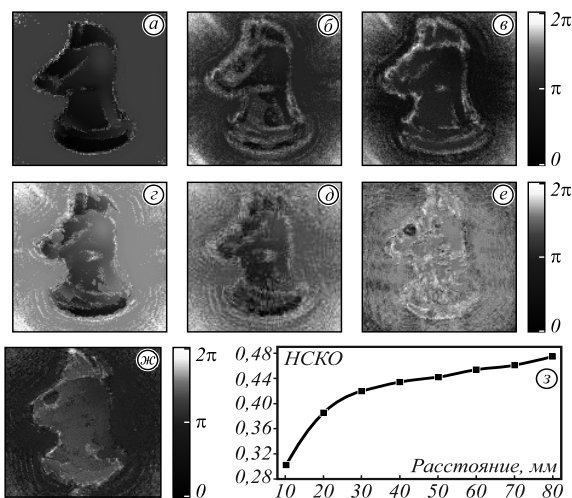


Рис. 7. Восстановленные суммарные изображения на различных расстояниях численного распространения: 10 мм (а), 20 мм (б), 30 мм (в), 40 мм (г), 50 мм (д), 60 мм (е), 70 мм (ж). Возрастание НСКО восстанавливаемых изображений относительно эталонного при неучёте дисперсии среды распространения (з)

Заключение

В данной работе мы представили модель, учитывающую дисперсию среды, и показали в численном моделировании, как рассмотрение зависимости показателя преломления среды от частоты импульсного широкополосного терагерцевого излучения влияет на процесс восстановления рельефа и изображения исследуемого тест-объекта.

Представленные уравнения численного расчёта распространения волнового фронта в дисперсионных средах также могут быть полезны не только для задач интравидения в терагерцевом диапазоне частот, но и для расчёта дифракции как широкополосного, так и монохроматического излучения, например, из видимого диапазона частот, в средах с показателем преломления $n \neq 1$ [26, 27]. В таком контексте использование полученных результатов приобретает дополнительную значимость для задач цифровой низкокогерентной голографической микроскопии [28], оптической когерентной томографии [29], а также нелинейной оптики, например, для исследования особенностей распространения лазерного излучения в оптически нелинейных средах [30, 31] и др.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке правительства Российской Федерации, гранты 3.1893.2017/ПЧ и 074-U01.

Литература

1. Plusquellic, D.F. Applications of Terahertz Spectroscopy in Biosystems / D.F. Plusquellic, K. Siegrist, E.J. Heilweil, O. Esenturk // Journal de Chimie Physique et de Physico-Chimie Biologique. – 2007. – Vol. 8(17). – P. 2412-2431. – DOI: 10.1002/cphc.200700332.
2. Цуркан, М.В. Исследование спектра ДНК методами ТГц спектроскопии / М.В. Цуркан, Н.С. Балбекин, Е.А. Собакинская, А.Н. Панин, В.Л. Вакс // Оптика и спектроскопия. – 2013. – Т. 114, № 6. – С. 981-986. – DOI: 10.7868/S0030403413060238.
3. Смирнов, С.В. Экспериментальные исследования возможностей диагностирования кариеса в твердых тканях зуба с помощью терагерцевого излучения / С.В. Смирнов, Я.В. Грачёв, А.Н. Цыпкин, В.Г. Беспалов // Оптический журнал. – 2014. – Т. 81, Вып. 8. – С. 58-62.
4. Kemp, M.C. Detecting hidden objects: Security imaging using millimetre-waves and terahertz / M.C. Kemp // 2007 IEEE Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS 2007). – 2007. – P. 7-9. – DOI: 10.1109/AVSS.2007.4425277.
5. Zeitler, J.A. Terahertz pulsed spectroscopy and imaging in the pharmaceutical setting – a review / J.A. Zeitler, P.F. Taday, D.A. Newnham, M. Pepper, K.C. Gordon, T. Rades // Journal of Pharmacy and Pharmacology. – 2007. – Vol. 59(2). – P. 209-223. – DOI: 10.1211/jpp.59.2.0008.
6. Balbekin, N.S. Nondestructive monitoring of aircraft composites using terahertz radiation / N.S. Balbekin, E.V. Novoselov, P.V. Pavlov, V.G. Bepalov, N.V. Petrov // Proceedings of SPIE. – 2015. – Vol. 9448. – 94482D. – DOI: 10.1117/12.2180021.
7. Zhang, X.C. Introduction to THz wave photonics / X.C. Zhang, J. Xu. – New York: Springer, 2010. – 246 p. – ISBN: 978-1-4419-0977-0.
8. Lee, Y.S. Principles of terahertz science and technology / Y.S. Lee. – New York: Springer Science & Business Media, 2009. – 340 p. – ISBN: 978-0-387-09539-4.
9. Hu, B.B. Imaging with terahertz waves / B.B. Hu, M.C. Nuss // Optics Letters. – 1995. – Vol. 20(16). – P. 1716-1718. – DOI: 10.1364/OL.20.001716.
10. Mittleman, D.M. T-ray imaging / D.M. Mittleman, R.H. Jacobsen, M.C. Nuss // IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics. – 1996. – Vol. 2(3). – P. 679-692. – DOI: 10.1109/2944.571768.

11. **Mittleman, D.M.** Recent advances in terahertz imaging / D.M. Mittleman, M. Gupta, R. Neelamani, R.G. Baraniuk, J.V. Rudd, M. Koch // *Applied Physics B*. – 1999. – Vol. 68(6). – P. 1085-1094. – DOI: 10.1007/s003400050750.
12. **Ahi, K.** Advanced terahertz techniques for quality control and counterfeit detection / K. Ahi, M. Anwar // *Proceedings of SPIE*. – 2016. – Vol. 9856. – 98560G. – DOI: 10.1117/12.2228684.
13. **Ahi, K.** Modeling of terahertz images based on x-ray images: a novel approach for verification of terahertz images and identification of objects with fine details beyond terahertz resolution / K. Ahi, M. Anwar // *Proceedings of SPIE*. – 2016. – Vol. 9856. – 985610. – DOI: 10.1117/12.2228685.
14. **Petrov, N.V.** Application of terahertz pulse time-domain holography for phase imaging / N.V. Petrov, M.S. Kulya, A.N. Tsytkin, V.G. Bespalov, A.A. Gorodetsky // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2016. – Vol. 6(3). – P. 464-472. – DOI: 10.1109/TTHZ.2016.2530938.
15. **Zhang, L.** Terahertz multiwavelength phase imaging without 2π ambiguity / L. Zhang, Y. Zhang, C. Zhang, Y. Zhao, X. Liu // *Optics Letters*. – 2006. – Vol. 31(24). – P. 3668-3670. – DOI: 10.1364/OL.31.003668.
16. **Zhang, L.** Terahertz wave focal-plane multiwavelength phase imaging / L. Zhang, H. Zhong, Y. Zhang, N. Karpowicz, C. Zhang, Y. Zhao, X.C. Zhang // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2009. – Vol. 26(5). – P. 1187-1190. – DOI: 10.1364/JOSAA.26.001187.
17. **Zhang, Y.** Terahertz digital holography / W. Zhou, X. Wang, Y. Cui, W. Sun // *Strain*. – 2008. – Vol. 44(5). – P. 380-385. – DOI: 10.1111/j.1475-1305.2008.00433.x.
18. **Gorodetsky, A.A.** THz pulse time-domain holography / A.A. Gorodetsky, V.G. Bespalov // *Proceedings of SPIE*. – 2010. – Vol. 7601. – 760107. – DOI: 10.1117/12.843249.
19. **Беспалов, В.Г.** Моделирование безопорной голографической записи и восстановления изображений с помощью импульсного терагерцового излучения / В.Г. Беспалов, А.А. Городецкий // *Оптический журнал*. – 2007. – Т. 74, № 11. – С. 30-35.
20. **Semenova, V.A.** Amplitude-phase imaging of pulsed broadband terahertz vortex beams generated by spiral phase plate / V.A. Semenova, M.S. Kulya, N.V. Petrov, Y.V. Grachev, A.N. Tsytkin, S.E. Putilin, V.G. Bespalov // *41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz)*, 2016. – 2016. – 2 p.
21. **Naftaly, M.** Dielectric constants of bulk ferroelectric PZT measured by terahertz time-domain spectroscopy / M. Naftaly, M.G. Cain, S. Lepadatu, T. Buchacher, J. Allam // *Advances in Applied Ceramics*. – 2016. – Vol. 115(5). – P. 260-263. – DOI: 10.1080/17436753.2015.1130199.
22. **Shi, L.** Terahertz spectroscopy of brain tissue from a mouse model of Alzheimer's disease / L. Shi, P. Shumyatsky, A. Rodríguez-Contreras, R. Alfano // *Journal of Biomedical Optics*. – 2016. – Vol. 21(1). – 015014. – DOI: 10.1117/1.JBO.21.1.015014.
23. **Lee, S.H.** Quinolinium-based organic electro-optic crystals: Crystal characteristics in solvent mixtures and optical properties in the terahertz range / S.H. Lee, M.J. Koo, K.H. Lee, M. Jazbinsek, B.J. Kang, F. Rotermund, O.P. Kwon // *Materials Chemistry and Physics*. – 2016. – Vol. 169. – P. 62-70. – DOI: 10.1016/j.matchemphys.2015.11.028.
24. **Chamorro-Posada, P.** THz TDS study of several sp^2 carbon materials: Graphite, needle coke and graphene oxides / P. Chamorro-Posada, J. Vázquez-Cabo, Ó. Rubiños-López, J. Martín-Gil, S. Hernández-Navarro, P. Martín-Ramos, F.M. Sánchez-Arévalo, A.V. Tamashauskyy, C. Merino-Sánchez, R.C. Dante // *Carbon*. – 2016. – Vol. 98. – P. 484-490. – DOI: 10.1016/j.carbon.2015.11.020.
25. **Balbekin, N.S.** The modeling peculiarities of diffractive propagation of the broadband terahertz two-dimensional field / N.S. Balbekin, M.S. Kulya, P.Y. Rogov, N.V. Petrov // *Physics Procedia*. – 2015. – Vol. 73. – P. 49-53. – DOI: 10.1016/j.phpro.2015.09.120.
26. **Poon, T.C.** Contemporary optical image processing with MATLAB / T.-C. Poon, P.P. Banerjee. – Amsterdam, London, New York, Oxford, Paris, Shannon, Tokyo: Elsevier Science Ltd., 2001. – 262 p. – ISBN: 978-0-08-043788-5.
27. **Grebenyuk, A.A.** Numerical focusing in digital holographic microscopy with partially spatially coherent illumination in transmission / A.A. Grebenyuk; V.P. Ryabukho // *Proceedings of SPIE*. – 2014. – Vol. 9031. – 903119. – DOI: 10.1117/12.2052837.
28. **Dubois, A.** Handbook of full-field optical coherence microscopy: Technology and applications / A. Dubois. – Singapore: Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., 2016. – 767 p. – ISBN: 978-981-4669-16-0.
29. **Labiau, S.** Defocus test and defocus correction in full-field optical coherence tomography / S. Labiau, G. David, S. Gigan, A.C. Boccara // *Optics Letters*. – 2009. – Vol. 34, Issue 10. – P. 1576-1578. – DOI: 10.1364/OL.34.001576.
30. **Налегаев, С.С.** Численное обращение динамики распространения волнового фронта с учётом пространственного эффекта самовоздействия света / С.С. Налегаев, Н.В. Петров // *Химическая физика*. – 2015. – Т. 34, № 8. – С. 1-3. – DOI: 10.7868/80207401X15080154.
31. **Nalegaev, S.S.** Numerical reconstruction of wave field spatial distributions at the output and input planes of nonlinear medium with use of digital holography / S.S. Nalegaev, N.V. Petrov, V.G. Bespalov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2014. – Vol. 536(1). – 012025. – DOI: 10.1088/1742-6596/536/1/012025.

Сведения об авторах

Балбекин Николай Сергеевич, 1989 года рождения, в 2013 году окончил Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики по специальности «Фотоника и оптоинформатика», работает инженером в международной научной лаборатории Цифровой и изобразительной голографии, является заместителем руководителя международной научной лаборатории Цифровой и изобразительной голографии. Область научных интересов: терагерцовая спектроскопия, терагерцовая голография, фазовая проблема. E-mail: nbalbekin@niuitmo.ru.

Куля Максим Сергеевич, 1987 года рождения, в 2010 году окончил Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики. В 2014 году защитил кандидатскую диссертацию по специальности 01.04.05 Оптика. Работает инженером на кафедре фотоники и оптоинформатики в Международной научной лаборатории фемтосекундной оптики и фемтотехнологий. Область научных интересов: цифровая голография, терагерцовое излучение, формирование изображения, сингулярная оптика. E-mail: mskulya@corp.ifmo.ru.

Петров Николай Владимирович, 1983 года рождения, в 2007 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия (бакалавр – 2004 г. и магистр – 2007 г.). Защитил кандидатскую диссертацию по специальности 01.04.05 Оптика в Национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), Санкт-Петербург, Россия в 2011 году. С 2011 года является старшим научным сотрудником и доцентом на кафедре фотоники и оптоинформатики, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия, и начиная с 2016 является руководителем Лаборатории цифровой и изобразительной голографии, а с 2017 года работает в должности ведущего научного сотрудника. Является со-автором 150 публикаций, из них более 50 в базах данных Scopus и WoS. Область научных интересов: голография, фемтосекундная оптика и терагерцовое интравидение. E-mail: n.petrov@niuitmo.ru.

ГРТИ: 29.31.15

Поступила в редакцию 7 февраля 2017 г. Окончательный вариант – 22 марта 2017 г.

TERAHERTZ PULSE TIME-DOMAIN HOLOGRAPHY IN DISPERSIVE MEDIA

N.S. Balbekin¹, M.S. Kulya¹, N.V. Petrov¹

¹ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

We propose a mathematical model for holographic relief reconstruction of phase objects based on the analysis of diffraction patterns of pulsed terahertz radiation, recorded in a dispersive medium. Numerical simulation shows the influence of the dispersion medium on the process of phase and relief reconstruction: disregard of the dispersion due to the refractive index of the medium where terahertz radiation propagates causes an error in the reconstructed image. The normalized standard deviation amounts to 0.3 when the wavefront propagation distance is 10 mm, increasing to 0.45 at a distance of 70 mm.

Keywords: digital holography, terahertz optics, imaging, dispersive medium.

Citation: Balbekin NS, Kulya MS, Petrov NV. Terahertz pulse time-domain holography in dispersive media. *Computer Optics* 2017; 41(3): 348-355. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-3-348-355.

Acknowledgements: The work was supported by the Government of Russian Federation under Grants 3.1893.2017/ПЧ and 074-U01.

References

- [1] Plusquellic DF, Siegrist K, Heilweil EJ, Esenturk O. Applications of terahertz spectroscopy in biosystems. *Chem Phys Chem* 2007; 8(17): 2412-2431. DOI: 10.1002/cphc.200700332.
- [2] Tsurkan MV, Balbekin NS, Sobakinskaya EA, Panin AN, Vaks VL. Terahertz spectroscopy of DNA. *Optics and Spectroscopy* 2013; 114(6): 894-898. DOI: 10.1134/S0030400X13060222.
- [3] Smirnov SV, Grachev YaV, Tsyarkin AN, Bepalov VG. Experimental studies of the possibilities of diagnosing caries in the solid tissues of a tooth by means of terahertz radiation. *J Opt Technol* 2014; 81(8): 464-467. DOI: 10.1364/JOT.81.000464.
- [4] Kemp MC. Detecting hidden objects: Security imaging using millimetre-waves and terahertz. *AVSS* 2007; 7-9. DOI: 10.1109/AVSS.2007.4425277.
- [5] Zeitler JA, Taday PF, Newnham DA, Pepper M, Gordon KC, Rades T. Terahertz pulsed spectroscopy and imaging in the pharmaceutical setting—a review. *J Pharm Pharmacol* 2007; 59(2): 209-223. DOI: 10.1211/jpp.59.2.0008.
- [6] Balbekin NS, Novoselov EV, Pavlov PV, Bepalov VG, Petrov NV. Nondestructive monitoring of aircraft composites using terahertz radiation. *Proc SPIE* 2015; 9448: 94482D. DOI: 10.1117/12.2180021.
- [7] Zhang XC, Xu J. Introduction to THz wave photonics. New York: Springer; 2010. ISBN: 978-1-4419-0977-0.
- [8] Lee YS. Principles of Terahertz Science and Technology. New York: Springer; 2009. ISBN: 978-0-387-09539-4.
- [9] Hu BB, Nuss MC. Imaging with terahertz waves. *Opt Lett* 1995; 20(16): 1716-1718. DOI: 10.1364/OL.20.001716.
- [10] Mittleman DM, Jacobsen RH, Nuss MC. T-Ray Imaging. *IEEE J Sel Top Quantum Electron* 1996; 2(3): 679-692. DOI: 10.1109/2944.571768.
- [11] Mittleman DM, Gupta M, Neelamani R, Baraniuk RG, Rudd JV, Koch M. Recent advances in terahertz imaging. *Appl Phys B* 1999; 68(6): 1085-1094. DOI: 10.1007/s003400050750.
- [12] Ahi K, Anwar M. Advanced terahertz techniques for quality control and counterfeit detection. *Proc SPIE* 2016; 9856: 98560G. DOI: 10.1117/12.2228684.
- [13] Ahi K, Anwar M. Modeling of terahertz images based on x-ray images: a novel approach for verification of terahertz images and identification of objects with fine details beyond terahertz resolution. *Proc SPIE* 2016; 9856: 985610. DOI: 10.1117/12.2228685.
- [14] Petrov NV, Kulya MS, Tsyarkin AN, Bepalov VG, Gorodetsky AA. Application of terahertz pulse time-domain holography for phase imaging. *IEEE Trans Terahertz Sci Technol* 2016; 6(3): 464-472. DOI: 10.1109/TTHZ.2016.2530938.
- [15] Zhang L, Zhang Y, Zhang C, Zhao Y, Liu X. Terahertz multiwavelength phase imaging without 2π ambiguity. *Opt Lett* 2006; 31(24): 3668-3670. DOI: 10.1364/OL.31.003668.
- [16] Zhang L, Zhong H, Zhang Y, Karpowicz N, Zhang C, Zhao Y, Zhang XC. Terahertz wave focal-plane multiwavelength phase imaging. *JOSA A* 2009; 26(5): 1187-1190. DOI: 10.1364/JOSAA.26.001187.
- [17] Zhang Y, Zhou W, Wang X, Cui Y, Sun W. Terahertz digital holography. *Strain* 2008; 44(5): 380-385. DOI: 10.1111/j.1475-1305.2008.00433.x.
- [18] Gorodetsky AA, Bepalov VG. THz pulse time-domain holography. *Proc SPIE* 2010; 7601: 760107. DOI: 10.1117/12.843249.

- [19] Bepalov V, Gorodetsky A. Modeling of referenceless holographic recording and reconstruction of images by means of pulsed terahertz radiation. *J Opt Tech* 2007; 74(11): 745-749. DOI: 10.1364/JOT.74.000745.
- [20] Semenova VA, Kulya MS, Petrov NV, Grachev YV, Tsytkin AN, Putilin SE, Bepalov VG. Amplitude-phase imaging of pulsed broadband terahertz vortex beams generated by spiral phase plate. *IRMMW-THz* 2016: 1-2.
- [21] Naftaly M, Cain MG, Lepadatu S, Buchacher T, Allam J. Dielectric constants of bulk ferroelectric PZT measured by terahertz time-domain spectroscopy. *Adv Appl Ceram* 2016; 115(5): 260-263. DOI: 10.1080/17436753.2015.1130199.
- [22] Shi L, Shumyatsky P, Rodríguez-Contreras A, Alfano R. Terahertz spectroscopy of brain tissue from a mouse model of Alzheimer's disease. *J Biomed Opt* 2016; 21(1): 015014. DOI: 10.1117/1.JBO.21.1.015014.
- [23] Lee SH, Koo MJ, Lee KH, Jazbinsek M, Kang BJ, Rotermund F, Kwon OP. Quinolinium-based organic electro-optic crystals: Crystal characteristics in solvent mixtures and optical properties in the terahertz range. *Mater Chem Phys* 2016; 169: 62-70. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2015.11.028.
- [24] Chamorro-Posada P, Vázquez-Cabo J, Rubiños-López Ó, Martín-Gil J, Hernández-Navarro S, Martín-Ramos P, Sánchez-Arévalo FM, Tamashauský AV, Merino-Sánchez C, Dante RC. THz TDS study of several sp² carbon materials: Graphite, needle coke and graphene oxides. *Carbon* 2016; 98: 484-490. DOI: 10.1016/j.carbon.2015.11.020.
- [25] Balbekin NS, Kulya MS, Rogov PY, Petrov NV. The modeling peculiarities of diffractive propagation of the broadband terahertz two-dimensional field. *Physics Proc* 2015; 73: 49-53. DOI: 10.1016/j.phpro.2015.09.120.
- [26] Poon TC, Banerjee PP. Contemporary optical image processing with MATLAB. Amsterdam, London, New York, Oxford, Paris, Shannon, Tokyo: Elsevier Science Ltd.; 2001. ISBN: 978-0-08-043788-5.
- [27] Grebenyuk AA; Ryabukho VP. Numerical focusing in digital holographic microscopy with partially spatially coherent illumination in transmission Proc SPIE 2014; 9031: 903119. DOI: 10.1117/12.2052837.
- [28] Dubois A. Handbook of full-field optical coherence microscopy: Technology and applications. Singapore: Pan Stanford Publishing Pte. Ltd.; 2016. ISBN: 978-981-4669-16-0.
- [29] Labiau S, David G, Gigan S, Boccara AC. Defocus test and defocus correction in full-field optical coherence tomography. *Opt Lett* 2009; 34(10): 1576-1578. DOI: 10.1364/OL.34.001576.
- [30] Nalegaev SS, Petrov NV. Numerical inversion of wavefront propagation dynamics with spatial nonlinearity. *Russ J Phys Chem B+* 2015; 9(4): 555-557. DOI: 10.1134/S1990793115040272.
- [31] Nalegaev SS, Petrov NV, Bepalov VG. Numerical reconstruction of wave field spatial distributions at the output and input planes of nonlinear medium with use of digital holography. *JPCS* 2014; 536(1): 012025. DOI: 10.1088/1742-6596/536/1/012025.

Authors' information

Nikolay Sergeevich Balbekin (b. 1989) graduated from National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics in 2013 (presently, ITMO University), majoring in Photonics and Optical Information Technology. Currently he works as an engineer and the deputy head of the International Scientific Laboratory of Digital and Art Holography. Research interests are terahertz spectroscopy, terahertz holography, the phase problem. E-mail: nbalbekin@niuitmo.ru.

Maksim Sergeevich Kulya (b. 1987) graduated from National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics in 2011 (presently, ITMO University), majoring in Photonics and Optical Information Technology. He received the Ph.D. degree in optics in 2014. Currently he works as an engineer in Center for Femtosecond Optics and Femtotechnologies at the Photonics and Optical Information Technology department. Research interests are digital holography, terahertz radiation, imaging, and singular optics. E-mail: mskulya@corp.ifmo.ru.

Nikolay Vladimirovich Petrov (b. 1983) received the B.Sc. and M.Sc. degrees in Physics from Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia, in 2004 and 2007, respectively, and the Ph.D. degree in optics from the National Research University of Information Technology, Mechanics and Optics, St. Petersburg, Russia, in 2011. Since 2011, he has been a Senior Researcher and Associate Professor with the Photonics and Optical Information Technology department, National Research University of Information Technology, Mechanics and Optics (ITMO University), St. Petersburg, Russia, and starting from 2016 he leads the Laboratory of Digital and Display Holography and been. He has coauthored more than 50 publication in the Scopus and WoS bibliographic databases, and more than 100 conference proceedings. His research interests are currently focused on holography, femtosecond optics and terahertz imaging. E-mail: n.petrov@niuitmo.ru.

Received February 7, 2017. The final version – March 22, 2017.