

УДК 535.41, 535.14

АВТОМАТИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ СПЕКЛ-МЕТОДОМ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ*

Б. А. Князев^{1,2}, А. А. Никитин¹, В. С. Черкасский¹

¹ Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Новосибирский государственный университет»,

630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

² Учреждение Российской академии наук

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

E-mail: knyazev@phys.nsu.ru

С помощью матричного микроболометрического приёмника в реальном времени выполнена запись освещаемых монохроматическим терагерцовым излучением изображений перемещающихся металлических и диэлектрических объектов, в том числе скрытых за непрозрачной преградой. Показано, что в терагерцовом диапазоне по динамике спекл-структуры изображений шероховатых объектов можно восстановить характеристики их движения. Разработан и программно реализован алгоритм автоматической обработки терагерцовых видеofilьмов с записью перемещения объектов.

Ключевые слова: спеклы, терагерцовое излучение, движение невидимых объектов, обработка изображений.

Введение. Спекл-метрология является в настоящее время одним из широко распространённых методов исследования перемещения объектов, их колебаний и деформации, измерения характеристик газовых потоков, изучения свойств поверхностей [1, 2]. Реализация схем спекл-метрологии требует высокой когерентности излучения, используемого для освещения объектов, и наличия регистраторов изображения, чувствительных к такому излучению. Поэтому до сих пор измерения проводятся в основном в видимом и ближнем ИК-диапазонах. Освоение в течение последних лет терагерцового диапазона частот (см., например, обзор [3]) не привело к появлению терагерцовой спекл-метрологии, так как в данной области обычно используются широкополосные источники с субпикосекундной длительностью импульса. Вследствие этого явление хаотической интерференции наблюдалось в указанном диапазоне [4, 5] только как флуктуации во времени интенсивности короткого импульса, прошедшего через случайно-неоднородную среду.

Появление мощного Новосибирского лазера на свободных электронах (ЛСЭ), генерирующего монохроматическое когерентное терагерцовое излучение [6, 7], позволило впервые зарегистрировать спекл-картины в терагерцовом диапазоне в пространственном домене [8], а следовательно, поставить вопрос о реализации на практике терагерцовой спекл-метрологии. Поскольку длины волн в этом диапазоне на три порядка величины превышают длины волн видимого диапазона, появляется возможность проведения измерения смещений, вибраций и деформаций большой амплитуды. Из-за больших размеров спеклов и их малого числа в поле наблюдения в терагерцовом диапазоне затруднительно использовать те из существующих методов обработки данных, в которых регистрируются

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 09-02-12158-офи-м), Президиума Сибирского отделения РАН (интеграционный проект № 89) и государственного контракта (№ 02.740.11.0556).

наложения (суммы, разности и т. п.) картин, состоящих из множества спеклов, но зато открывается возможность относительно легко вести наблюдения за движением индивидуальных спеклов, что было использовано в первых экспериментах [9].

В эксперименте, схема которого приведена на рис. 1, когерентное монохроматическое излучение ЛСЭ с длиной волны 130 мкм падало на медную фольгу с шероховатостью, большей длины волны. Фольга наклеена на диск, прикрепленный к оси электромотора. Излучение, рассеянное фольгой, диффузно освещало металлический объект (ключ) с практически гладкой поверхностью. Изображение ключа в терагерцовом диапазоне записывалось со скоростью 41 кадр/с при использовании матричного микроболометрического приёмника (ММБП) размером 240×160 элементов [10]. При высокой скорости вращения рассеивателя наблюдалось довольно качественное изображение ключа, поскольку спекл-картина за время экспонирования кадра (около 25 мс) успевала многократно «пробежать» по изображению. При низких скоростях вращения наблюдение за движением спеклов на изображении ключа, который практически являлся зеркалом для излучения, рассеянного фольгой, позволяет судить о параметрах движения рассеивателя.

Для демонстрации возможности такой обработки данных «вручную» были проведены измерения перемещения спеклов кадр за кадром на стадии затухающих вращательных колебаний диска после выключения электромотора. Три последовательных кадра на рисунке демонстрируют перемещение спекла. Когда выбранный спекл начинает исчезать из-за изменения суммарной фазы волны в данной точке или просто уходит из поля зрения, наблюдатель фиксирует другой подходящий спекл, измеряет его положение относительно предыдущего и продолжает обработку. Точки на графике рис. 1 представляют собой индивидуальные измерения, а кривая — их аппроксимацию функцией $y = y_0 + A \exp(-t/T) \sin[\pi(t - t_c)/w]$. В результате с очень высокой точностью были определены амплитуда (см. вертикальную ось на рис. 1), период ($w = 1,9$ с) и логарифмический декремент затухания колебаний ($T = 2,9$ с).

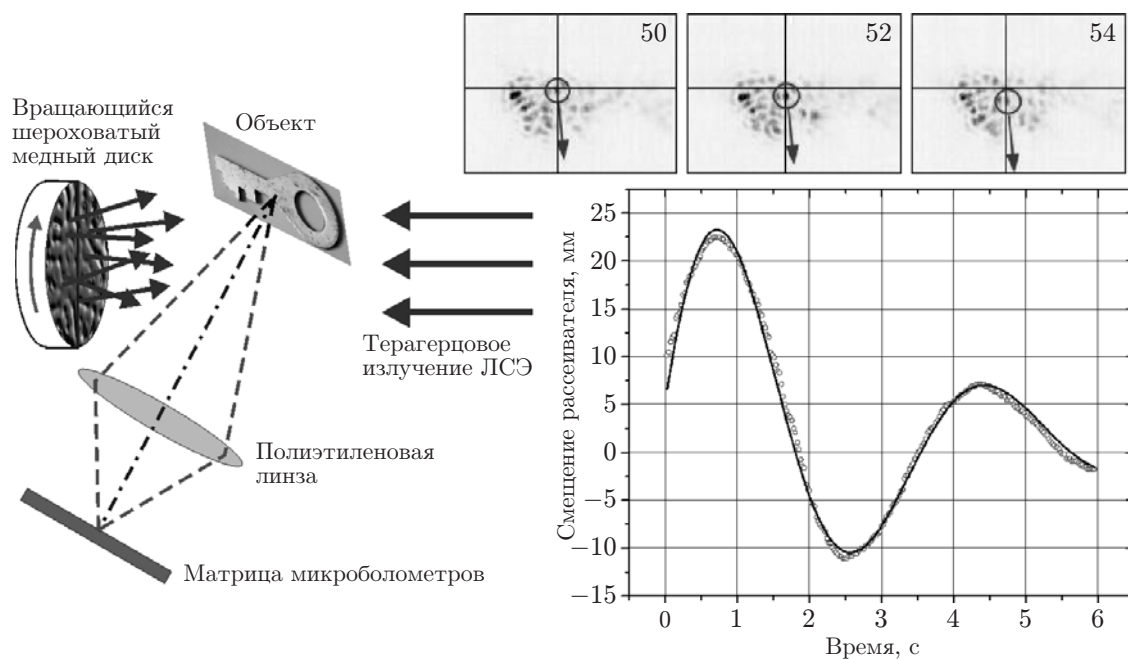


Рис. 1. Эксперимент по определению параметров движения вращающегося рассеивателя из медной фольги

Ясно, что такая обработка требует огромного времени и не может проводиться оперативно, как это необходимо, например, в системах промышленного контроля и системах безопасности.

Целью предлагаемого исследования является демонстрация регистрации в реальном времени спекл-картины объектов, скрытых за непрозрачной для видимого света перегородкой, и формирование подходов к слежению за перемещениями объектов с автоматической обработкой динамики спекл-структуры их изображений.

Эксперимент. Для реализации метода автоматической обработки данных создана установка, схема которой изображена на рис. 2, *a*. Объекты (два крайних — неоднородная медная фольга, в середине — пластмассовая головка ключа и металлическая шайба (рис. 2, *b*)) в отличие от предыдущего эксперимента установлены на линейном актуаторе, управляемом с помощью компьютера, и освещались направленным излучением ЛСЭ с низкой расходимостью. После включения актуатора осуществлялась запись терагерцового видеофильма на ММБП размером 320×240 элементов. Скорость записи составляла 25 кадр./с. При прохождении образцов через поле зрения оптической системы наблюдалась либо спекл-картина (в случае «шершавых» образцов), либо рефлексы от пластиковой или металлической поверхности. Между объектами и линзой можно устанавливать пластиковый экран, непрозрачный для видимого, но частично прозрачный для терагерцового излучения. В данной конфигурации была записана серия видеофильмов длительностью 720 кадров каждый, четыре из которых приведены на рис. 2, *c*. Эти видеофильмы де-

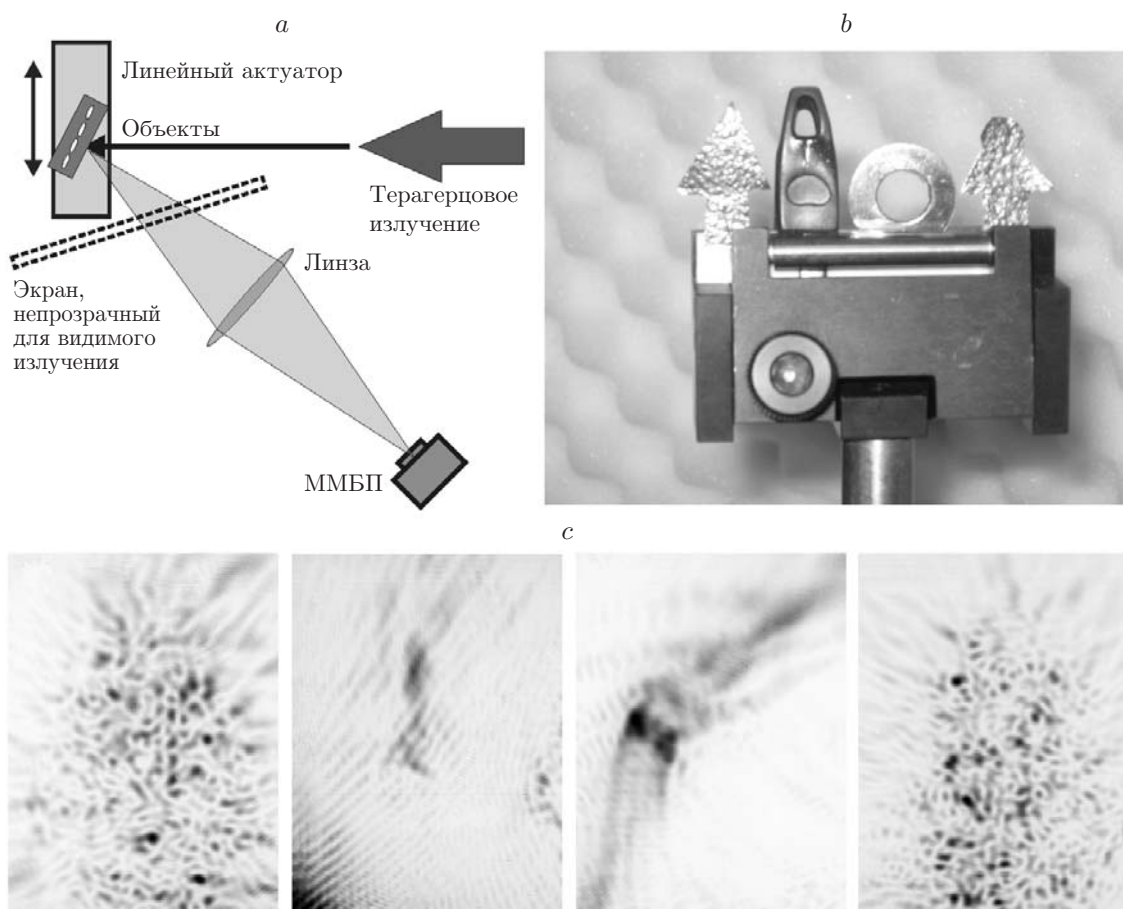


Рис. 2. Схема эксперимента и изображения объектов, полученные с помощью матричного микроболометрического приёмника при их освещении излучением с длиной волны 130 мкм

монстрируют возможность регистрации в реальном времени появления и движения как металлических, так и диэлектрических объектов, а в случае шероховатых объектов — детального отслеживания их перемещений.

Обработка данных эксперимента осуществлялась с использованием программы, написанной на языке Matlab. Для всего цикла обработки была создана библиотека функций, позволившая реализовать следующий алгоритм:

1. Считывание данных в формате TVID и перевод полученных изображений в трёхмерный массив данных Matlab.

2. Ручная или автоматическая фиксация «узловых» спеклов, по которым в дальнейшем ведётся наблюдение.

3. Покадровая фиксация координат X, Y трёх узловых спеклов с записью их в специальный массив результатов.

4. Постоянный контроль за степенью «исчезновения» того или иного узлового спекла и выбор ближайшего, обладающего «хорошими» характеристиками, с одновременной фиксацией координат нового спекла по отношению к старому.

5. Обработка полученных результатов для восстановления траектории движения объекта как целого.

Основная функция управления расчётом. В настоящее время функционирует полуавтоматический режим управления программой. После запуска основной программы, обеспечивающей интерфейс с данными, производится запрос на считывание файла данных, затем в окне выводится первый кадр записи — изображение, содержащее спеклы. Оператор с помощью мыши выделяет три спекла, которые считает узловыми (желательно расположенные не на одной прямой), и запускает процесс покадровой обработки. По окончании обработки одного видеофильма система выводит запрос на продолжение (считывание нового файла) или прекращает процесс.

Функция определения координат спекла. Для выделения одного узлового спекла и определения его координат, а также последующей работы с полученным изображением используется пакет Image Processing из библиотеки Matlab. Бинаризация серого изображения осуществляется с помощью стандартной функции GRAYTHRESH, реализующей алгоритм Оцу [11], заключающийся в выборе такого уровня отсечения, который минимизирует смешанную ковариацию между группами пикселей, отнесённых к «белым» и «чёрным». Отслеживание и запись координат перемещения спекла выполняются разработанной функцией TRACE, определяющей текущие координаты с помощью встроенной функции CENTROID. Эта функция находит координаты X, Y центра масс выбранной области. Последовательность координат записывается при смене одного кадра другим. После перемещения спекла (следующий кадр) ведётся поиск спекла, находящегося на минимальном расстоянии от предыдущего положения, и он идентифицируется как тот же спекл с новыми координатами. Для оценки правильности выбора и погрешности координат перемещения проверяется неизменность сторон заданного в начале треугольника.

Исчезновение узлового спекла и его замена. По мере продвижения объекта перед камерой у части спеклов яркость уменьшается, а у других, наоборот, увеличивается. Старые спеклы со временем исчезают, но появляются новые. Когда один из узловых спеклов становится по размеру меньше заданного значения (например, меньше 5 пикселей), он заменяется ближайшим спеклом большего размера, затем фиксируются координаты нового спекла по отношению к старым (переход к новому треугольнику), после чего процесс продолжается. Результатом такой процедуры является файл, содержащий последовательность координат трёх точек, по которым определяются направление и скорость перемещения объекта.

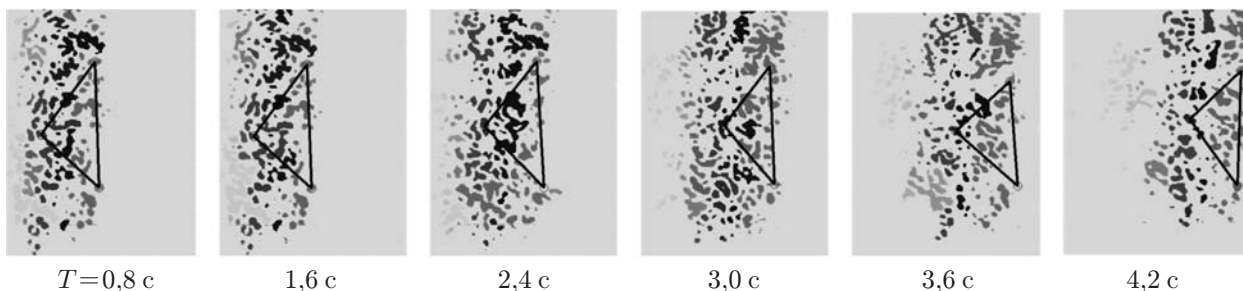


Рис. 3. Последовательность кадров, снятая с помощью ММБП. Размер кадра по горизонтали 12 мм

Результаты. Представленная выше программа использовалась для обработки изображений движущихся объектов как открытых, так и закрытых от ММБП экраном в автономном режиме, т. е. после завершения съёмки, хотя никаких принципиальных ограничений на обработку данных непосредственно в процессе измерений нет, и в дальнейшем этот режим планируется реализовать. На рис. 3 приведена последовательность полученных в эксперименте спекл-картин с выделенными выбранными узловыми спеклами, отображающая движение спеклов при переходе от кадра к кадру.

Результаты обработки (рис. 4) отчётливо демонстрируют, что регистрируемый по спеклограмме объект после включения актуатора перемещается с постоянной скоростью слева направо, как это и происходило в действительности. Скачки отдельных точек на графике могут быть связаны либо с ошибками вычислений при смене опорного спекла, либо с неоднородной скоростью вывода кадров из ММБП в память компьютера. Аппроксимация зависимости перемещения от времени методом наименьших квадратов (сплошная линия, $Y = -0,464t + 10,7$) позволила вычислить скорость перемещения объекта 0,5 мм/с, которая согласуется с заданной скоростью перемещения объекта актуатором.

При отделении объектов от регистратора частично прозрачными для терагерцового изображения экранами (бумага, картон, пластмасса) интенсивность картины падала, но оставалась на достаточном для автоматической обработки уровне. Заметим, что, если экран окажется шероховатым или неоднородным и будет искажать изображение, движение объекта всё равно можно определить по движению спеклов, хотя измеренные координаты могут в последнем случае несколько отличаться от истинных.

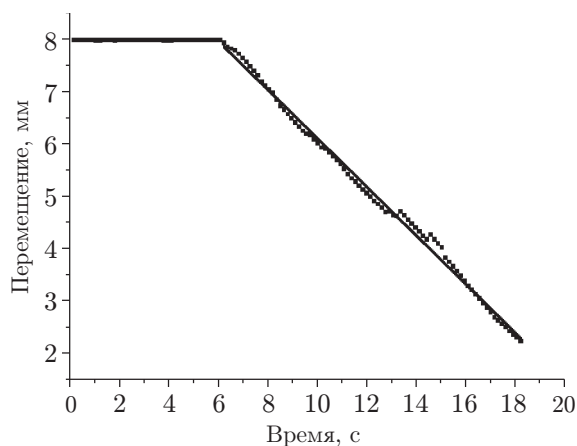


Рис. 4. Положение объекта как функции времени, определённое с помощью программы автоматической обработки перемещения его спекл-картины

Заключение. В данной работе впервые в терагерцовом диапазоне реализован алгоритм автоматической регистрации перемещения объекта, в том числе скрытого за непрозрачным экраном, по динамике его спекл-картины. Следующим шагом будет создание программного обеспечения для слежения за объектом в реальном времени.

Авторы выражают благодарность Г. Н. Кулипанову и Н. А. Винокурову за поддержку работы и полезные обсуждения, а также М. А. Щеглову, М. Г. Власенко, Я. В. Гетманову, О. А. Шевченко, В. В. Герасимову, Т. В. Саликовой, М. А. Демьяненко, Д. Г. Есаеву и И. В. Марчишину за помощь в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Archbold E., Ennos A. E.** Displacement measurement from double exposure laser photographs // Opt. Acta. 1972. **19**, N 4. P. 253–271.
2. **Goodman J. W.** Statistical properties of laser speckle patterns // Laser Speckle and Related Phenomena /Ed. J. C. Dainty. N. Y.: Springer-Verlag, 1975. P. 9.
3. **Mickan S. P., Zhang X.-C.** T-ray sensing and imaging // Intern. Journ. High Speed Electron. and Systems. 2003. **13**, N 2. P. 601–676.
4. **Jian Z., Pearce J., Mittelman D. M.** Characterizing individual scattering events by measuring the amplitude and phase of the electric field diffusing through a random medium // Phys. Rev. Lett. 2003. **91**, Is. 3. 033903.
5. **Pearce J., Doyle K., Jian Z. et al.** Nonstationary time-domain statistics of multiply scattered broadband terahertz pulses // JOSA B. 2006. **23**, Is. 8. P. 1506–1510.
6. **Antokhin E. A., Akberdin R. R., Arbuzov V. S. et al.** First lasing at the high-power free electron laser at Siberian center for photochemistry research // Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. A. 2004. **528**, Is. 1–2. P. 15–18.
7. **Knyazev B. A., Kulipanov G. N., Vinokurov N. A.** Novosibirsk terahertz free electron laser: instrumentation development and experimental achievements // Meas. Sci. and Technol. 2010. **21**, N 5. 054017.
8. **Винокуров Н. А., Демьяненко М. А., Есаев Д. Г. и др.** Спекл-структура изображений объектов, освещаемых монохроматическим когерентным терагерцовым излучением // Квантовая электроника. 2009. **39**, № 5. С. 481–486.
9. **Chashchina O. I., Knyazev B. A., Kulipanov G. N., Vinokurov N. A.** Real-time speckle metrology using terahertz free electron laser radiation // Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. A. 2009. **603**, Is. 1–2. P. 50–51.
10. **Dem'yanenko M. A., Esaev D. G., Knyazev B. A. et al.** Imaging with a 90 frames/s microbolometer focal plane array and high-power terahertz free electron laser // Appl. Phys. Lett. 2008. **92**, Is. 13. 131116.
11. **Otsu N.** A threshold selection method from gray-level histograms // IEEE Trans. Syst., Man, Cyber. 1979. **9**, N 1. P. 62–66.

Поступила в редакцию 16 апреля 2010 г.