

## РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

**Профилометрия твердых тел с помощью лазерной ультразвуковой томографии в реальном масштабе времени**

В. П. Зарубин<sup>1,2,a</sup>, А. С. Бычков<sup>1,2</sup>, А. А. Карабутов<sup>1,2</sup>, В. А. Симонова<sup>1,3,b</sup>,  
И. А. Кудинов<sup>1</sup>, Е. Б. Черепецкая<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Международный лазерный центр МГУ имени М. В. Ломоносова (МЛЦ МГУ).  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 62.

<sup>2</sup>Национальный исследовательский технологический университет (МИСиС).  
Россия, Москва, 119049, Ленинский просп., д. 2.

<sup>3</sup>Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН.  
Россия, 140700, Московская обл., г. Шатура, Святоозерская ул., д. 1.

E-mail: <sup>a</sup>zarubin.vasily@gmail.com, <sup>b</sup>vas@optoacoustics.ru

Статья поступила 20.12.2016, подписана в печать 31.03.2017.

Исследуется возможность использования метода лазерной ультразвуковой томографии для проведения профилометрии твердых объектов. Предлагаемый подход обеспечивает высокое пространственное разрешение, высокую производительность и возможность профилометрии загрязненных или погруженных в жидкости объектов. Предложены и реализованы алгоритмы для построения томограмм и распознавания по ним профиля исследуемых объектов с использованием технологии параллельного программирования NVIDIA CUDA. Прототип лазерного ультразвукового профилометра, работающего в режиме реального времени, использован для получения профилей поверхностей твердых тел вращения. Предложенный метод позволяет определять положение поверхностей цилиндрических объектов с точностью аппроксимации до 16 мкм в режиме реального времени.

*Ключевые слова:* профилометрия, лазерный ультразвук, лазерная ультразвуковая томография.

УДК: 534.08, 534.16. PACS: 42.30.-d, 42.30.Wb, 43.38.+n.

**Введение**

Проблема контроля профиля поверхностей особенно важна при производстве объектов сложных форм. Профилометрия может быть проведена с использованием различных методов, которые могут быть разбиты на две группы — контактные и бесконтактные.

Изначально наиболее широко используемыми профилометрами были механические профилометры в силу высокой точности измерений, надежности измерений и относительной простоты их использования [1, 2]. Низкая производительность контроля и трудности работы с шероховатыми и «мягкими» объектами требуют использования других методов профилометрии.

Эта проблема может быть решена с помощью оптических и ультразвуковых методов бесконтактной профилометрии. К наиболее широко используемым оптическим методам профилометрии относятся в первую очередь лазерная интерферометрия, а также лазерная триангуляция. Среди преимуществ оптических профилометров можно выделить разрешение до долей нанометров в сочетании с относительно высокой скоростью сканирования [3–5]. Еще более высокая производительность контроля достигается при использовании цифровых методов обработки оптических изображений.

При использовании оптической профилометрии требуется подготовка (отмывка) поверхности кон-

тролируемого объекта, что, вообще говоря, может существенно удорожить операцию профилометрии. Контроль профиля изделия «на линии» требует проведения исследования загрязненных образцов, в том числе находящихся в непрозрачных жидкостях (например, смазочных или охлаждающих). Использование оптической профилометрии в этом случае неэффективно, целесообразно применить методы ультразвуковой профилометрии.

Наиболее широко используемым методом ультразвуковой профилометрии является акустическая микроскопия [6]. Этот метод применяется для контроля изделий микроэлектроники, для объектов, находящихся в жидкости (как правило, в дистиллированной воде), и обеспечивает достаточно высокое (вплоть до субмикронного) пространственное разрешение. Ультразвуковая микроскопия для контроля формы при механическом производстве не так эффективна, что связано с достаточно высоким затуханием высокочастотного (100 МГц и более) ультразвука в органических жидкостях и, как следствие, снижением разрешения профилометрии; характерное значение составляет ~ 10 мкм. Этого, однако, вполне достаточно для широкой номенклатуры контролируемых деталей.

В настоящей работе используется метод лазерной ультразвуковой томографии для проведения профилометрии твердых объектов, находящихся в жидкостях. Метод лазерно-ультразвуковой томографии,

применяемый для проведения профилометрии, будем называть лазерно-ультразвуковой профилометрией. Лазерно-ультразвуковая профилометрия имеет ряд преимуществ перед традиционной ультразвуковой визуализацией профиля образцов.

Лазерная ультразвуковая диагностика предполагает генерацию зондирующего ультразвукового импульса за счет поглощения лазерного импульса в приповерхностном слое исследуемой среды (или специальном оптико-акустическом генераторе) и регистрацию прошедшего или рассеянного ультразвукового сигнала с высоким временным разрешением. Временная форма и амплитуда зондирующего ультразвукового импульса зависят от коэффициента поглощения света в оптико-акустическом генераторе, временной формы лазерного импульса и плотности поглощенной лазерной энергии.

Преимущество лазерного ультразвукового метода состоит в возможности генерации коротких и мощных апериодических ультразвуковых импульсов, недоступных обычным ультразвуковым излучателям [7]. Малая длительность зондирующего импульса приводит к повышению продольного пространственного разрешения при сохранении разумной ширины полосы сигнала. Одним из недостатков традиционных ультразвуковых методов диагностики является наличие «мертвой зоны», в которой сигнал, отраженный от неоднородности, накладывается на зондирующий. Апериодичность зондирующего импульса позволяет существенно сократить размеры «мертвой зоны». Кроме того, в режиме лазерной ультразвуковой диагностики ультразвуковые преобразователи работают только на прием, что позволяет достичь высокого временного разрешения.

Преимущества лазерного ультразвукового подхода для области профилометрии по сравнению с традиционными ультразвуковыми методами:

- увеличенное пространственное разрешение по сравнению с контактными и оптическими методами;
- возможность построения профиля загрязненных или погруженных объектов. Предлагаемый метод является развитием метода лазерной ультразвуковой профилометрии с использованием одиночного пьезоэлемента [1].

В свою очередь, использование томографического подхода обеспечивает значительное повышение быстродействия по сравнению с использованием одиночного пьезоэлемента — одновременно строится профиль протяженного участка поверхности. Очевидно, что сложность обработки сигналов для построения томограмм также значительно возрастает.

## 1. Метод

В текущей работе стоит задача разработки прототипа лазерно-ультразвукового профилометра, способного работать на производственной линии. Для этого необходима разработка принципов проведения лазерно-ультразвуковой профилометрии, разработка алгоритмов построения и обработки лазерно-ультразвуковых изображений и профиля образцов.

В работе [8] для профилометрии твердых объектов был применен времяпролетный лазерно-ультразвуковой метод с регистрацией отраженного сигнала с использованием одиночного пьезоэлемента. По существу, лазерно-ультразвуковая профилометрия является развитием времяпролетной лазерно-ультразвуковой профилометрии за счет увеличения количества приемных элементов, что было сделано ранее для проведения лазерно-ультразвуковой томографии

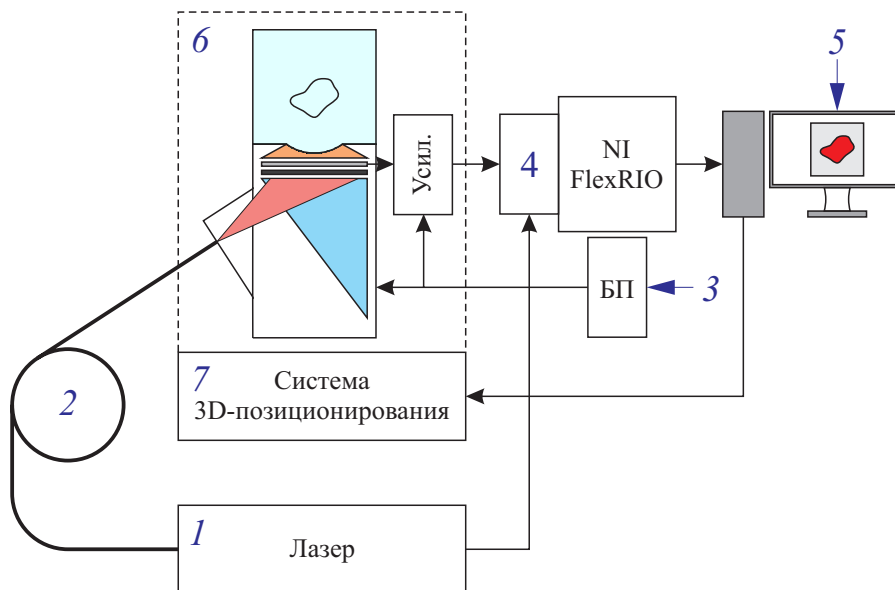


Рис. 1. Схема многоканальной системы для лазерной ультразвуковой и оптико-акустической томографии (1 — лазер, 2 — система доставки лазерного излучения, 3 — блок питания, 4 — система сбора и обработки экспериментальных данных, 5 — персональный компьютер, 6 — приемная антенна, 7 — система трехмерного позиционирования)

биологических объектов [9–11]. Основной принцип метода состоит в облучении объекта термоакустически сгенерированным ультразвуковым пучком, регистрации рассеянного и отраженного пучка антенной детекторов и компьютерной реконструкции изображения объекта — томограммы — с использованием специализированных алгоритмов.

Схема экспериментальной установки, используемой в качестве прототипа лазерного ультразвукового профилометра, изображена на рис. 1. Система содержит: 1 — Nd:YAG-лазер с модуляцией добротности (Quantel, USA),  $\lambda = 1064$  нм, частотой следования импульсов 20 Гц и энергией импульса 10 мДж; 2 — систему доставки лазерного излучения, включающую оптическое волокно; 3 — комбинированный блок питания, обеспечивающий электропитание приемной антенны и усилителя принимаемых электрических сигналов; 4 — скоростную многоканальную систему сбора и обработки экспериментальных данных на основе архитектуры NI FlexRIO, содержащую прецизионный аналого-цифровой преобразователь (частота дискретизации 50 МГц) и обеспечивающую перевод электрических сигналов с пьезоэлектрических приемных элементов в цифровую форму, их запоминание, усреднение и передачу по высокоскоростной линии связи в персональный компьютер; 5 — систему обработки данных, включающую персональный компьютер, связанный скоростной линией передачи данных с системой сбора и обработки экспериментальных данных, программно-аппаратную платформу CUDA (Compute Unified Device Architecture) и соответствующее ПО, осуществляющую прием цифровых данных, их обработку и построение изображения исследуемого объекта, а также интерактивное управление процессом передачи и обработки данных; 6 — приемную антенну, содержащую оптико-акустический преобразователь (ОА-генератор) и решетку широкополосных пьезоэлектрических приемных элементов; 7 — систему автоматизированного трехмерного позиционирования приемной антенны и исследуемого объекта. Система позволяет изменять относительное положение объекта в держателе с точностью 0.01 мм.

Управление системой сбора и обработки экспериментальных данных 4 и системой трехмерного позиционирования 7 осуществляется от персонального компьютера 5.

Предложенная в настоящей работе экспериментальная многоканальная система имеет два режима работы: лазерный ультразвуковой и оптико-акустический [9]. Однако для поставленной задачи установка используется только в лазерно-ультразвуковом режиме работы. В этом режиме лазерное излучение поглощается в веществе оптико-акустического генератора. За счет поглощения лазерного излучения происходит нестационарное расширение материала генератора, что приводит к генерации широкополосных ультразвуковых импульсов. Ультразвуковые

импульсы фокусируются акустической линзой на поверхности объекта. Важным условием работы установки является акустическое согласование всех элементов звукового тракта антенны. Рассеянный на неоднородностях иммерсионной жидкости и на поверхности исследуемого объекта ультразвуковой пучок фокусируется той же акустической линзой на поверхность пьезоэлектрической приемной антенны и регистрируется 16 приемными элементами. Пьезоэлектрические приемные элементы антенны изготовлены из полимерного материала ПВДФ, обеспечивая спектральную полосу приема 1.6–9 МГц. Такая ширина приема обеспечивает разрешение по глубине  $\Delta z = 0.1$  мм. Фокальное расстояние многоэлементной антенны составляло  $f = 40$  мм.

Основные методы, применяемые для реконструкции оптоакустических изображений, — модельные, спектральные и временные алгоритмы [12]. Однако разработка алгоритмов для реконструкции лазерно-ультразвуковых изображений сопряжена со значительными трудностями. В настоящей работе был применен алгоритм обратных проекций, эвристически модифицированный для лазерно-ультразвукового режима [10]. Преимущества алгоритма обратных проекций заключаются в возможности работы с малым числом приемных элементов, универсальности алгоритма для различных геометрий приемных элементов и относительной простоте параллелизации алгоритма. При работе в лазерно-ультразвуковом режиме происходит облучение плоским акустическим пучком. В приближении плоского пучка его распространение можно считать прямолинейным, и такой пучок рассеивается в каждой точке точечными рассеивателями. Поэтому формула обратных проекций может быть записана в виде

$$p_0^b(\mathbf{r}) = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta\Omega_i \times b(\mathbf{d}_i, t = \frac{-b+z+|\mathbf{d}_i-\mathbf{r}|}{c})}{\sum_{i=1}^N \Delta\Omega_i},$$

где  $p_0^b(\mathbf{r})$  — вычисляемое акустическое давление в точке с радиусом-вектором  $\mathbf{r}$ ,  $\mathbf{d}_i$  — радиус-вектор центра приемного элемента,  $z$  — продольная координата пиксела,  $b$  — продольная координата точки генерации лазерного ультразвука,  $N$  — количество приемных элементов,  $\Delta\Omega_i$  — телесный угол, под которым виден приемный элемент из рассчитываемой точки,  $t$  — общее время распространения акустической волны от генератора до рассчитываемой точки и обратно до пьезоэлектрической антенны,  $c$  — скорость звука в воде, полагаемая постоянной. Предполагается, что ноль продольной координаты соответствует положению приемной антенны. Величина обратной проекции  $b(r, t)$  может быть рассчитана по формуле

$$b(\mathbf{d}_i, t) = -2 \frac{\partial p(\mathbf{d}_i, t)}{\partial t},$$

где  $p(\mathbf{d}_i, t)$  — амплитуда давления, зарегистрированная приемным элементом с номером  $i$  в момент времени  $t$ .

Результатом работы алгоритма является томограмма — двумерный массив, содержащий до  $10^6$  точек при отображении в экспериментальной установке, показывающих распределение отражающих и рассеивающих поверхностей. В силу большой вычислительной сложности расчета томограммы алгоритм обратных проекций был реализован с использованием технологии параллельного программирования NVIDIA CUDA [13]. Такой подход к реализации алгоритма позволяет производить расчет томограмм в режиме реального времени. Реализованный алгоритм имеет возможность работы в оптоакустическом и лазерно-ультразвуковом режимах с дуговой и линейной антеннами. Проводится предварительная фильтрация сигнала, а также постобработка томограммы, которая будет описана ниже.

После расчета лазерно-ультразвуковой томограммы объекта основной задачей является построение профиля поверхности объекта по его томограмме. Сильное акустическое рассогласование иммерсионной жидкости (воды) и материала исследуемого объекта приводит к тому, что отраженный от поверхности объекта зондирующий импульс имеет наибольшую амплитуду. Поэтому профиль поверхности может быть построен по максимуму томограммы объекта.

Для улучшения качества определения профиля и последующего решения задачи дефектоскопии твердых материалов необходимо распознавание и выделение характерных частей поверхности объектов на лазерно-ультразвуковой томограмме. Такая обработка изображений может быть осуществлена с использованием методов компьютерного зрения. В настоящей работе для распознавания опорных прямолинейных участков профиля использовалось преобразование Хафа, родственное преобразованию Радона [14]. Выбор линейных участков в качестве опорных обусловлен простотой их обработки, а также широкой распространенностью линейных форм в промышленности.

Предлагаемый алгоритм построения и распознавания профиля объекта по лазерно-ультразвуковой томограмме состоит из нескольких шагов.

1. На первом шаге в каждом столбце томограммы определяется максимум интенсивности пикселей. Заметим, что, следуя теореме Котельникова, при частоте оцифровки АЦП, составляющей 50 МГц, в два раза большей верхней частоты сигнала (в данном случае 25 МГц), положение максимума сигнала может быть определено с любой точностью. Из сказанного следует, что в окрестности найденного максимума можно произвести локальную аппроксимацию значений пикселей столбца и определить уточненный максимум. Совокупность определенных таким образом максимумов каждого столбца ла-

зерно-ультразвуковой томограммы будем называть линией максимумов томограммы.

2. Для распознавания опорных прямых на линии максимумов используется преобразование Хафа. Данное преобразование позволяет выделять прямолинейные участки на изображении в случаях, когда эти участки по тем или иным причинам фрагментированы. Параметрическое уравнение прямой может быть записано в виде

$$X \cos \Theta + Y \sin \Theta = \rho,$$

где  $(X, Y)$  — координаты точки на изображении;  $\Theta, \rho$  — полярный угол и расстояние до прямой на изображении соответственно относительно некоторой выбранной точки (обычно выбирается один из углов изображения). На основе этого представления множество прямых, проходящих через точки  $(X, Y)$ , может быть отображено как множество точек в пространстве  $(\rho, \Theta)$ . Общая идея заключается в том, что преобразование задает интенсивность  $A(\rho, \Theta)$  каждой точки в пространстве  $(\rho, \Theta)$ , пропорциональной количеству ненулевых пикселей, лежащих на данной прямой. Функция  $A(\rho, \Theta)$  называется аккумуляторной функцией. Преобразование Хафа интегрирующее, что приводит к усреднению шумов вдоль изображения, позволяя получать более качественные аппроксимации. Другие преимущества преобразования Хафа — возможность разработки алгоритма для поиска объектов, контуры которых не задаются аналитически, а также возможность эффективной параллельной реализации алгоритма с использованием вычислений на графических процессорах [15]. Таким образом, результатом применения преобразования к изображению является дискретная, вычисленная с заданным шагом аккумуляторная функция  $A(\rho_i, \Theta_j)$ . Значения данной функции показывают, насколько высока вероятность нахождения на изображении прямой с данными полярным углом и расстоянием  $(\rho_i, \Theta_j)$ . Из сказанного следует, что, определяя локализованные максимумы аккумуляторной функции, возможно определить количество прямых и их примерное положение на профиле.

3. Последний шаг предлагаемого алгоритма — применение метода наименьших квадратов для установления коэффициентов уравнений прямых вида  $z_i(x) = k_i x + b_i$  (здесь  $i$  — порядковый номер аппроксимирующей прямой,  $x$  — поперечная координата,  $z$  — продольная координата, измеряются в миллиметрах), а также ошибок аппроксимации на основе результатов, полученных на предыдущих шагах. Ниже будут приведены рассчитанные на основе экспериментальных данных коэффициенты для исследуемых в работе объектов.

В качестве модельных объектов были исследованы тела вращения — цилиндр, цилиндр с проточками, изготовленные из дюралюминия (Д16Т) с акустическим импедансом  $Z = 18\,000$  кг/(м<sup>2</sup>·с). Диаметр цилиндров составлял 14 мм, длина 38 мм,

глубина и шаг проточек 2 мм. Исследуемый объект закреплялся вдоль оси, погружался в воду и при помощи системы позиционирования перемещался в фокальную плоскость антенны, после чего производились генерация и регистрация акустических сигналов, реконструкция томограммы на их основе и определение профиля объекта.

## 2. Обсуждение результатов

На рис. 2 приведено сравнение времен работы последовательного алгоритма построения томограммы на процессоре AMD-A8 и параллельного на видеокарте NVIDIA GeForce GTX 770. Построение томограммы размером  $800 \times 800$  пикселей требует около 25 мс, что является достаточным для получения томографических изображений в режиме реального времени с большим количеством пикселей. Реализованные алгоритмы были проверены на численно смоделированных с помощью интеграла Рэлея сигналах для ЛУ-рассеивателя.

На рис. 3, *а* представлена томограмма цилиндрического объекта. Приемная многоэлементная антенна находится в нижней области рисунка. Область положительных значений томограммы отмечена желтым, близких к нулю — салатным, отрицательных — синим. К томограмме был применен

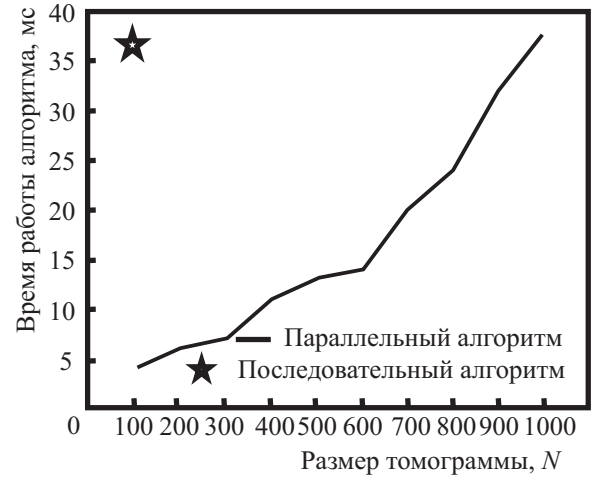


Рис. 2. Время работы параллельного алгоритма для построения томограммы размером  $N \times N$  пикселей. Синим указана опорная точка — время работы последовательного алгоритма на процессоре AMD-A8

предложенный выше алгоритм построения и распознавания профиля поверхности. На рис. 3, *в* изображена аккумуляторная матрица (дискретная аккумуляторная функция), на которой локализованы два центрально-симметричных максимума (аккумуляторная функция — это функция двух переменных  $\rho$  и  $\Theta$ , представленная в виде карты интенсивности,

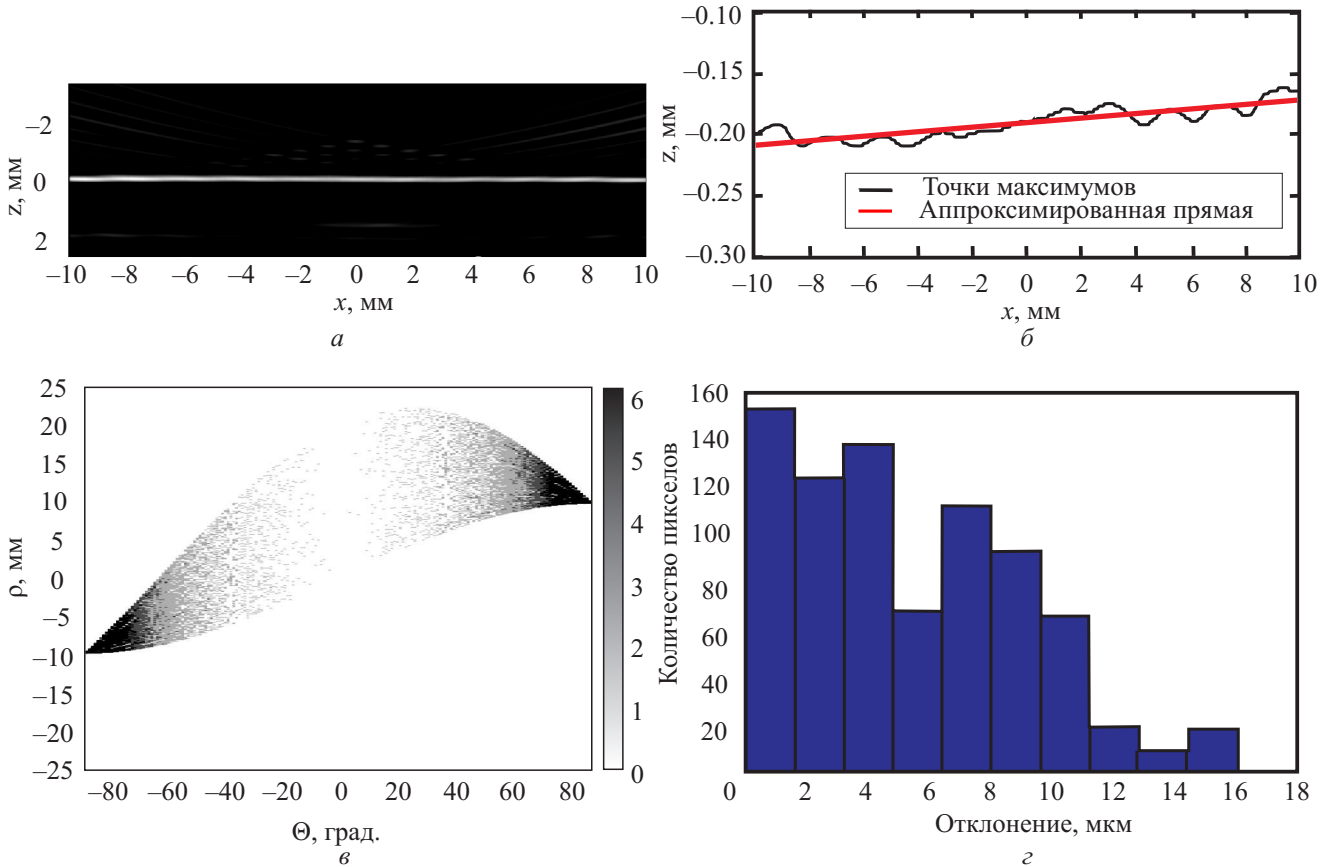


Рис. 3. Результаты лазерно-ультразвуковой профилометрии цилиндрического образца: *а* — лазерно-ультразвуковая томограмма; *б* — линия максимумов и аппроксимированная прямая; *в* — аккумуляторная матрица преобразования Хафа (для наглядности интенсивность пикселей указана в логарифмическом масштабе); *г* — распределение ошибок аппроксимации прямой

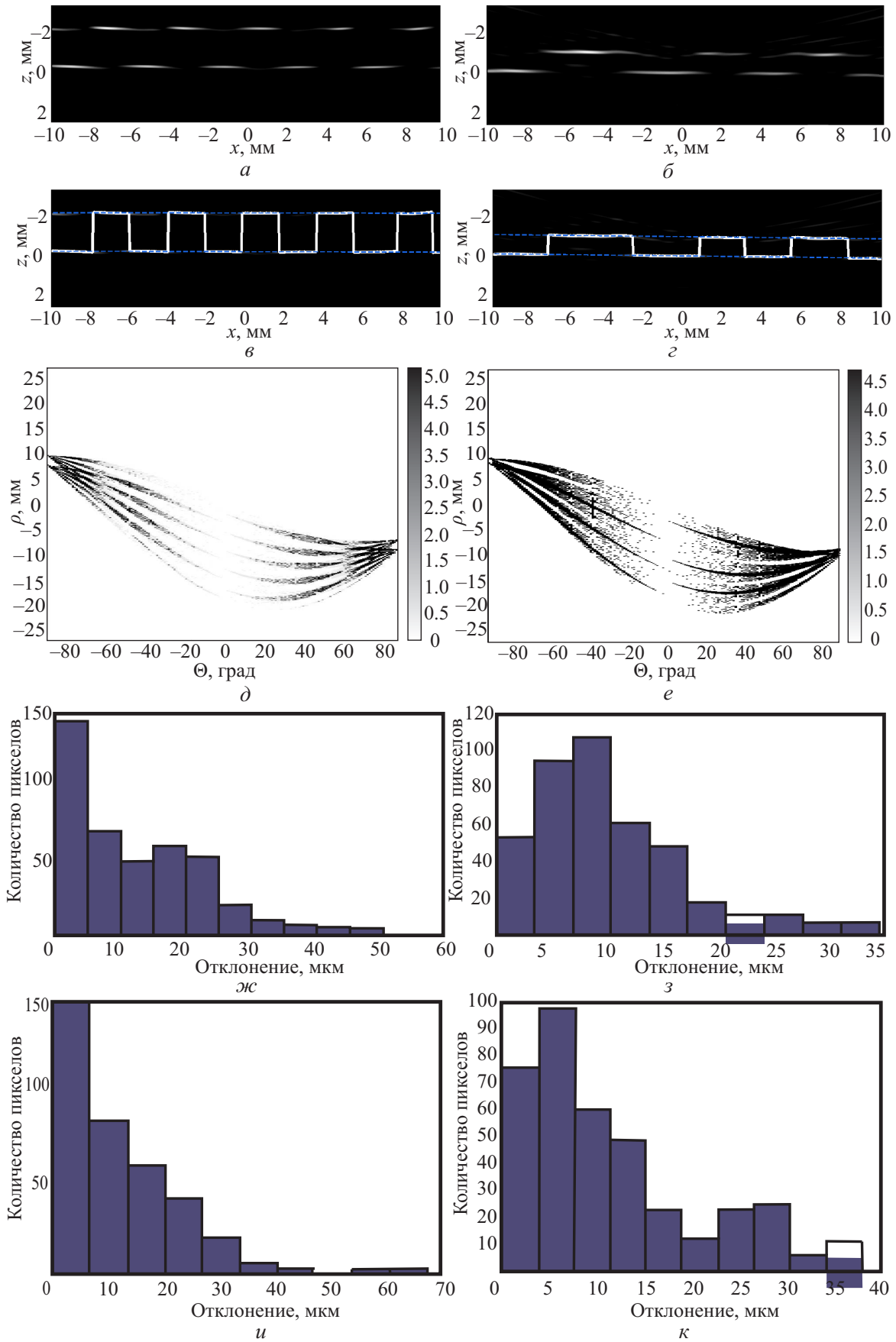


Рис. 4. Результаты лазерно-ультразвуковой профилометрии цилиндрических образцов с проточками (слева — регулярные проточки, справа — нерегулярные): *a, б* — лазерно-ультразвуковые томограммы; *в, г* — томограммы и аппроксимирующие профили; *д, е* — аккумуляторные матрицы преобразования Хаффа; *ж, з* — распределение продольной ошибки аппроксимирующего профиля внешней поверхности цилиндра; *и, к* — распределение продольной ошибки аппроксимации профилем внутренней поверхности

максимумы соответствуют наиболее темным пикселям), соответствующие одной прямой на томограмме объекта. Получены коэффициенты указанного выше уравнения прямой, аппроксимирующей профиль сечения цилиндра (рис. 3, б):

$$k_0 = (-1.86 \pm 0.08) \cdot 10^{-3},$$

$$b_0 = (-1.906 \pm 0.005) \text{ мм.}$$

Из данного уравнения прямой возможно определить наклон объекта к оси приемной антенны. На рис. 3, г построена гистограмма распределения ошибок аппроксимации. Согласно полученным результатам, точность аппроксимации поверхности объекта составила 16 мкм с надежностью 95%.

В качестве модельных объектов с неровной поверхностью были исследованы цилиндры с регулярными и нерегулярными проточками. Цилиндр с регулярными проточками имеет шаг 2 мм и глубину резьбы 2 мм. На лазерно-ультразвуковой томограмме (рис. 4, а) внешняя поверхность цилиндра с регулярными проточками отображается более четко, чем внутренняя. Данный эффект вызван в первую очередь множественными отражениями ультразвукового пучка о стенки проточки, что и сказывается на пространственном разрешении. Аккумуляторная матрица томограммы цилиндра с регулярными проточками содержит 4 локализованных максимума (рис. 4, д), соответствующие двум наиболее длинным прямым — внутренней и внешней поверхностям цилиндра (рис. 4, в). По результатам аппроксимации профиля прямыми были получены коэффициенты уравнений поверхностей и гистограммы распределения ошибок (рис. 4, ж, и):

- внешняя поверхность:

$$k_1 = (-2.42 \pm 0.27) \cdot 10^{-3},$$

$$b_1 = (-2.308 \pm 0.002) \text{ мм;}$$

- внутренняя поверхность:

$$k_2 = (-1.48 \pm 0.32) \cdot 10^{-3},$$

$$b_2 = (-0.323 \pm 0.003) \text{ мм.}$$

По уравнениям прямых может быть определена глубина проточки ( $1.985 \pm 0.005$ ) мм, в пределах точности изготовления модельного объекта соответствующая глубине проточки 2 мм. Среднеквадратичная ошибка аппроксимации вертикальных линий регулярного профиля (рис. 4) составляет 0.21 мм и является высокой, что вызвано низким поперечным разрешением многоэлементной антенны. Низкое поперечное разрешение антенны связано с усреднением ультразвуковых сигналов по ширине каждого приемного элемента, ширина которых составляла 1 мм.

Следующий исследованный объект — цилиндр с нерегулярными проточками. Нерегулярные проточки имеют различную ширину, составляющую от 2 до 7 мм при одинаковой глубине 1 мм. Результаты исследования такого цилиндра (рис. 4, б, г, е, з, к)

близки к результатам, полученным при исследовании цилиндра с регулярными проточками. Основное отличие состоит в том, что продольная ошибка аппроксимации уменьшается за счет меньшей глубины проточек. Ошибка поперечной аппроксимации возрастает при нерегулярно расположенных проточках и составляет 0.26 мм. Получены коэффициенты уравнений прямых, аппроксимирующих внешнюю и внутреннюю поверхности цилиндра:

- внешняя поверхность:

$$k_3 = (0.011 \pm 0.003),$$

$$b_3 = (-1.092 \pm 0.002) \text{ мм;}$$

- внутренняя поверхность:

$$k_4 = (0.011 \pm 0.001),$$

$$b_4 = (-0.104 \pm 0.002) \text{ мм.}$$

Из этих уравнений может быть определена глубина проточки ( $0.988 \pm 0.004$ ) мм.

Задачи профилометрии, для решения которых перспективен лазерно-ультразвуковой метод, требуют разрешения микронного порядка, что приводит к существованию большого количества критических факторов, влияющих на разработку прототипа лазерного ультразвукового профилометра. Можно выделить из них основные [16, 17]:

- конфигурация антенны;
- характеристики приемных элементов и их количество;
- калибровка антенны;
- точность изготовления деталей и конструкции профилометра;
- относительный угол наклона исследуемой поверхности;
- локальная кривизна и шероховатость поверхности;
- неизменность температуры и состава иммерсионной жидкости;
- усовершенствованные алгоритмы построения и обработки изображений.

Решение задачи лазерно-ультразвуковой профилометрии с высокой точностью в реальном времени является важным шагом на пути к разработке томографической дефектоскопии твердых объектов. Перечисленные факторы, влияющие на разрешение профилометра, определяют область дальнейших исследований, направленных в первую очередь на оптимизацию параметров прототипа, а также совершенствование алгоритмов обработки.

## Заключение

Таким образом, в работе был предложен метод лазерного ультразвуковой томографии для проведения профилометрии. Были реализованы алгоритмы для обработки сигналов, построения томограмм объектов, профиля поверхности, а также алгоритм для автоматического расчета положения прямых, аппроксимирующих профиль сечения поверхности.

Реализация алгоритмов с использованием технологии параллельного программирования NVIDIA CUDA позволила проводить томографическую диагностику с высоким числом пикселей на томограмме в режиме реального времени.

Испытан прототип автоматизированного лазерного ультразвукового профилометра, работающего в режиме реального времени. Прототип позволил производить определение положения поверхностей цилиндрических объектов с точностью аппроксимации до 16 мкм с надежностью 95%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки в рамках программы повышения конкурентоспособности НИТУ «МИСиС» (№ К1-2015-025), а также Российского научного фонда (грант № 16-17-10181).

### Список литературы

1. Alves J.M., Brito M.C., Serra J.M., Vallera A.M. // *Review of Scientific Instruments*. 2004. **75**, N 12. P. 5362.
2. Lee D.H., Cho N.G. // *Meas. Sci. Technol.* 2012. **23**.
3. Endo T., Yasuno Y., Makita S. et al. // *Opt. Express*. 2005. **13**.
4. Schmit J., Reed J., Novak E., Gimzewski J.K. // *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 2008. **10**. 064001.
5. Dufour M.L., Lamouche G., Detalle V. et al. // *Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2005. **47**, N 4. P. 216.
6. Dong F., David K.H., Warhol M. // *J. Nondestr. Eval.* 2001. **20**.
7. Гусев В.Е., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991.
8. Karabutov A.A., Kubyshkin A.P., Panchenko V.Ya., Podymova N.B. // *SPIE Laser Applications Engineering*. 1997. **3091**.
9. Симонова В.А., Саватеева Е.В., Карабутов А.А. // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* 2009. № 4. С. 35.
10. Wurzinger G., Nuster R., Schmitner N. et al. // *Biomed. Opt. Express*. 2013. **4**.
11. Jose J., Willemink R.G.H., Resink St. et. al. // *Optics Express*. 2011. **19**, N 3. P. 2093.
12. Rosenthal A., Ntziachristos V., Razansky D. // *Current Medical Imaging Reviews*. 2013. **9**. P. 318.
13. NVIDIA CUDA Programming Guide. 2016.
14. Szeliski R. *Computer vision: algorithms and applications*. Springer Science & Business Media, 2010.
15. Van den Braak G.-J., Nugteren C., Mesman B., Corporaal H. // *Proc. of 13th International Conference Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems (ACIVS 2011)*.
16. Pelivanov I.M., Simonova V.A., Khohlova T.D., Karabutov A.A. // *Proc. SPIE. Photons Plus Ultrasound: Imaging and Sensing*. 2010. **7564**. 756428.
17. Paltauj G., Nuster R., Haltmeier M. // *Inverse Probl.* 2007. **23**.

### Real-time laser ultrasound tomography for profilometry of solids

V. P. Zarubin<sup>1,2,a</sup>, A. S. Bychkov<sup>2</sup>, A. A. Karabutov<sup>1,2,3</sup>, V. A. Simonova<sup>1,3,b</sup>, I. A. Kudinov<sup>1,2</sup>, E. B. Cherepetskaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> International Laser Center, Lomonosov Moscow State University (ILC MSU). Moscow 119991, Russia.

<sup>2</sup> National University of Science and Technology (NITU MISIS). Moscow 119049, Russia.

<sup>3</sup> Institute on Laser and Information Technologies, Russian Academy of Sciences (ILIT RAS).

Moscow Region 140700, Shatura, Russia.

E-mail: <sup>a</sup> zarubin.vasily@gmail.com, <sup>b</sup> vas@optoacoustics.ru.

We studied the possibility of applying laser ultrasound tomography for profilometry of solids. The proposed approach provides high spatial resolution and efficiency, as well as profilometry of contaminated objects or objects submerged in liquids. The algorithms for the construction of tomograms and recognition of the profiles of studied objects using the parallel programming technology NVIDIA CUDA are proposed. A prototype of the real-time laser ultrasound profilometer was used to obtain the profiles of solid surfaces of revolution. The proposed method allows the real-time determination of the surface position for cylindrical objects with an approximation accuracy of up to 16  $\mu\text{m}$ .

*Keywords:* profilometry, laser ultrasound, laser ultrasound tomography.

PACS: 42.30.-d, 42.30.Wb, 43.38.+n.

20 December 2016.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2018. **72**, No. 1. Pp. 75–82.

### Сведения об авторах

1. Зарубин Василий Павлович — аспирант; тел. (495) 939-53-09, e-mail: zarubin.vasily@gmail.com.
2. Бычков Антон Сергеевич — аспирант; тел. (495) 939-53-09, e-mail: abychkov@optoacoustics.ru.
3. Карабутов Александр Алексеевич — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел. (495) 939-53-09, e-mail: aak@optoacoustics.ru.
4. Симонова Варвара Аркадьевна — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел. (495) 939-53-09, e-mail: vas@optoacoustics.ru.
5. Кудинов Игорь Александрович — вед. инженер; тел. (495) 939-53-09, e-mail: igor@optoacoustics.ru.
6. Черепецкая Елена Борисовна — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел. (495)236-95-93, e-mail: echerepetskaya@mail.ru.