

УДК 519.677

## Определение микроперемещений объекта с помощью математической обработки изображений, получаемых в лазерном микроскопе

М.В. Тригуб<sup>1,2</sup>, Е.З. Дашинимаева<sup>1</sup>, Г.С. Евтушенко<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 28.03.2013 г.

Предложен алгоритм обработки изображений, получаемых в лазерном микроскопе, позволяющий получать информацию о перемещениях наблюдаемого объекта или его отдельных частей. Разработан макрос в среде MATLAB, реализующий данный алгоритм, и проведено его тестирование на различных объектах. Установлено, что при линейных перемещениях объекта с шагом от 10 до 500 мкм погрешность измерения не превышает 5%.

*Ключевые слова:* изображение; математическая обработка, погрешность; image, mathematical processing, error.

### Введение

Уникальное сочетание свойств активных сред лазеров на парах металлов позволяет применять их в различных областях науки и техники [1, 2]. В частности, высокое качество пучка в сочетании с относительно большими энергиями импульсов генерации позволяет проводить обработку различных материалов [2, 3]. Однако, несмотря на довольно длительный период их изучения, до сих пор остается нерешенным ряд проблем, связанных с определением предельных частотно-энергетических характеристик, повышением практического КПД, увеличением срока службы и т.д. [1–5]. Поэтому в большей части применений данный тип лазеров вытесняется другими, например волоконными.

Несмотря на это, имеются задачи, которые можно решить, используя только активную среду лазеров на парах металлов благодаря ее однородности, высокой спектральной яркости, рекордному усилению, высокой частоте следования импульсов (ЧСИ). Речь идет об активных оптических системах (АОС) с усилителями яркости изображения, так называемых лазерных проекционных микроскопах (ЛПМ) и лазерных мониторах (ЛМ) [6, 7]. Подобные системы активно изучались в 80-е гг., а затем интерес к ним ослаб.

Новый толчок развитию АОС дало появление скоростных фото- и видеорегистраторов, позволяю-

щих производить съемку с частотами одного порядка, подобными ЧСИ лазеров на парах металлов. В связи с этим стало возможным наблюдать процессы, экранированные от наблюдателя широкополосной фоновой засветкой, а в сочетании с применением активных сред лазеров на парах бромида меди — с высоким временным разрешением.

В ряде работ рассмотрены методы, позволяющие улучшить качество получаемых изображений в АОС с усилителями яркости [7, 8]. При этом основное внимание уделялось аппаратным методам уменьшения искажений, вносимых системой в получаемые изображения. К ним относятся методы, основанные на использовании системы синхронизации усилителя яркости и регистрирующей аппаратуры (синхронизация ведется по источнику накачки), подбора режима работы усилителя яркости, позволяющего минимизировать фон (как следствие, увеличить контраст) и т.д. [8]. С появлением программного обеспечения, в том числе находящегося в свободном доступе, для математической обработки изображений становится возможным разработка алгоритмов для обработки информации, получаемой в АОС. Это позволит изменять качество изображений и проводить их обработку с целью выявления характеристик наблюдаемого процесса или объекта (скорость перемещения, изменение отражательной способности и т.д.).

В настоящей статье рассматриваются один из таких алгоритмов и возможность его реализации для определения перемещений объекта по изображениям, полученным в лазерном микроскопе с покадровой регистрацией изображения [7].

\* Максим Викторович Тригуб (trigub@tpru.ru); Евгения Зориктуевна Дашинимаева (zhen\_da@mail.ru); Геннадий Сергеевич Евтушенко (ime@tpru.ru).

## Алгоритм определения перемещений объекта

Существуют различные подходы к оценке носительного движения по изменению изображений во времени. Наиболее простым является корреляционный подход, который позволяет достичь максимального соответствия между близко расположенными областями изображения при условии, что они не меняются во времени. Критерием в этом случае являются коэффициенты корреляции или мера связанности [8].

Использование кросскорреляции предполагает измерение квадрата евклидова расстояния (расстояние в многомерном пространстве):

$$d_{f,t}^2(u, v) = \sum_{x,y} (f(x, y) - t(x - u, y - v))^2,$$

где  $f$  – яркости элементов (пикселей) сравниваемого участка изображения (зона сканирования);  $t$  – яркости элементов (пикселей) шаблона [10];  $u, v$  – координаты сравниваемого участка;

$$d_{f,t}^2(u, v) =$$

$$= \sum_{x,y} (f^2(x, y) - 2f(x, y)t(x - u, y - v) + t^2(x - u, y - v)).$$

Выражение  $\sum_{x,y} (t^2(x - u, y - v))$  – константа, если

выражение  $\sum_{x,y} f^2(x, y)$  – примерно постоянное, то

кросскорреляционное выражение будет иметь вид

$$c(u, v) = \sum_{x,y} f(x, y)t(x - u, y - v). \quad (1)$$

Выражение (1) измеряет сходство между изображением и шаблоном.

Существует несколько недостатков использования формулы (1):

- если яркость пикселей изображения изменяется в зависимости от положения, использование (1) может привести к ошибке. Например, корреляция между элементом и точно соответствующей областью в изображении может быть меньше корреляции между элементом и ярким пятном;

- диапазон  $c(u, v)$  зависит от размера элемента;

- уравнение (1) не инвариантно к изменению яркости пикселей, вызванному изменением условий освещения по всей поверхности изображения.

Для того чтобы преодолеть эти трудности, нормализуем изображение и шаблон на единицу длины, что дает косинусовидный коэффициент корреляции:

$$K(u, v) =$$

$$= \frac{\sum_{x,y} [(f(x, y) - \bar{f}(u, v))(t(x - u, y - v) - \bar{t}(x, y))]}{\sqrt{\sum_{x,y} (f(x, y) - \bar{f}(u, v))^2 \sum_{x,y} (t(x - u, y - v) - \bar{t}(x, y))^2}}, \quad (2)$$

где  $\bar{t}, \bar{f}(u, v)$  – среднеарифметические значения элементов тех же участков [9, 10].

Для демонстрации возможностей автоматизированного определения перемещений по изображениям проведен следующий эксперимент. Получены изображения периодичного объекта с высоким контрастом (металлическая сетка), который управляемо перемещался. При этом производилась регистрация объекта после изменения его положения. Определение вектора перемещений проводилось с использованием разработанного алгоритма в среде MATLAB, а также ImageJ [11]. Будем считать, что начальное изображение получено в первый момент времени, следующее изображение – после перемещения.

Алгоритм определения вектора перемещения изображения состоит из следующих основных операций:

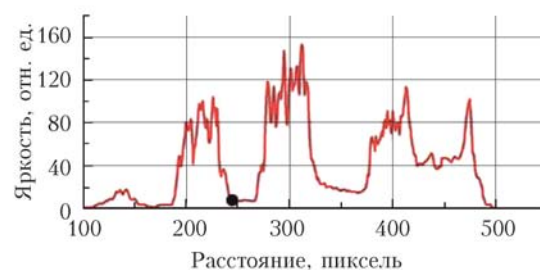
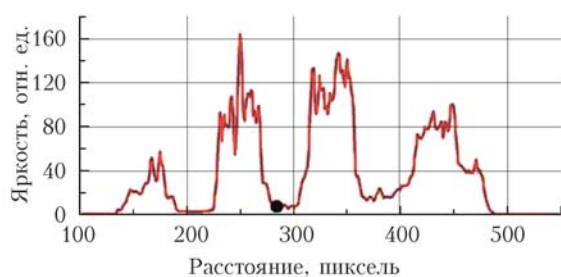
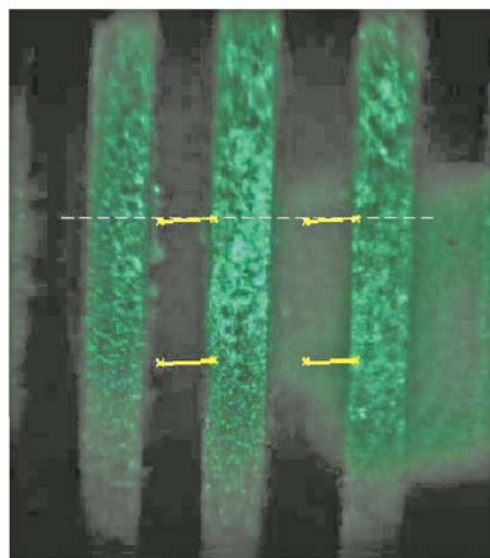
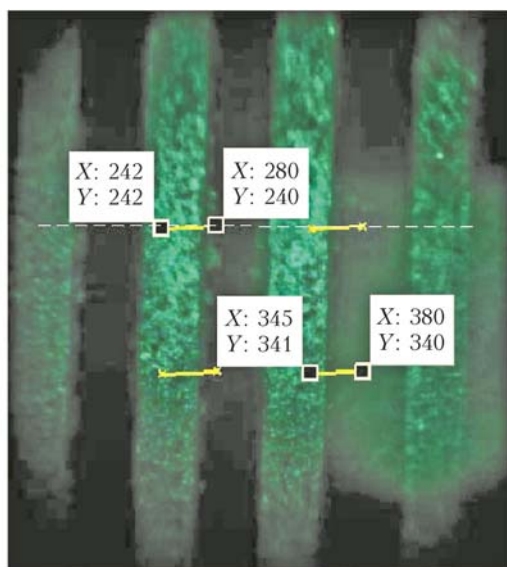
- разбиение начального изображения на расчетные области (области интереса) равного размера;
- разбиение следующего изображения на области возможного перемещения областей интереса большего размера;
- расчет нормированной корреляционной функции;
- нахождение максимума корреляционной функции;
- нахождение координаты области интереса в области возможного перемещения и построение вектора перемещения.

Смещение между вторым и первым кадрами изображения находится с помощью встроенной функции среды MATLAB – нормированной двумерной взаимной корреляции. Данная функция вычисляет нормированную взаимную корреляцию двух матриц разного размера. При этом значения исходной матрицы не должны быть все одинаковыми. Результирующая матрица содержит корреляционные коэффициенты, которые представляют собой числа в диапазоне от  $-1,0$  до  $1,0$ . По этой матрице производится поиск максимального корреляционного пика, отвечающего наиболее вероятному смещению в расчетной области. Поскольку изображение представляется в виде конечного числа элементов, найденное положение максимума будет иметь целочисленные координаты в пикселях. Далее находим координату левого верхнего угла области интереса в области возможного перемещения и определяем расстояние перемещения области в координатах  $[X, Y]$ , строим вектор перемещения на изображении.

## Апробация алгоритма

На рис. 1 показаны начальное (а) и конечное (б) изображения объекта (металлическая сетка) с векторами перемещений и соответствующие им яркости пикселей по указанной пунктиром линии. Использовалась схема лазерного монитора, представленная в работе [6].

Усилитель яркости выполнен на основе среды CuBr-лазера, длина активной зоны 900 мм, диаметр 50 мм, ЧСИ 24 кГц. Изображение формировалось



*a*

*б*

Рис. 1. Изображения объекта с указанными векторами перемещений и яркость пикселей по указанной пунктиром линии

с помощью объектива с фокусным расстоянием 80 мм. Регистрация изображений проводилась на камеру Fastec HiSpec1.

Линейное перемещение (по оси  $X$ ), измеренное для нескольких областей объекта, составило от 38 до 35 пикселей. Разброс объясняется расположением объекта и элементов оптической схемы, изменением характеристик усилителя во времени и др. Проверка работоспособности алгоритма проводилась с помощью приложения ImageJ [11], в котором были построены графики яркости пикселей по горизонтальной линии, указанной пунктиром. Перемещение определялось для наиболее характерной области – переход из минимума в максимум (точки на кривых) – грань сетки. Согласно измерениям перемещение составляет 35 пикселей. Отклонение связано с погрешностью измерения и изменением яркости пикселей изображения в зависимости от усилительных характеристик усилителя.

Следующим объектом послужила металлическая пластина. Результаты визуализации при ее перемещении и яркость пикселей по указанной линии показаны на рис. 2.

Как и в первом случае, на изображении имеется блик, являющийся результатом паразитного отражения от линзы, располагающейся перед объек-

том [7]. Среднее перемещение по оси  $X$  составило 52 пикселя. Причем смещение по оси  $Y$  свидетельствует о несоосном расположении объекта и оптических элементов схемы лазерного микроскопа. Согласно измерениям, сделанным в ImageJ, перемещение составляет 54 пикселя. Таким образом, предложенный алгоритм и его реализация в программе MATLAB позволяют с высокой точностью в автоматическом режиме определять перемещения наблюдаемого объекта или его участка.

Для демонстрации возможностей определения перемещений в абсолютных величинах (мкм) проводилась визуализация тестового объекта – камеры Горяева (ТУ 64-1-816-84), которая перемещалась с помощью столика с микроподачей (производитель Standa). Для повышения контраста изображения реализована схема лазерного проекционного микроскопа (монитора) в проходящем свете [6]. Для этого за объектом установлено глухое зеркало. Размер стороны большого квадрата составлял 0,2 мм, малого квадрата 0,05 мм с точностью 0,015 мм. Визуализация осуществлялась с помощью высокоскоростной камеры Fastec HiSpec1, размер пикселя составлял  $14 \times 14$  мкм. Объект перемещался с шагом 50 и 100 мкм. Фрагменты изображений и векторов показаны на рис. 3.

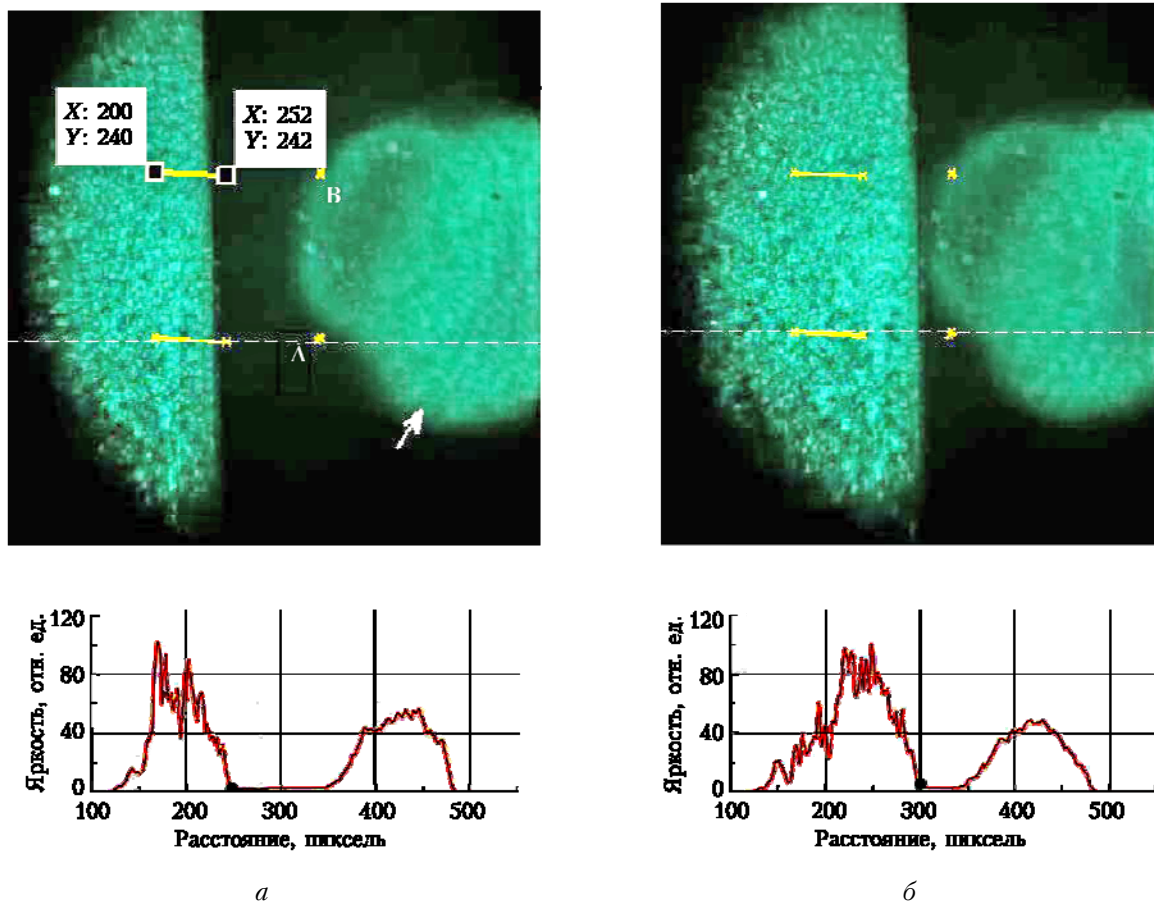


Рис. 2. Изображения тест-объекта с указанными векторами перемещений и яркость пикселей по указанной пунктиром линии; А и В – неподвижные точки

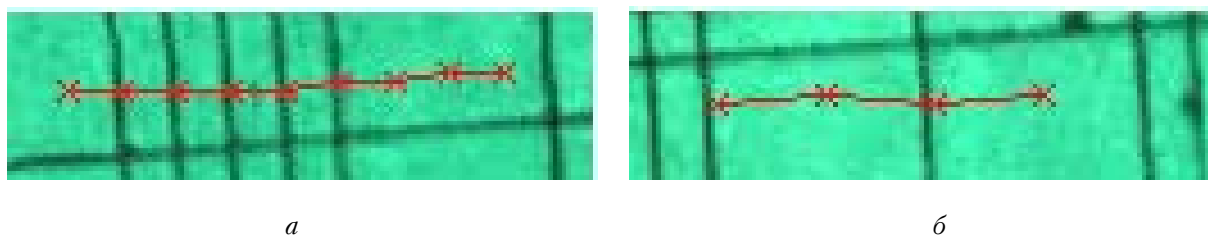


Рис. 3. Изображение камеры Горяева и вектор перемещений

Перемещение с шагом 50 мкм проводилось 8 раз, с шагом 100 мкм – 4 раза. Согласно расчетам оптической схемы и размерам пикселя матрицы используемой камеры размер пикселя соответствовал расстоянию 4 мкм на объекте. Для первого случая усредненное перемещение составило 51,2 мкм, погрешность определения – менее 3%. Для перемещений с шагом 100 мкм среднее перемещение составило 99,897 мкм, погрешность – менее 0,2%. Данные результаты свидетельствуют о высокой точности разработанного макроса.

### Заключение

Предложенный алгоритм определения перемещения объектов по их изображениям, полученным

с помощью АОС с усилителями яркости, реализован в среде MATLAB в виде макроса. Проведено экспериментальное исследование его работоспособности на изображениях и видеорядах, полученных с помощью лазерного монитора. Удалось получить высокую точность определения линейных перемещений, которая зависит от оптической схемы (особенности расположения объектов), параметров усилителя яркости – стабильность коэффициента усиления во времени, правильности выбора входных условий для макроса. К последним относятся размеры (в пикселях) установленной области интереса и области поиска. При этом необходимо учитывать возможность попадания в артефакты на изображениях (блики), что может исказить реальную карти-

ну. К тому же имеются ограничения по визуализации процессов, в которых происходят значительные изменения объекта, что затруднит поиск максимума корреляционной функции.

Работа выполнена при поддержке Госзадания «НАУКА» № 7.586.2011; РФФИ, грант № 12-02-31811.

1. Григорьянц А.Г., Казарян М.А., Лябин Н.А. Лазеры на парах меди: конструкция, характеристики и применение. М.: Физматлит, 2005. 312 с.
2. Лазеры на парах металлов с высокими частотами следования импульсов / Г.С. Евтушенко, Д.В. Шиянов, Ф.А. Губарев. Томск: Изд-во ТПУ, 2010. 276 с.
3. Солдатов А.Н., Соломонов В.И. Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. Новосибирск: Наука, 1985. 152 с.
4. Шиянов Д.В., Суханов В.Б., Евтушенко Г.С., Ткаченко Н.Ю. Лазер на парах диоксида меди с внутренним реактором // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 8. С. 721–726.
5. Губарев Ф.А., Шиянов Д.В., Суханов В.Б., Евтушенко Г.С. Исследование возможности масштабирования CuVg-лазеров с емкостной накачкой // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 11. С. 1003–1006.
6. Оптические системы с усилителями яркости // Труды ФИАН / Отв. ред. Г.Г. Петраш. М.: Наука, 1991. Т. 206. 152 с.
7. Тригуб М.В., Евтушенко Г.С., Губарев Ф.А., Торгаев С.Н. Лазерный монитор с возможностью покадровой регистрации изображений // Контроль. Диагностика. 2011. Вып. спец. С. 140–143.
8. Дашинимаева Е.З., Тригуб М.В., Евтушенко Г.С. Оптимизация режима работы лазерного монитора // Мат-лы Междунар. молодежной конф. «Лазерная физика, наноструктуры, квантовая микроскопия». Томск: Изд-во ТГУ, 2012. С. 32–37.
9. Лагутин П.С. Алгоритмы и программные средства анализа оптических изображений поверхности материалов для оценки их деформации: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск: ИФПМ СО РАН, 2009.
10. Lewis J.P. Fast Normalized Cross-Correlation [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.idiom.com/~zilla/Papers/nvisionInterface/nip.html>. Загл. с экрана.
11. ImageJ. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://rsbweb.nih.gov/ij/>. Загл. с экрана.

*M.V. Trigub, E.Z. Dashinimaeva, G.S. Evtushenko. Object displacement measurement by laser monitor image processing.*

This paper presents the algorithm for processing the images obtained by a laser monitor, which makes possible to get data on the observed object or its separate parts. The macros is designed in MATLAB environment implementing this algorithm, and its testing at different objects is carried out. It has been shown that for linear object displacement with the measurement pitch from 10 to 500 micron the error does not exceed 5 percent.