



УДК 629.7.015.3

О.В. Мелеева

*Институт тепло-и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,
220072, Минск, ул. П.Бровки 15, 14, E-mail: ollired@yandex.ru*

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ТЕЧЕНИЙ С СУБПИКСЕЛЬНОЙ ТОЧНОСТЬЮ

Описаны новые алгоритмы обработки спеклограмм, позволяющие проводить количественную диагностику микроструктуры ударно-волновых течений с субпиксельной точностью с использованием статистического анализа регистрируемых числовым образом спекл-полей, возмущённых рефракцией в исследуемых течениях. Разработанное программное обеспечение позволяет восстановить до 10 000 векторов пространственной деформации спекл-полей в двумерной области размером 20×30 мм при изображении спекл-поля с оптическим увеличением $M = 1$.

**СПЕКЛ-ФОТОГРАФИЯ, СУБПИКСЕЛЬНОЕ РАЗРЕШЕНИЕ, ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ,
УДАРНЫЕ ВОЛНЫ**

ВВЕДЕНИЕ

Пространственно-временной корреляционный анализ изображений, получаемых при визуализации течений, является простым и надежным методом статистической обработки изображений. Точность такой обработки значительно увеличивается при переходе к цифровым технологиям ввода изображений в ЭВМ [1]. Использование лазеров для зондирования исследуемых сред является удобным и необходимым во многих оптических конфигурациях, однако неизбежно приводит к появлению спеклов на изображениях, полученных в когерентном свете.

Первоначально к появлению таких спеклов (микропятен) на оптических изображениях относились как к нежелательному шуму. Многие исследователи старались подавить этот шум, однако в начале 70-х годов прошлого века, главным образом после публикации результатов экспериментов Бурча и Токарского [2], открылись новые потенциальные возможности практического использования спекл-распределений лазерной интенсивности в новых измерительных технологиях. Широкое распространение получили методы исследования нестационарных сред, основанные на анализе временных флуктуаций рассеянного излучения, часто называемые методами *оптического смещения, корреляционной или динамической спектроскопии*, а также близкий к отмеченным выше *лазер-доплеровский* метод, в котором анализируются флуктуации частоты рассеянного излучения. Методы *динамической спекл-интерферометрии* включают в себя анализ как временных, так и пространственных флуктуаций рассеянного излучения.

Особой привлекательностью обладают высокоточные цифровые технологии, основанные на компьютерном анализе результатов взаимодействия лазерного излучения малой мощности со средой в масштабе реального и квазиреального времени. Такие методы являются высокоинформативными, бесконтактными и безинерционными и позволяют напрямую

регистировать экспериментальную информацию непосредственно в памяти ПЭВМ с помощью высокоразрешающих ПЗС-матриц. В настоящей работе описаны математические приемы корреляционного анализа спекл-изображений, позволившие исследовать структуру течения при взаимодействии ударной волны с пограничным слоем с субпиксельной точностью.

Актуальность этих методов обуславливается также быстрым прогрессом в развитии вычислительной техники и ПЗС-структур, позволяющих проводить цифровые измерения и диагностику “*in-line*” в реальном масштабе времени, а также накапливать и обрабатывать экспериментальную информацию в ПЭВМ, включая непосредственную визуализацию результатов обработки на мониторе.

Ниже предлагается простой метод исследования структуры нестационарной среды, основанный на статистическом анализе только пространственных флуктуаций (спекл-полей) в рассеянном средой лазерном излучении. Применение этого подхода основано на цифровой технике регистрации излучения с высоким пространственным разрешением и прямой регистрации в памяти ПЭВМ спекл-полей, из статистического анализа которых и извлекается количественная информация о структуре исследуемой среды. Проведенные исследования показали, что предлагаемый метод, является надежным инструментом для мониторинга структуры нестационарной среды, возникающей при взаимодействии ударной волны и пограничного слоя.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СПЕКЛ-ИЗОБРАЖЕНИЙ

Существуют два основных приема, которые используются в спекл-технологиях: 1) когда время экспозиции спекл-фотографии является достаточно долгим по сравнению с исследуемым процессом, и два или несколько спекл-изображений записываются на один и тот же кадр, и 2) – когда экспозиция короче, чем исследуемый процесс, и два или более изображений записываются в отдельные кадры, в результате чего имеется последовательность кадров. В первом случае для статистического анализа спеклограмм используется автокорреляционная функция, в то время как второй случай предполагает использование кросскорреляций.

Общепринятый способ обработки записанных в память компьютера цифровых изображений предполагает разбиение всего спекл-поля на небольшие подобласти, в каждой из которых вычисляется кросскорреляционная функция в зависимости от координат этой подобласти (m, n).

В случае применения кросскорреляционной функции мы можем получить двумерное поле векторов смещений спеклов, которое отражает структурные изменения за время между двумя последовательными кадрами (рис. 1).

Присутствующий в реальной записи изображений шум существенно ухудшает качество изображений и надежность определения расположения пика кросскорреляционной функции. Этим обусловлен выбор статистического способа поиска наилучших локальных совпадений изображений I и I' .

При обработке спекл-изображений типичные размеры окна усреднения составляют от 8×8 до 64×64 пикселя, т.е. охватывают несколько тысяч пикселей, так что для формирования кросскорреляционной плоскости потребуются миллионы операций умножения и сложения. Для реализации описанных выше алгоритмов создан специальный пакет компьютерных программ. Он предусматривает процедуру записи и хранения спекл-изображений в цифровом виде, а также последующую обработку изображений с использованием методов статистического анализа. С помощью данных программ можно проводить анализ контрастов изображений с последующей фильтрацией, кросс- и автокорреляционный анализ, а также построение полей смещений изображений с помощью кросс-корреляционных функций и метода минимизации среднеквадратичной разности матриц интенсивности изображений (MQD).

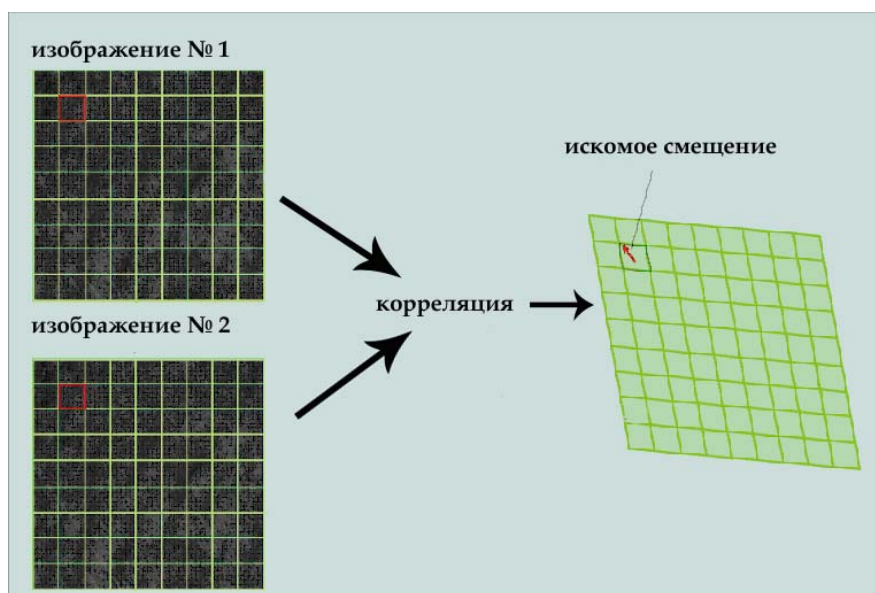


Рис. 1. Иллюстрация общей схемы кросскорреляционного анализа последовательных изображений

Запись изображения в память компьютера зависит во многом от типа камеры, которая используется в экспериментах. Большинство современных цифровых фотокамер записывают изображения в так называемом «сыром» формате (.raw), и эти форматы отличаются у разных производителей. В наших экспериментах для получения спекл-фотографии использовались камеры Fuji FinePixS2Pro, Nikon D70, несколько типов камер Canon и др. Например, для чтения изображений из камеры Nikon D70, которая имеет свой специфический формат исходных изображений .nef, можно пользоваться специальным программным пакетом NikonCapture 4.0, который позволяет считывать изображение из камеры и конвертировать в один из известных графических форматов .tiff или .bmp, из которых в дальнейшем можно получать изображение в виде цифрового поля значений интенсивностей в виде оттенков серого цвета. В настоящее время имеются также специальные плагины для известного графического пакета Adobe Photoshop, после подключения которых Adobe Photoshop также может распознавать исходные файлы фирмы Nikon.

Для предварительной обработки полученных изображений спекл-полей использовалась программа Nikon View 6.2, в которую встроены модули для обработки файлов, записанных в формате .raw. За счет большего числа бит в цифровом представлении сигнала raw-файл содержит гораздо больше полутонов, что позволяет оптимальнее корректировать изображения без появления дефектов.

Nikon D70S имеет 12-ти битный аналого-цифровой преобразователь и при съемке в формате .nef (Nikon Raw) имелась возможность назначать файлу большую часть съемочных параметров непосредственно с компьютера, а также более аккуратно «вытягивать» тени и света.

Применялся встроенный редактор «Raw» в программе Nikon View 6.2 (рис. 2).

Улучшить качество изображений для их последующей обработки позволяет также предварительная фильтрация изображений. Одним из способов фильтрации является предложенный в работе [4] анализ плотности вероятности распределения интенсивности в фильтруемом спекл-поле.

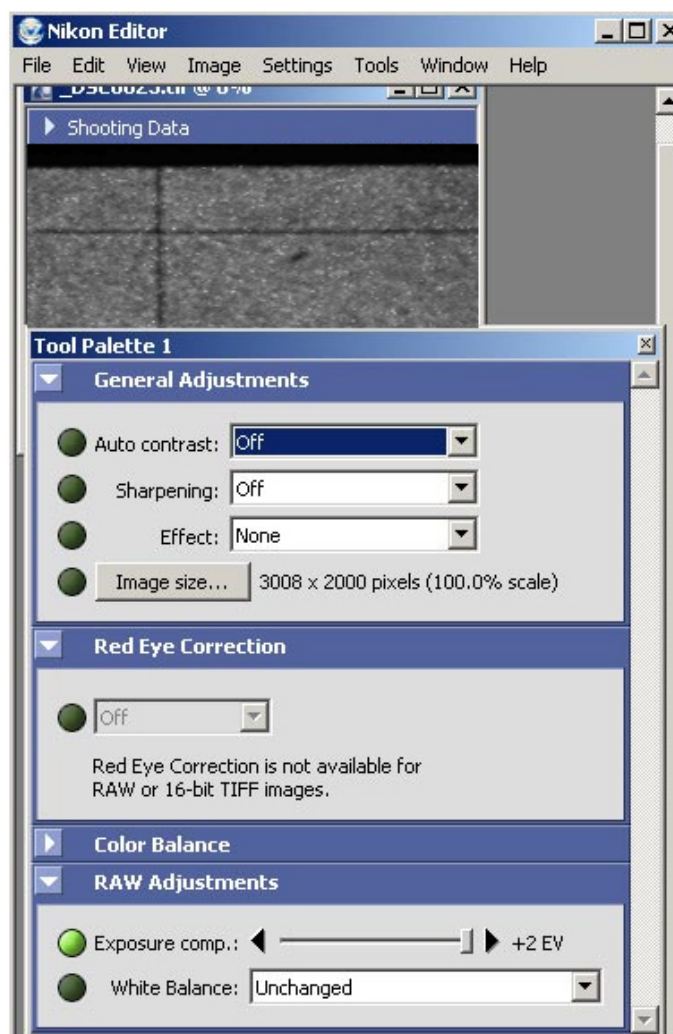


Рис. 2. Стандартный вид окна редактора RAW в программе Nikon View версии 6.2 при обработке спеклограммы течения в сверхзвуковой трубе при исследовании взаимодействия ударной волны с пограничным слоем [3]

Учитывая, что плотность вероятности в идеальном спекл-поле описывается отрицательной экспоненциальной зависимостью от величины интенсивности, при фильтрации спекл-поля вычитается его пьедестал с тем, чтобы выполнялось соотношение:

$$P(I) = \frac{1}{\langle I \rangle} \exp \left[-\frac{I}{\langle I \rangle} \right] \quad (1)$$

Такая фильтрация эффективна для широкого диапазона параметров оптической схемы, существенно увеличивает контраст поля, улучшает качество кросс-корреляционной функции и значительно уменьшает погрешности описанной выше обработки, см. рис. 3.

Для аппроксимации пика кросс-корреляционной функции с субпиксельной точностью могут использоваться различные известные функции. Некоторые способы такой аппроксимации подробно рассмотрены в книге Компенханса и др. при описании поиска среднего смещения частиц в исследованиях методом PIV [5]. Такие же аппроксимации справедливы и для кросс-корреляции спекл-изображений. Одна из них – функция центроида, которая определяется как отношение моментов первого и нулевого порядка. Такой метод работает хорошо, когда корреляционный пик широкий, т.е. многие значения корреляционной функции вносят вклад в расчет момента.

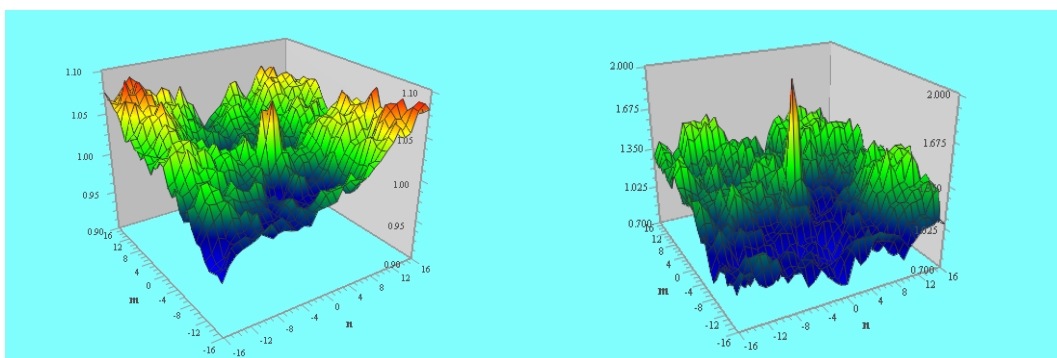


Рис. 3. Кросс-корреляционные плоскости в одной и той же подобласти изображения до (слева) и после фильтрации (справа)

Наиболее часто используется метод трехточечной оценки. При такой оценке подбирается подходящая функция, которая аппроксимирует кросс-корреляционный пик, используя известные значения в ближайших соседних точках в обоих направлениях, x и y . С этой целью наиболее часто используется гауссовская функция, т.к. световые пятна – спеклы – имеют примерно гауссовский профиль, а так как корреляция двух гауссовских функций также приводит к гауссовской функции, предполагается, что корреляционный пик тоже должен иметь гауссовскую форму.

Трехточечные оценки работают лучше в случаях узкого корреляционного пика, когда размеры спекла составляют порядка 1,5 – 3 пиксела. Тогда погрешность определения корреляционного пика лежит в пределах между ± 0.05 и ± 0.1 пиксела.

Ниже приведены наиболее часто используемые функции для трехточечной оценки.

1) Гауссовская аппроксимация

$$f(x) = C \exp\left[\frac{-(x_0 - x)^2}{k}\right]$$

$$x_0 = i + \frac{\ln R_{(i-1,j)} - \ln R_{(i+1,j)}}{2 \ln R_{(i-1,j)} - 4 \ln R_{(i,j)} + 2 \ln R_{(i+1,j)}} \quad (2)$$

$$y_0 = j + \frac{\ln R_{(i,j-1)} - \ln R_{(i,j+1)}}{2 \ln R_{(i,j-1)} - 4 \ln R_{(i,j)} + 2 \ln R_{(i,j+1)}}$$

2) аппроксимация центроидом

$$f(x) = \frac{\text{момент первого порядка}}{\text{момент нулевого порядка}}$$

$$x_0 = \frac{(i-1)R_{(i-1,j)} + R_{(i,j)} + (i+1)R_{(i+1,j)}}{R_{(i-1,j)} + R_{(i,j)} + R_{(i+1,j)}} \quad (3)$$

$$y_0 = \frac{(j-1)R_{(i,j-1)} + iR_{(i,j)} + (i+1)R_{(i,j+1)}}{R_{(i,j-1)} + R_{(i,j)} + R_{(i,j+1)}}$$

3) параболическая аппроксимация

$$f(x) = Ax^2 + Bx + C$$

$$x_0 = i + \frac{R_{(i-1,j)} - R_{(i+1,j)}}{2R_{(i-1,j)} - 4R_{(i,j)} + 2R_{(i+1,j)}} \quad (4)$$

$$y_0 = i + \frac{R_{(i,j-1)} - R_{(i,j+1)}}{2R_{(i,j-1)} - 4R_{(i,j)} + 2R_{(i,j+1)}}$$

Координаты (x_0, y_0) описывают среднее по подобласти смещение спеклов с высокой точностью одновременно на большом количестве точек даже для сильно зашумленных течений, что позволяет количественно определить двумерное поле скоростей течения с субпиксельным разрешением.

Известна и хорошо зарекомендовала себя еще одна альтернативная поиску максимума кросс-корреляционной функции $R_{II'}(x, y)$ техника, предложенная Гуи и Мерзкиршем [6], которую они назвали методом минимизации среднеквадратичной разности матриц интенсивности изображений. Эта техника основана на поиске минимума квадратных разностей между элементами векторов или матриц с целью исследовать существующую степень подобия между ними. Такой принцип является по сути алгоритмом слежения и подобен так называемому принципу наименьших квадратов, который часто используется при анализе погрешностей численных аппроксимаций или в математической статистике.

Полученные цифровые поля спекл-изображений представляются в виде матриц

$$I(i, j) = \begin{Bmatrix} I_{11} & I_{21} & \cdots & I_{M1} \\ I_{12} & I_{22} & & I_{M2} \\ \vdots & & & \vdots \\ I_{1N} & I_{2N} & \cdots & I_{MN} \end{Bmatrix}$$

и

$$I'(i, j) = \begin{Bmatrix} I'_{11} & I'_{21} & \cdots & I'_{M1} \\ I'_{12} & I'_{22} & & I'_{M2} \\ \vdots & & & \vdots \\ I'_{1N} & I'_{2N} & \cdots & I'_{MN} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

каждая размерностью $(M \times N)$, а I_{ij}, I'_{ij} – соответственно интенсивности изображений на выбранном участке, которые представляют собой оттенки серого цвета. Тогда разность между двумя матрицами можно представить в виде:

$$|I - I'| = \left[(I_{11} - I'_{11})^2 + (I_{21} - I'_{21})^2 + \dots + (I_{M1} - I'_{M1})^2 + (I_{12} - I'_{12})^2 + \dots + (I_{MN} - I'_{MN})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

или

$$|I - I'| = \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I_{ij} - I'_{ij})^2} \quad (7)$$

Как и в кросс-корреляционном методе, изображение разбивается на небольшие участки - образцы, или окна усреднения, и целью является отследить образец, смещенный на средний вектор (m^*, n^*) за интервал времени Δt . Это смещение (m^*, n^*) можно найти, определив минимум структурной функции:

$$D_{1,2}(m, n) = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I_1(i, j) - I_2(i + m, j + n)]^2 \quad (8)$$

при различных значениях m и n . Индексы i, j в уравнении (8) относятся к одной и той же системе координат в плоскости, где расположены оба образца I и I' , в отличие от уравнения (7), где координаты i, j в каждой из матриц независимы. Максимальная степень подобия между матрицами I и I' , будет наблюдаться при минимуме функции $D(m, n)$. Равенство $I(i, j) = I'(i - m^*, j - n^*)$ может наблюдаться лишь при одинаковом целом смещении (m^*, n^*) всех точек и идентичных условиях освещения и записи двух последовательных изображений I и I' .

На рис. 4 показан вид структурных функций для двух последовательных одноэкспозиционных спеклограмм для I и I' . Как можно видеть, $D(m, n)$ обратно пропорциональна кросс-корреляционной функции и имеет один минимум при тех же координатах (m^*, n^*) , что и максимум кросс-корреляционной функции. Авторы [6] назвали этот метод поиска максимума кросс-корреляционной функции методом минимизации среднеквадратичной разности матриц интенсивности изображений. Такая минимизация хорошо выполняется методом градиентного спуска, широко применяемым при спектральных измерениях и поиске расчетных спектров, наиболее близко соответствующих экспериментальным [1].

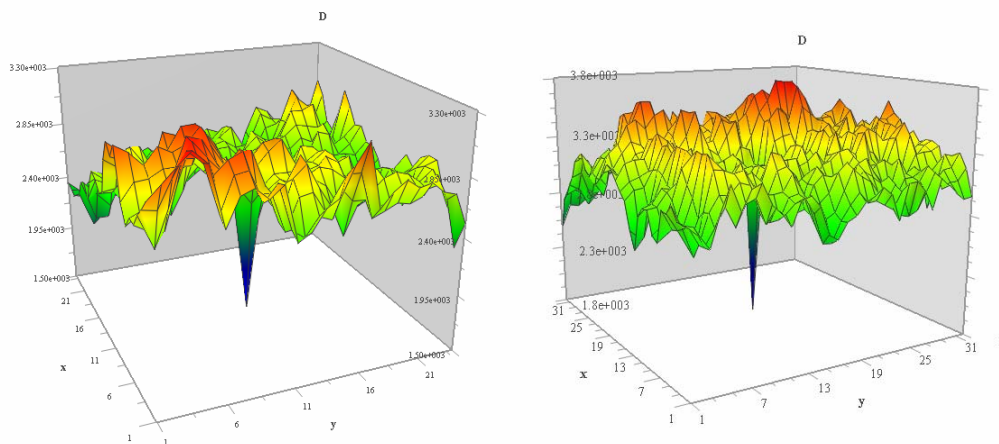


Рис. 4. Примеры полей структурной функции $D(m, n)$ с ярко выраженной точкой минимума, соответствующей среднему смещению спекл-поля в заданных областях

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования сверхзвуковых течений при взаимодействии ударной волны с пограничным слоем проводились в Институте проточных машин Польской академии наук, при исследовании на трансзвуковой установке [3]. Спеклограммы были записаны с помощью цифровой ПЗС - камеры Canon с высоким разрешением. Запись делалась дважды – первый снимок делался без потока, а второй снимок делался во время прохождения потока по трубе, через некоторый промежуток времени Δt . Таким образом, второе спекл-поле получается смещенным относительно первого из-за рефракции лазерного луча на градиентах плотности потока.

На рис. 8 приведены результаты одного из таких экспериментов. Вверху – две последовательные спеклограммы потока, внизу – результат обработки данных спеклограмм двумя различными способами – с помощью анализа кросс-корреляционных плоскостей (слева) и метода минимизации структурной функции MQD. На рис. 6 приведено поле смещений спеклов в виде изолиний.

Т.к. наибольший интерес для исследования представляет собой область вблизи стенки канала, были проведены более детальные расчеты течения в приграничной области с субпиксельной точностью, используя гауссовскую аппроксимацию. На рис. 7 изображены результаты расчета в области, выделенной красным прямоугольником на рис. 6.

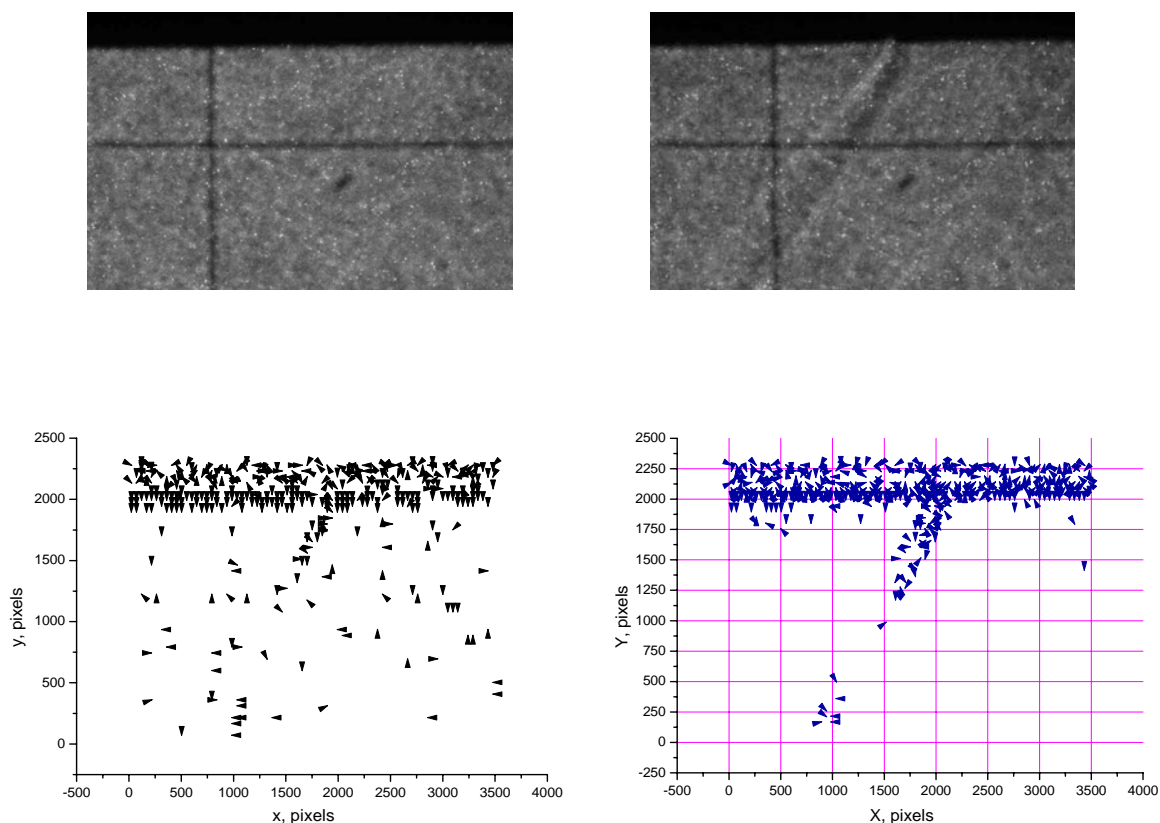


Рис. 5. Два последовательных спекл-изображения потока воздуха размерностью 3504×2336 пикселей (вверху). Результаты обработки данных изображений методом кросс-корреляций (внизу, слева) и MQD (справа). Размер окна усреднения 48×48 пикселей

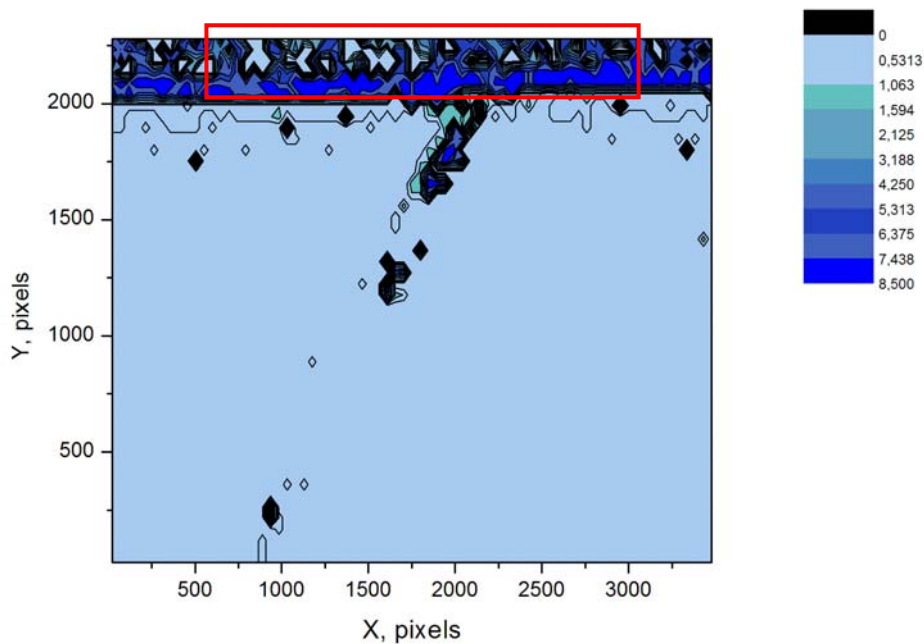


Рис. 6. Поле смещений спеклов в виде изолиний

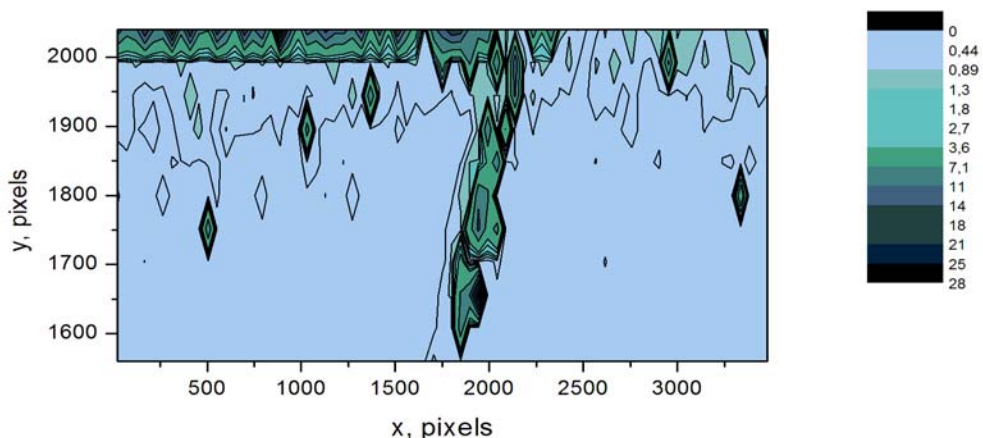


Рис. 7. Детализированный расчет поля смещений спеклов в пограничном слое

Рис. 5 – 7 содержат пример обработки полученных спеклограмм в течении. При использованном оптическом увеличении $M = 1$, размеры восстанавливаемого течения составляли $20 \times 30 \text{ мм}^2$. С заданным размером окна усреднения 32×32 пикселя, мы можем получить мгновенное поле течения, содержащее до 10 000 векторов смещения. Это позволяет отслеживать пограничный слой течения с точностью до 30 мкм. Надо подчеркнуть, что результаты анализа изображений дают не только качественные, но и количественные картины поля течения в канале, причем с достаточной точностью, т.к. с помощью известных соотношений позволяют восстановить поле градиентов плотности в течении [3].

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает признательность профессорам Никите Александровичу Фомину и Петру Дёрферу, а также кандидатам наук Николаю Базылеву и Ричарду Шваба и младшим научным сотрудникам Яну-Артуру Шумскому и Яну Телега за полезные обсуждения, рекомендации и помощь при проведении экспериментов и разработке программ математической обработки изображений, а также БРФФИ за частичную финансовую поддержку работы по гранту Т09МС-032.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$d(m, n)$	искомый сдвиг изображений
$D(m, n)$	структурная функция
(i, j)	velocity components
I	исходное изображение
I'	конечное изображение
$\langle I \rangle$	средняя интенсивность лазерного излучения, Вт/см ²
$I(m, n)$	распределение интенсивности лазерного излучения в спекл-поле
(m, n)	текущие координаты в исходном изображении
(m^*, n^*)	координаты максимума функции $R_{II'}$
$P(I)$	плотность распределения вероятности для интенсивности спекл-поля I
M	коэффициент оптического увеличения
$R_{II'}$	кросскорреляционная функция двух изображений
Δt	интервал времени, с
(x_0, y_0)	координаты среднего по подобласти смещения спеклов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Fomin N. A.** Speckle Photography in Fluid Mechanical Measurements // Springer. Berlin. 1998.
2. **Burch J. M. and Tokarski J. M. J.** Production multiple beam fringes from photographic scatterers // Optica Acta. 1968. Vol. 15, № 2. P. 101-111.
3. **Quantitative** diagnostics of shock wave-boundary layer interaction by digital speckle photography / Fomin N., Meleeva O., Doerffer P. et al. // IFZh. 2011. Vol. 84, №. 5. в печати.
4. **Briers J. D. and Webster S.** Laser speckle contrast analysis (LASCA): a non-scanning, full-field technique for monitoring capillary blood flow // J. Mod. Opt. 1996. Vol. 1. P. 174-179.
5. **Raffel M., Willert C. E. and Kompenhans J.** Particle Image Velocimetry. A Practical Guide. Berlin: 1998. 253 p.
6. **Gui LC, Merzkirch W.** A method of tracking ensembles of particle images. Experiments in Fluids 1996; 22:465-468.

O.V. Meleeva

*A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute NASB,
220072, Minsk, P.Brovka str., 15, E-mail: ollired@yandex.ru*

CORRELATION ANALYSIS OF THE DIGITAL FLOW IMAGES WITH SUPER-RESOLUTION

Original specklegram processing algorithms based on statistical analysis of digitally recorded speckle fields have been represented for quantitative diagnostics of the shock wave flow microstructure with the sub-pixel accuracy. Software developed allows to reconstruct about 10 000 vectors of the volume deformation of the speckle fields for area of 20×30 mm with magnification $M = 1$.

SPECKLE PHOTOGRAPHY, SUPER-RESOLUTION, BOUNDARY LAYER, SHOCK WAVES