

Кросс-корреляционные методы анализа изображений в экспериментальной визуализации потоков

И.А. Знаменская, Е.Ю. Коротева, Ф.Н. Глазырин
 znamen@phys.msu.ru|koroteeva@physics.msu.ru|glazyrin@physics.msu.ru
 МГУ им. Ломоносова, Москва, Россия

Обсуждается применение кросс-корреляционных алгоритмов для анализа высокоскоростных газоплазменных и жидких потоков. В приведенных экспериментах исследовались поля плотности прозрачных сред и векторные поля скорости, полученные с использованием как засевого, так и беззасевого трассирования. Для цифровой обработки полученных экспериментальных изображений потоков использовался кросс-корреляционный алгоритм, реализованный в программе Davis фирмы LaVision. При схожем алгоритме обработки и анализа физические принципы регистрации физических полей различны.

Ключевые слова: кросс-корреляционный анализ, цифровая регистрация, рефракция, трассирование, разрывы.

1. Введение

Методы визуализации течений газа, жидкости, плазмы, а также многофазных сред описывались в 20 веке в большом количестве монографий, обзоров и статей. Физические основы методов мало меняются; в них используются преимущественно свойства света - рефракция, рассеяние, поглощение - и такие явления, как интерференция, дифракция, флюоресценция. Однако методы визуализации сегодня получили мощнейший толчок в связи с цифровой (компьютерной) революцией, которая привела к многократному увеличению количества исследований в области динамики течений и объема собранных данных.

Одно из основных преимуществ цифровых технологий – возможность компьютерной обработки цифровых изображений с целью получения количественной информации о параметрах потока.

2. Области применения кросс-корреляционной обработки в эксперименте

Кросс-корреляционный алгоритм сегодня – один из главных инструментов цифровой обработки изображений. На начальном этапе развития этих инструментов он использовался преимущественно для анализа полей скоростей в методе трассирования с засевом частиц (слежение за частицами в потоке, particle image velocimetry или просто PIV). Сегодня можно назвать ряд методов визуализации потоков, где кросс-корреляционный алгоритм является основным: теневой фоновый метод (ТФМ), беззасевные теневые методы [9], термографическое PIV [4], измерение приповерхностного поля скорости в вязких покрытиях, микро, стерео, томографические модификации PIV [3] и др.

Первоначально для определения смещений частиц в засеянном потоке жидкости или газа широко использовался базовый кросс-корреляционный алгоритм, который в дальнейшем был назван стандартным. Стандартный алгоритм состоит из следующих основных операций:

- разбиение пары изображений на элементарные расчетные области равного размера;
- расчет кросс-корреляционной функции;
- нахождение максимума на корреляционной функции;
- подпиксельная интерполяция максимума корреляционной функции; используется преимущественно при исследованиях несжимаемой жидкости.

Сегодня разработано множество коммерческих и специальных алгоритмов, адаптированных к конкретным течениям. В настоящей работе обсуждается применение кросс-корреляционных алгоритмов для анализа высокоскоростных газоплазменных и жидких потоков. Исследовались

- поля плотности (теневой фоновый метод, ТФМ)
- векторные поля скорости (цифровое трассирование, PIV).

Кроме того, рассматривается опыт применения кросс-корреляционной обработки в высокоскоростной беззасеивной термографии пограничного слоя жидкости.

Во всех случаях использован метод кросс-корреляции, реализованный в программном обеспечении Davis фирмы LaVision. При схожем алгоритме обработки - определение смещения характерных элементов на изображении - физические принципы регистрации физических полей различны.

В первом случае - при визуализации полей показателя преломления прозрачной неоднородной среды - определяются смещения разделенных в пространстве изображений точек фона, помещенного за исследуемым объектом. Смещение точек на изображении фона происходит за счет отклонения света в неоднородности плотности среды, через которую происходит регистрация фона. Визуализация оптической неоднородности происходит за счет физического явления *рефракции* света.

Во втором случае – при регистрации мгновенных полей скорости среды в сечении потока (например, лазерным листом) - регистрируются разделенные во времени изображения трассеров, зафиксированные с малой экспозицией (равной, как правило, времени подсветки лазерным листом). Регистрируя с интервалом δt движение трассирующих частиц в потоке, можно получить изображения отрезков пути δs , пройденные частицами за δt . Величина $v = \delta s / \delta t$ представляет собой среднюю скорость частицы на этом отрезке. Визуализация трассеров в классическом методе PIV происходит за счет *рассеяния* лазерного излучения на трассере.

При интегральной регистрации следа частицы в газе программа обработки данных метода цифрового трассирования позволяет визуализировать и наблюдать траектории частиц, поля завихренности, поля скоростей в векторном и скалярном представлении. На рис. 1 представлено изображение линий тока частиц, совмещенное с полем мгновенных скоростей, обозначенных цветом; приведена соответствующая шкала. Визуализирована область нестационарного течения на выходе из прямоугольного канала ударной трубы.

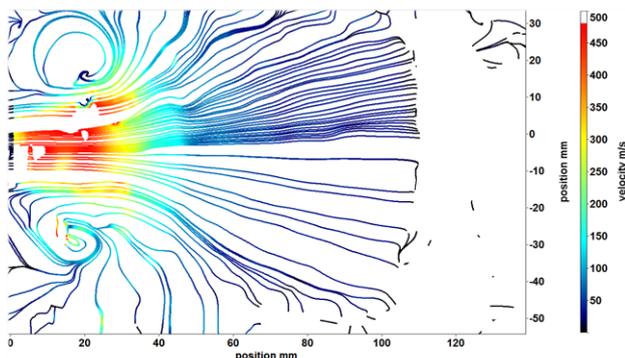


Рис. 1. Скалярное представление результатов цифрового трассирования.

Правая граница линий траекторий частиц соответствует положения фронта ударной волны, скорость потока за ним около 50 м/с. На сверхзвуковом участке струи скорость газа достигает 400-450 м/с.

3. Коррекция результатов

Особую сложность представляет использование кросс-корреляционного алгоритма анализа данных в высокоскоростных газоплазменных течениях с ударными волнами - вследствие скачкообразного изменения параметров (плотности и скорости) на фронте разрыва. Так, обнаружены значительные погрешности при использовании классической схемы ТФМ для количественного определения скачка плотности на фронте ударной волны [6]. Это обусловлено выходом детектируемой величины рефракции за рамки чувствительности метода — из-за сильного преломления света на фронте ударной волны отклоненный луч может выйти за пределы оптической схемы и не быть зарегистрированным [2].

Несмотря на то, что в последние годы метод PIV все более активно применяется для визуализации транс- и даже сверхзвуковых течений, наблюдение нестационарных потоков с сильными разрывами этим методом по-прежнему затруднено. Необходимо, чтобы трассирующие частицы следовали движению частиц газа, являясь элементом сплошной среды. Из-за запаздывания частиц, немгновенного характера измерений в методе PIV, влияния алгоритмов цифровой обработки и т.д, данные PIV в таких течениях могут существенно отличаться от истинных. Основной причиной расхождения результатов PIV и реальной скорости потоков является инерционное запаздывание трассирующих частиц. Трассирующие частицы, жидкие или твердые, никогда не следуют потоку абсолютно точно. Сила вязкого трения, действующая на частицы со стороны газа, стремится уравнять их скорость со скоростью потока, ускоряя или замедляя их в зависимости от их относительной скорости. В результате количественное значение скачка скорости оказывается заниженным, а сам фронт существенно «размывается» [5].

В то же время возможно восстановить исходное течение с помощью численного моделирования на основе уравнений газодинамики. В этом случае моделируется динамика трассирующих частиц в рассчитанном поле течения [7]. Если предположить, что численное моделирование на основе уравнений газодинамики (CFD) точно предсказывает фактическую скорость потока, мы можем количественно оценить ошибку данных PIV. На рис. 2 приведено сравнение экспериментального профиля скорости на фронте взрывной волны от импульсного цилиндрического разряда с расчетом на основе численного моделирования.

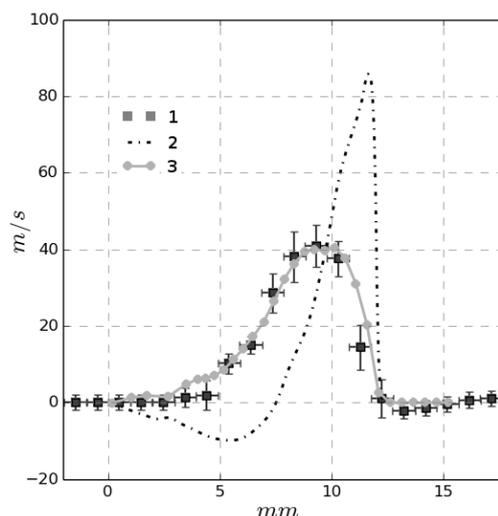


Рис. 2. Учет погрешности экспериментальных данных на основе численного моделирования: 1 – экспериментальный профиль (PIV); 2 – результат CFD моделирования; 3 – профиль «виртуальных» трассирующих частиц в рассчитанном поле течения.

4. Кросс-корреляционный анализ газоплазменного течения с разрывами.

На рис. 3 и 4 приведены результаты экспериментов по исследованиям полей плотности и скорости в нестационарном разрывном газоплазменном течении, возникающем при инициировании наносекундного поверхностного скользящего разряда (плазменного листа) в канале ударной трубы. Разряды площадью 100x30 мм² поджигались одновременно на верхней и нижней стенках канала.

На рис. 3 представлены результаты, полученные на основе теневого фонового метода. На рис. 3(а) – исходный снимок разрядной области с фоном, репером и свечением яркого канала разряда. На рис. 3(б) – результат кросс-корреляционной обработки – поле плотности. Наличие разрывов приводит к большой погрешности измерений [1]. Структура течения отражена достаточно правильно.

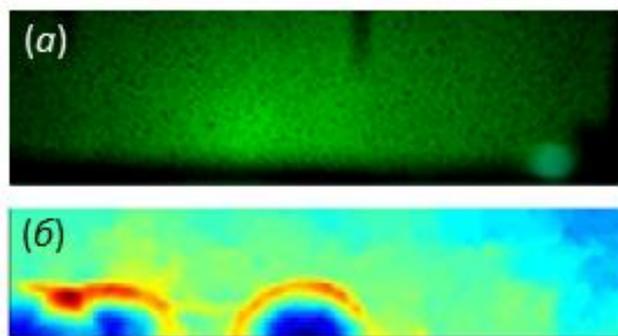


Рис. 3. Теневого фонового метод. Исходный снимок (а) и результат обработки (б) поля течения, индуцированного импульсными поверхностными разрядами.

На рис. 4 приведено поле того же течения, но полученное на основе метода цифрового трассирования (PIV). На рис. 4(а) – исходное изображение без засева, демонстрирующее область пересечения области поверхностного разряда с лазерным листом. На рис. 4(б) – мгновенное изображение поля течения после разряда с засевом. Видно сгущение трассеров за фронтом взрывной волны и их практическое отсутствие в области разрежения.

На рис. 4(в) – результат кросс-корреляционной обработки пары изображений потока - поле скоростей; время после разряда - 21 мкс.

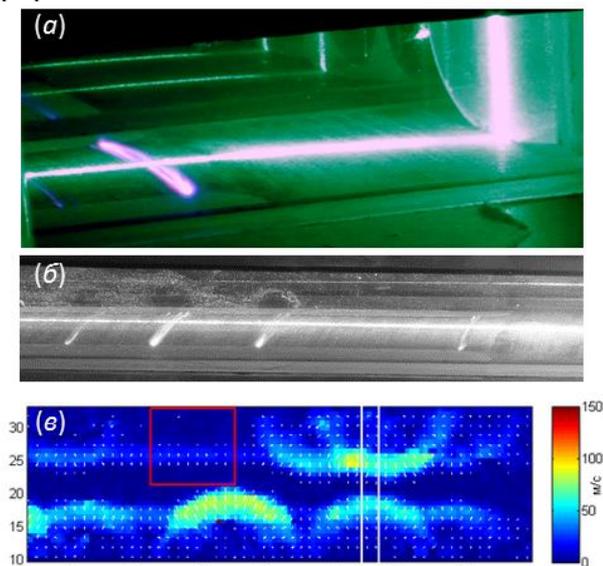


Рис. 4. Метод цифрового трассирования. Вид области регистрации (а-б) и результат обработки (в) поля течения через 21 мкс после инициирования импульсных поверхностных разрядов.

5. Беззасевные методы трассирования

В последние годы благодаря распространению кросс-корреляционных алгоритмов обработки изображений появилось значительное количество работ по использованию беззасевого трассирования – слежение за неоднородностями, структурными элементами, маркерами, присутствующими в самом потоке.

Одним из таких методов является предложенный авторами метод трассирования тепловыми точками (ТТТ), основанный на термографической визуализации пограничного слоя жидкости. Программой кросс-корреляции измеряется смещение точек равной температуры (градации серого) на двух соседних термограммах. На рис. 5 приведено усредненное по 100 кадрам поле скоростей потока в пограничном слое воды на основе нового метода ТТТ [8]. Использовалась высокоскоростная съемка тепловизором импактной затопленной неизотермической струи через окно, прозрачное для инфракрасного излучения.

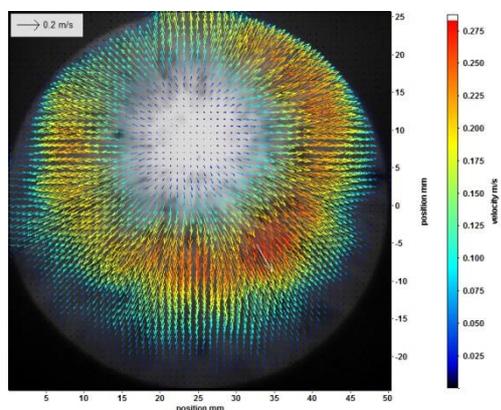


Рис. 5. Метод беззасевого трассирования тепловыми точками. Поле скоростей в погранслое импактной затопленной струи.

6. Заключение

Рассмотрены примеры применения кросс-корреляционных алгоритмов для анализа высокоскоростных потоков. Исследовались поля плотности прозрачных сред и поля параметров газоплазменных и жидких потоков, полученные с использованием как засевого, так и беззасевого трассирования. Показано, что для различных физических принципов регистрации могут быть использованы аналогичные методы обработки. Рассмотрены проблемы, связанные регистрацией параметров в области ударных и взрывных волн.

7. Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 18-19-00672.

8. Литература

- [1] Ф. Глазырин, И. Знаменская, Е. Коротева, И. Мурсенкова, Н. Сыроев. Использование теневого фонового метода для исследования нестационарного потока с ударной волной. Научная визуализация. 2013. Т. 5(3). С. 65–74.
- [2] Ф.Н. Глазырин и др. Исследования ударно-волнового течения в канале теньвым и теньвым фоновым методами. Автометрия. 2012. Т. 48 (3). С. 101–110.
- [3] R.J. Adrian. Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics. Annu. Rev. Fluid Mech. 1991. Vol. 23 (1). pp. 261–304.
- [4] Charogiannis, I. Zadrazil, and C. N. Markides, Thermographic particle velocimetry (TPV) for simultaneous interfacial temperature and velocity measurements. Int. J. Heat Mass Transfer. 2016. Vol. 97. pp. 589–595.
- [5] F. N. Glazyrin, I. V. Mursenkova, I. A. Znamenskaya. PIV tracer behavior on propagating shock fronts. Meas. Sci. Technol. 2016. V. 27(1). 015302.
- [6] Goldhahn E. Quantitative Measurements of Three-Dimensional Density Fields Using the Background Oriented Schlieren Technique. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [7] Koroteeva E., Mursenkova I., Liao Y., and Znamenskaya I. Simulating particle inertia for velocimetry measurements of a flow behind an expanding shock wave. Physics of Fluids. 2018. V. 30. 11702.
- [8] E. Koroteeva, I. Znamenskaya, P. Ryazanov, and A. Novinskaya. Velocimetry of water boundary layer flows by thermal imaging. In Proceedings of 11 Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (PSFVIP-11). 2017. ID 087.
- [9] G. S. Settles, Schlieren and Shadowgraph Techniques. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001.

9. Об авторах

Знаменская Ирина Александровна, д.ф.-м.н., профессор кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества Московского государственного университета. Ее e-mail znamen@phys.msu.ru.

Коротева Екатерина Юрьевна, к.ф.-м.н., с.н.с. кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества Московского государственного университета. Ее e-mail koroteeva@physics.msu.ru

Глазырин Федор Николаевич, аспирант кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества Московского государственного университета.