



УДК 532.57

А.А. Савин

Московский энергетический институт (технический университет), Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: alekseisavin@yandex.ru

ЦВЕТОВОЕ КОДИРОВАНИЕ КАРТИН АНЕМОМЕТРИИ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ЧАСТИЦ В МУЛЬТИ-ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ

Исследована возможность применения цветового кодирования при анализе потоков жидкости и газов методом анемометрии по изображениям частиц. Показано, что данный метод при малых отношениях сигнал/шум дает более высокую точность по сравнению с классическим анализом.

АНЕМОМЕТРИЯ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ЧАСТИЦ, ЦВЕТОВОЕ КОДИРОВАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Одним из распространенных методов измерения полей скоростей потоков жидкости и газа в настоящее время является лазерный метод, основанный на цифровом фотографировании траекторий частиц, визуализирующих поле скорости, с последующим компьютерным анализом их изображений (метод Particle Image Velocimetry - PIV) [1]. Существует два варианта данного метода [2]. В первом используется двух-импульсное лазерное освещение потока, изображения частиц накапливаются на одном кадре. В этом случае полученное изображение состоит из множества пар частиц и с помощью вычисления автокорреляционной функции (АКФ) определяется их смещение за время между двумя импульсами освещения. Второй вариант состоит в записи отдельно двух последовательных разделенных изображений потока и далее вычисляется кросскорреляционная функция (взаимная корреляционная функция, ВКФ).

Помимо классического двухкадрового (двух-импульсного) режима, рассмотренного выше, существует и многокадровый (мульти-импульсный) режим, в котором вместо двух используется несколько кадров или импульсов лазера для мультиплексного режима. Это также дает свои преимущества, как, к примеру, возможность визуального наблюдения траекторий и расширение диапазона измеряемых скоростей.

Впервые предложил использовать разные цвета в PIV-методе для определения направления движения потока Ronald J. Adrian [3]. В дальнейшем цветовое кодирование было использовано для получения третьей компоненты вектора скорости [4]. В данной работе продемонстрирована еще одна возможность применения цвета в PIV-методе.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Модель PIV-изображения

Для сравнения точностных характеристик классического двух-кадрового PIV-метода и цветного четырех-импульсного PIV-метода использовалась следующая модель PIV-изображения:

- формат кадра N_x на N_y пикселей;

- каждая частица представляет собой двухмерную гауссову кривую [5]; размер частицы в среднем равен пяти пикселям плюс случайное отклонение, выбранное по нормальному закону с нулевым средним и единичной дисперсией; яркость каждой частицы выбиралась по равномерному закону от 125 до 255; число частиц N_p ; координаты частиц на первом кадре выбирались также по равномерному закону от 1 до N_x по горизонтальной координате, и от 1 до N_y по вертикальной координате; на последующих кадрах координаты частиц получались путем сдвига на одну и ту же величину;

- к изображению добавлялся аддитивный нормальный шум с нулевым средним и различной дисперсией (σ^2).

Теория метода цветового кодирования

Для реализации предлагаемого метода требуется два лазера, красный и зеленый, цветная видеокамера с аналого-цифровым преобразователем, устройство управления лазерами и ПК. После преобразования изображений в цифровую форму получившийся массив можно, при определенных условиях, разделить на две составляющие, красную и зеленую.

При использовании мульти-импульсного режима появляется возможность добиваться более оптимальной, с точки зрения выделения пиков, формы автокорреляционной функции. Для задачи автокорреляционного анализа картин визуализации потоков необходимо, чтобы основные пики АКФ были как можно более ярко выражены по сравнению с боковыми пиками. Если сделать инверсию по знаку, например, зеленой составляющей изображения и затем совместить два массива в один, то траектория движения каждой частицы будет представлять собой последовательность различных по знаку импульсов, то есть код. Подбором последовательности импульсов подсветки можно получать разные коды, более удобные для расчета поля скоростей потока.

В случае одномерных функций формула для АКФ выглядит следующим образом:

$$B(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(x)S(x-\tau) dx, \quad (1)$$

где $S(x)$ – некоторый сигнал, зависящий, как правило, от времени. Рассмотрим случай, когда $S(x)$ – последовательность импульсов гауссовой формы, единичной амплитуды и длительности. Для четырех-импульсного режима это последовательность из четырех гауссоид с чередующейся амплитудой по коду $\{1, -1, 1, -1\}$, а для двух-импульсного режима – по коду $\{1, 1\}$.

На рис. 1 показаны АКФ данных последовательностей.

Из рисунка хорошо видно, что основной максимум для четырех-импульсного режима в два раза выше, чем для двух-импульсного, к тому же, боковые максимумы расположены в области отрицательных значений, что облегчает задачу их выделения.

Такой подход из временной области легко перенести в пространственную. Будут двумерные импульсы с чередующейся амплитудой. В качестве иллюстрации такого подхода на рис. 2 показан фрагмент PIV-изображения, в котором используется цветовой код {красный, зеленый, красный, зеленый}.

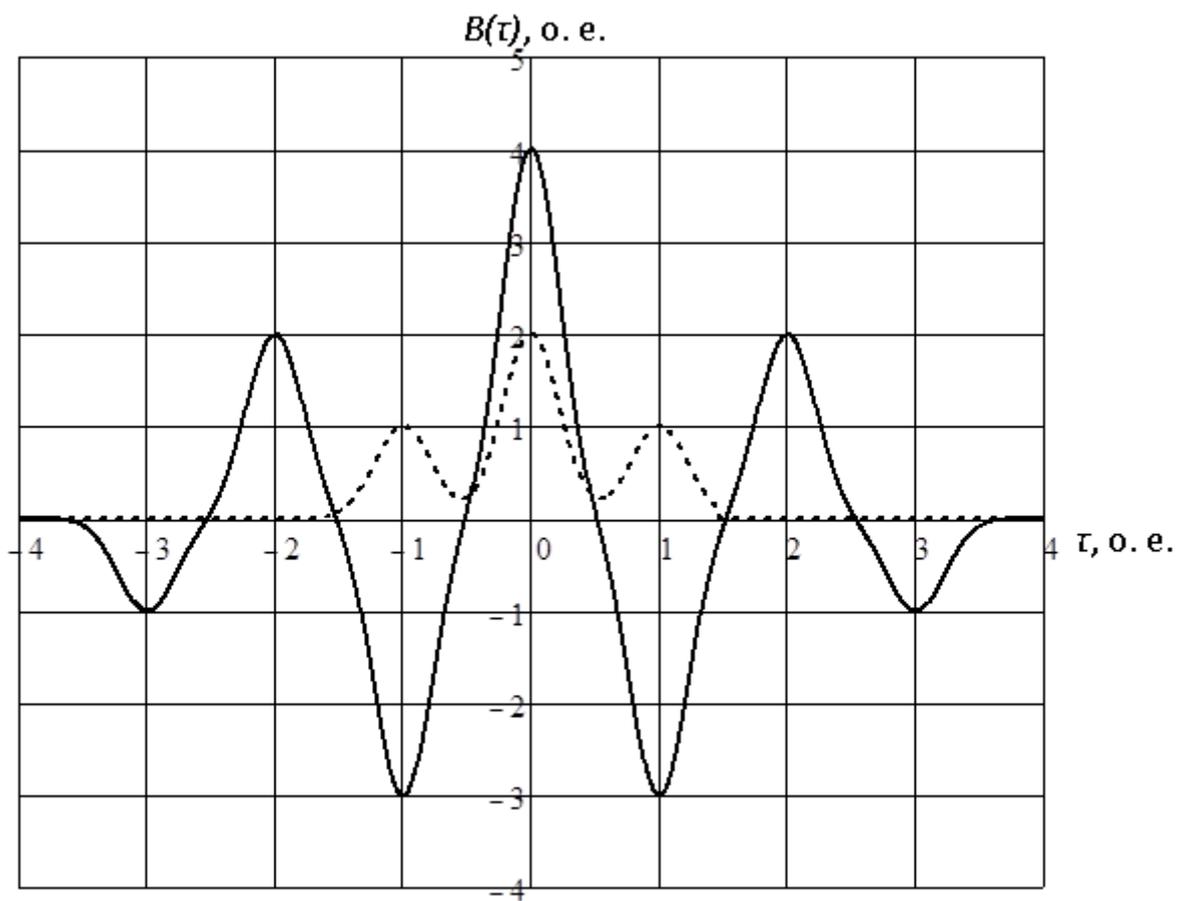


Рис. 1. Автокорреляционная функция для кода $\{1, -1, 1, -1\}$ – сплошная линия, для кода $\{1, 1\}$ – пунктирная линия

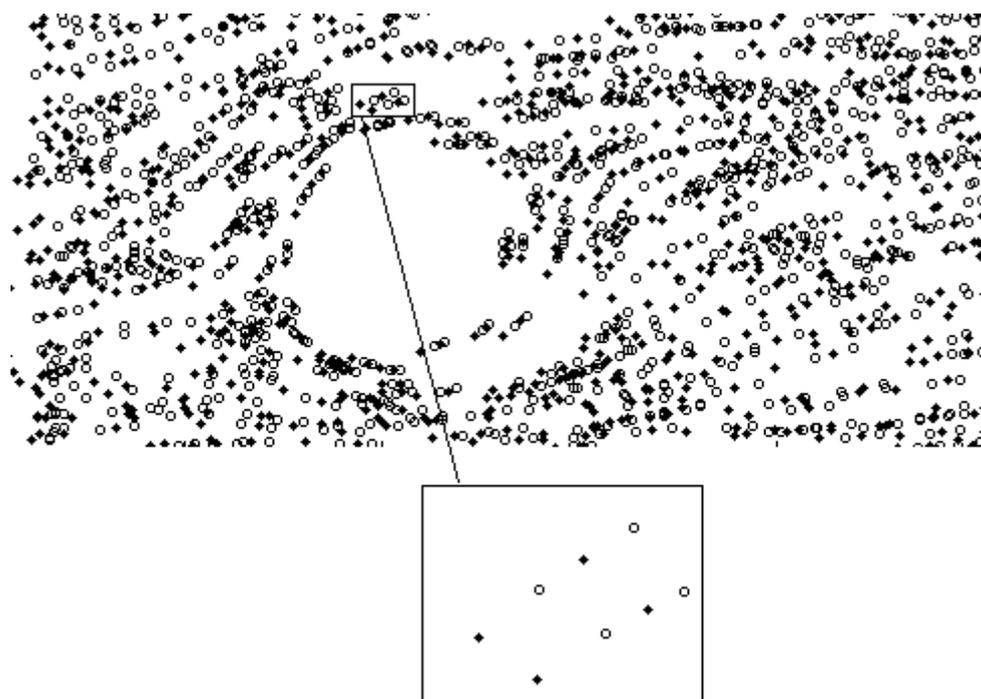


Рис. 2. Фрагмент цветного PIV-изображения, ◆ - красный, ○ – зеленый

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование цветового кодирования в PIV-методе позволяет, во-первых, легко определить направление движения частиц, а во вторых – добиться более оптимальной с точки зрения выделения пиков формы автокорреляционной функции. При этом результаты обработки показали, что при малых отношениях сигнал/шум мульти-импульсный PIV-метод с цветовым кодированием дает более высокую точность, чем обычный двух-кадровый PIV-метод.

Данный метод можно применять для усовершенствования уже существующих цветных PIV-систем в различных задачах по исследованию движения потоков. Выбор оптимального цветового кода для таких систем является предметом дальнейшего исследования.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

N_x – число пикселей изображения по горизонтали;
 N_y – число пикселей изображения по вертикали;
 N_p – число точек на изображении;
 σ – среднеквадратическое отклонение нормального шума;
 S – условный одномерный сигнал;
 x – аргумент сигнала S ;
 B – автокорреляционная функция одномерного сигнала;
 τ – аргумент автокорреляционной функции B .
Аббревиатуры:
PIV – Particle Image Velocimetry;
АКФ – автокорреляционная функция;
ВКФ – взаимная корреляционная функция;
ПК – персональный компьютер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ринкевичюс Б. С.** Лазерная диагностика потоков / Под ред. В. А. Фабриканта. М.: Изд-во МЭИ, 1990.
2. **Raffe M., Willert C. E., Wereley S. T., Kompenhans J.** Particle Image Velocimetry: A Practical Guide, Second Edition / Springer Berlin Heidelberg New York, 2007.
3. **Adrian R. J.** Image shifting technique to resolve directional ambiguity in double-pulsed velocimetry // Applied Optics – 1986 – Vol. 25 – pp. 3855-3858.
4. **Pick S., Lehmann F.** Stereoscopic PIV on multiple color-coded light sheets and its application to axial flow in flapping robotic insect wings // Experiments in Fluids – 2009 – Vol. 47 – pp. 1009-1023.
5. **Marxen M., Sullivan P. E., Loewen M. R. Jöhne.** Comparison of Gaussian particle center estimators and the achievable measurement density for particle tracking velocimetry // Experiments in Fluids – 2000 – Vol. 29 – pp. 145-153.

A.A. Savin

*Moscow Power Engineering Institute (technical university), Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: alekseisavin@yandex.ru*

COLOR CODING OF PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY'S IMAGES IN MULTI-PULSED MODE

The possibility of application of color coding is studied at the analysis of streams of a fluid and gases by particle image velocimetry. It is displayed that the given method at signal-to-noise ratio gives higher accuracy in comparison with the classical analysis.

PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY, COLOR CODING