УДК 681.121.8:532.574.7

В. В. Кузьмин, А. А. Гайнуллина, А. Н. Ахмерова

БЕСКОНТАКТНЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПОТОКОВ ЖИДКОСТНЫХ И ГАЗОВЫХ СРЕД

Ключевые слова: кинематическая структура потока, трассерное изображение, лазерный доплеровский измеритель скорости, метод цифровой трассерной визуализации.

Рассмотрены бесконтактные оптические методы измерения поля скоростей, такие как измерение скорости с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости, а так же метод цифровой визуализации. Рассмотрены алгоритмы, на базе которых может быть реализована методика цифровой трассерной визуализации. В частности, стандартный и адаптивный кросскорреляционный алгоритмы, а так же алгоритм, основанный на базе реконструкции второго кадра изображения. Произведен сравнительный анализ методов.

Keywords: kinematic structure of the flow, tracer image, Laser Doppler Anemometer, Particle Image Velocimetry.

Non-contact optical measurement methods of the velocity field, such as measuring with Laser Doppler Anemometer and Particle Image Velocimetry, has been investigated. There were also considered algorithms on the basis of which can be implemented Particle Image Velocimetry. Particularly, standard cross-correlation algorithm, adaptive cross-correlation algorithm and algorithm based on the reconstruction of the second image frame. A comparative analysis of methods were made.

Измерение поля скорости потока с целью корректного определения расхода в условиях производственной эксплуатации было, есть и остается актуальной задачей [1,2]. Особенно, если дело касается учета дорогостоящих ресурсов, таких как природный газ, нефть и др.

Изначально измерение скорости потока возможно было только при помощи контактных (зондовых) методов, таких, например, как пьезометрическая трубка или термоанемометр. Однако, данные, получаемые такими средствами измерения, неизбежно содержат в себе дополнительную погрешность, которая обусловлена возмущением, вносимым в поток зондом датчика. Кроме того, контактные методы измерения скоростей позволяют получить данные о состоянии исследуемого потока лишь в одной точке, то есть являются локальными. Для получения информации о структуре потока в целом необходимо выполнить значительное количество точных измерений, что невыгодно ни экономически, ни методически.

С этой точки зрения явными преимуществами обладают бесконтактные методы измерения поля скорости потока. Они позволяют провести диагностику структуры потока и проанализировать её влияние на качество работы расходоизмерительной техники.

В данной работе представлены два метода оптического измерения поля скоростей:

а) лазерный доплеровский измеритель скорости;

б) метод цифровой трассерной визуализации.

Принцип действия лазерного доплеровского измерителя скорости (ЛДИС) основан на том, что движущийся объект облучают пучком лазерного излучения от неподвижного источника. Это излучение отражается от объекта и регистрируется неподвижным приемником. Вследствие эффекта Доплера, частота излучения, попадающего на приемник, будет отличаться от частоты излучения неподвижного источника на величину, пропорциональную скорости движения объекта относительно источника и приемника [3].

Принципиальная оптическая схема лазерного доплеровского измерителя скорости приведена на рисунке 1.

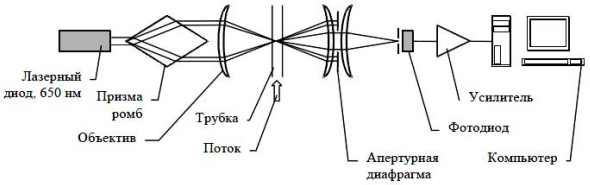

Рис. 1 – Принципиальная схема лазерного доплеровского анемометра

Лазерный пучок расщепляется светоделительной призмой на 2 луча, которые, пересекаясь на поверхности контролируемого объекта, образуют интерференционную картину с периодом d. Излучение, рассеянное неоднородностями на поверхности объекта, собирается приемной оптикой и преобразуется фотоприемным устройством в электрический сигнал, частота которого пропорциональна скорости движения объекта (1):

$$f = \frac{V}{d} = \frac{2 * V * \sin\left(Q/2\right)}{\lambda} \qquad (1)$$

где f – выходная частота лазерного датчика; V – скорость объекта; Q – угол между лазерными лучами; λ – длина волны лазера.

Таким образом, измеряя выходную частоту лазерного датчика, можно определить скорость рассматриваемого объекта (2):

$$V = \frac{f * \lambda}{2 * \sin\left(Q/2\right)} = f * K_{\text{гр}} \qquad (2)$$

где $K_{\text{гр}}$ - градуировочный коэффициент прибора; t – время измерения.

У ЛДИС существуют определенные недостатки, несмотря на то, что как оптический метод измерения, он значительно выигрывает перед зондовыми. Это связано с тем, что не решены задачи разработки методов обработки доплеровских сигналов и создания электронного процессора, позволяющего с высокой точностью вести обработку сигнала в широком диапазоне интенсивностей рассеянного света. Кроме того, ЛДИС хоть и позволяет проводить бесконтактную диагностику исследуемого объекта, все же является локальным средством измерения скорости. Поэтому измерение поле скоростей с помощью ЛДИС является накладным и трудоемким процессом.

В этом плане выигрывают другая методика, в частности, цифровая трассерная визуализация. Её применение стало возможным благодаря развитию численных методов.

Прежде чем начать рассматривать данный метод, нужно сказать, что цифровая трассерная визуализация делится на:

а) планарные методы (позволяют получить две компоненты скорости: продольную и поперечную);

б) объемные методы (позволяют вычислить все три компоненты скорости).

Этот метод основан на измерении перемещений частиц примеси, вводимой в контролируемый поток за фиксированные промежутки времени, и, таким образом, позволяет фиксировать мгновенные картины распределения скоростей в пространстве предвключенного участка, которое высвечивается световым ножом, создаваемым лазером и специальной оптической системой.

Размер, плотность и объемная концентрация частиц-трассеров подбираются так, чтобы эффекты, связанные с двухфазностью потока и плавучестью частиц были минимальны. Измерительной областью потока считается плоскость «вырезаемая» световым ножом, как показано на рисунке 2. Образы частиц регистрируются на электронный носитель [4].

Последующая обработка изображений позволяет рассчитать смещения частиц за фиксированное время и построить поле скоростей.

В качестве источника излучения обычно используются твердотельные импульсные лазеры. Такие лазеры имеют малую длительность импульса и достаточно высокую энергию в импульсе. Они используются в комплекте со стационарной камерой. Так же для освещения частиц применяют непрерывные лазеры. Их используют в комплекте со скоростной кинокамерой.

Существуют различные подходы обработки изображений полученных в результате кино- или фотосъемки.

Такие как корреляционный алгоритм обработки цифровых изображений [4] или алгоритм, основанный на оптимизации реконструированного кадра изображения.

Кросскорреляционный алгоритм имеет две разновидности: авто- и кросскорреляционный. Особенность автокорреляционного алгоритма заключается в том, что начальное и конечное положения частиц-трассеров фиксируется на одном и том же кадре. А при реализации кросскорреляционного алгоритма указанные положения регистрируются на смежных кадрах. Последнее обстоятельство позволяет определить не только величину скорости, но и направление смещения частиц, что очень важно при исследовании потоков с существенной завихренностью.

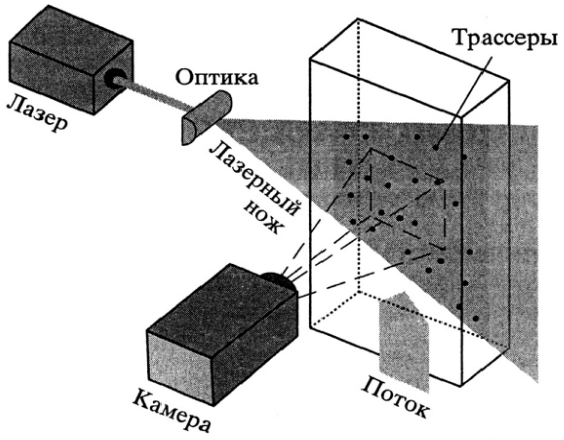

Рис. 2 – Схема реализации метода цифровой трассерной визуализации

В свою очередь, кросскорреляционный алгоритм делится на стандартный и адаптивный.

Выполнение стандартного кросскорреляционного алгоритма происходит по следующим этапам:

а) разбиение пары изображений на элементарные расчетные области равного размера;

б) расчет кросскорреляционной функции;

в) нахождение максимума на корреляционной функции;

г) подпиксельная интерполяция максимума корреляционной функции.

Разбиение изображений происходит таким образом, чтобы в каждую элементарную расчетную область попало несколько частиц.

Сама кросскорреляционная функция представляет свертку интенсивности первого и второго кадров изображений (3):

$$R(m,n) = f * g \qquad (3)$$

где f и g – интенсивности первого и второго кадров изображений.

После вычисления корреляционной функции определяется максимум корреляционного пика, что соответствует наиболее вероятному смещению в области. Поскольку изображение представляется в виде конечного числа элементов, найденное положение максимума будет иметь целочисленные координаты в пикселях.

Если нужно определить смещение частиц с подпиксельной точностью, производят интерполяцию корреляционного максимума.

Далее, зная смещение d и интервал времени Δt, рассчитывают скорость частиц в рамках расчетной области (4).

$$v = M\frac{d}{\Delta t} \quad (4)$$

где M – масштабный коэффициент увеличения системы регистрации.

Данный алгоритм имеет ряд ограничений, такие как:

а) эффект конечности элементарного объема;

б) ограничение динамического диапазона измеряемых скоростей;

в) пространственное разрешение;

г) точность расчета полей скорости по изображениям;

д) эффект peack-locking .

Уменьшить ограничения позволяет адаптивный кросскорреляционный алгоритм. При его расчете выполняются аналогичные действия, что и при стандартном. Однако, есть и различия. Его основным преимуществом перед стандартным кросскорреляционным алгоритмом является наличие поправки смещения частиц-трассеров.

Поправка позволяет учесть локальный градиент скорости. В то время как в стандартном алгоритме смещение принято считать одинаковым для всех частиц в рамках одной ячейки.

Наличие поправки позволяет уменьшить ограничения, свойственные стандартному алгоритму и увеличить точность обработки результатов. Поэтому, сравнивая стандартный и адаптивный алгоритмы, можно прийти к выводу, что адаптивный алгоритм эффективнее.

Если рассматривать трассерную визуализацию на базе оптимизации реконструированного изображения, то здесь подход совершенно иной. Так, при применении корреляционного алгоритма оба кадра изображения получены за счет кино- или фотосъемки, в то время как при оптимизации помимо двух снятых кадров производится реконструкция второго (синтетического) кадра с минимальными отличиями. Данный подход используется в методе, основанном на поиске векторов путем минимизации ошибки за счет градиентного спуска [5,6].

В данном методе сначала рассчитывается смещение на базе стандартного кросскорреляционного алгоритма. После формируются узловые значения векторов смещения для каждой элементарной ячейки разбиения. Далее по полученным узловым значениям производится расчет смещения частиц для реконструированного кадра и производится его построение. Затем вычисляется мера отличия между реконструированным изображением и вторым кадром и производится уточнение узловых компонент из условия минимума меры отличия.

Мерой отличия служит значение функции (5):

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\frac{\left((J_r)_{ij} - (J_2)_{ij}\right)^2}{(J_{\max})^2}} \quad (5)$$

где $(J_1)_{ij}$, $(J_2)_{ij}$, $(J_r)_{ij}$ – интенсивность пикселя i, j на первом, втором, и реконструированном кадрах; J_{max} – интенсивность самого яркого пикселя; M,N – размеры изображения в пикселях.

Реконструированное изображение строится на основе первого. Смещение частиц для реконструированного кадра определяется по формулам (6,7):

$$dx_{ij}^k = x_1^k(1-\varepsilon_1)(1-\varepsilon_2) + x_2^k\varepsilon_2(1-\varepsilon_2) + x_3^k\varepsilon_1\varepsilon_2 + x_4^k\varepsilon_2(1-\varepsilon_2); \quad (6)$$

$$dy_{ij}^k = y_1^k(1-\varepsilon_1)(1-\varepsilon_2) + y_2^k\varepsilon_2(1-\varepsilon_2) + y_3^k\varepsilon_1\varepsilon_2 + y_4^k\varepsilon_2(1-\varepsilon_2); \quad (7)$$

где dx^k_{ij}, dy^k_{ij} – соответственно горизонтальное и вертикальное перемещение пикселя с координатами i,j, принадлежащего элементарной области разбиения с номером k, между первым и вторым кадрами; X_1^k, X_2^k, X_3^k, X_4^k – узловые значения горизонтальных проекции векторов перемещения; Y_1^k, Y_2^k, Y_3^k, Y_4^k – узловые значения вертикальных проекции векторов перемещения; ε_1, ε_2 – локальные координаты пикселя i,j.

Если сравнивать алгоритм, основанный на на оптимизации реконструированного изображения со стандартным кросскорреляционными или адаптивным кросскорреляционными алгоритмами, то у него есть преимущества.

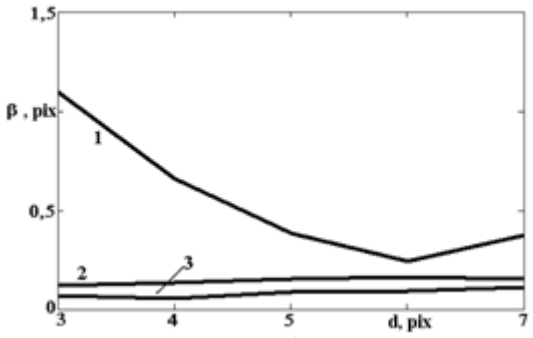

Рис. 3 - Систематическая погрешность алгоритмов в зависимости от диаметра трассеров: 1 – стандартный кросскорреляционный алгоритм; 2 – адаптивный кросскорреляционный алгоритм; 3 – алгоритм, основанный на оптимизации реконструированного кадра

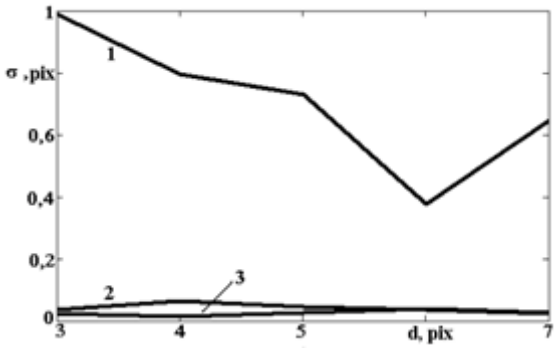

Рис. 4 - Случайная погрешность алгоритмов в зависимости от диаметра трассеров: 1 – стандартный кросскорреляционный алгоритм; 2 – адаптивный кросскорреляционный алгоритм; 3 – алгоритм, основанный на оптимизации реконструированного кадра

Так точность, с которой производится цифровая обработка изображений, напрямую зависит от качества входных данных (изображений). В свою очередь, качество изображений зависит от используемой оптической системы регистрации, от самого потока и равномерности его засева и параметров трассеров. Все эта налагает определенные требования на условия эксперимента при изучении структуры потока.

В то время как для алгоритма, основанного на оптимизации реконструированного кадра изображения данные требования к регистрирующей системе могут снижены за счет построения синтетического кадра. То есть в этом методе можно избежать влияния такого фактора, как шум камеры. В качестве примера на рисунках 3 и 4 приведены случайные и систематические погрешности алгоритмов в зависимости от диаметра трассеров.

Литература

1 В.А. Фафурин и др. Анализ параметров численных методов при расчете метрологических характеристик расходомеров на базе стандартной диафрагмы / Фафурин В.А., Фефелов В.В., Яценко И.А. / Вестник Казанского технологического Университета – 2011. Т.15, № 23, С. 136-144.

2 А.Р. Тухватуллин и др. Аттестация эталонов единиц массового и объемного расходов жидкости / Тухватуллин А.Р., Корнеев Р.А, Колодников А.В., Нигматуллин Р.Р, Ганиев Р.И. // Вестник Казанского технологического Университета – 2012. Т. 15, № 18, С. 245-247.

3 Ю. Д. Каминский, С.Ю. Проскурнев, В.И. Заманский / Наука и техника – 2008. Т. 309,№ 2, С. 27-29.

4 М.П. Токарев, Д.М. Маркович, А.В. Бильский / Вычислительные технологии – 2007. Т.12, № 3, С. 109-130.

5 А.Е. Мочалин / Радиоэлектронные и компьютерные системы – 2010 Т. 45, № 4, С. 174-178.

6 А.Е. Мочалин / Радиоэлектронные и компьютерные системы – 2011. Т. 52, № 4, С. 60-65.

© **В. В. Кузьмин –** к.т.н., доц. каф. САУТП КНИТУ, sautp@kstu.ru **А. А. Гайнуллина –** асс. той же кафедры, alinagainullina@rambler.ru; **А. Н. Ахмерова** – студ. КНИТУ.