

УДК 519.21

Ю. Е. Воскобойников, М. С. Иванов, Н. П. Кисленко, О. Н. Мосейчук

(Новосибирск)

ЭФФЕКТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ПОЛЕЙ СКОРОСТЕЙ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ЧАСТИЦ В ПОТОКЕ

Для вычисления корреляционных функций двумерных изображений предлагается разреженное дискретное преобразование Фурье, что позволяет в 3—5 раз уменьшить количество вычислительных операций по сравнению с алгоритмом быстрого преобразования Фурье. Для удаления аномальных вычисленных векторов скорости и сглаживания векторов шума применяются нелинейные алгоритмы фильтрации и двумерные сглаживающие сплайны. Эффективность предлагаемого подхода иллюстрируется результатами обработки экспериментальных данных.

Введение. В последнее десятилетие широкое применение в экспериментальных исследованиях полей скоростей потоков жидкостей получил PIV-метод ("particle-image velocimetry method"). Сущность этого метода заключается в том, что в точно определенные моменты времени t и $t + \Delta t$ фиксируют на киноплёнку или делают видеозапись расположения в потоке специально введенных маркированных частиц. В результате обработки этих изображений вычисляется поле векторов смещения частиц за время Δt , а это, в свою очередь, дает возможность оценить поле мгновенных скоростей потока. Однако цифровая обработка и случайный характер исходных изображений обуславливают ряд трудностей, главные из которых:

- существенные затраты машинного времени, что делает невозможным использование PIV-метода для оперативного исследования потоков;
- противоречие между разрешающей способностью метода и устойчивостью вычисляемых оценок поля скоростей.

В данной статье предлагаются алгоритмы, позволяющие в известной мере преодолеть отмеченные трудности.

Корреляционные алгоритмы обработки изображений PIV-метода. Предположим, что в момент t расположение маркированных частиц в исследуемом потоке описывается изображением $g(n_1, n_2)$, а в момент $t + \Delta t$ — изображением $f(n_1, n_2)$. Если обозначить через $h(j_1, j_2)$ вектор смещения частицы в точке (j_1, j_2) за время Δt , то связь между двумя изображениями g, f выражается двумерной дискретной сверткой:

$$f(n_1, n_2) = \sum_{j_1} \sum_{j_2} h(n_1 - j_1, n_2 - j_2)g(j_1, j_2). \quad (1)$$

Очевидно, что, зная вектор смещения $h(j_1, j_2)$, можно достаточно точно оценить (при правильно подобранной величине Δt) вектор скорости потока в точке (j_1, j_2) в момент t , а именно $v(j_1, j_2) \approx h(j_1, j_2)/\Delta t$.

Таким образом, основной задачей обработки данных PIV-метода является оценивание вектора смещения $h(j_1, j_2)$ по зарегистрированным изображениям:

$$\begin{aligned} \tilde{f}(n_1, n_2) &= f(n_1, n_2) + \eta(n_1, n_2), \\ \tilde{g}(n_1, n_2) &= g(n_1, n_2) + \xi(n_1, n_2), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\eta(n_1, n_2)$, $\xi(n_1, n_2)$ — «шумы регистрации», обусловленные различными причинами.

Заметим, что задача решения свертки (1) относительно $h(j_1, j_2)$ является некорректно поставленной [1] из-за неустойчивости найденного обычными методами решения к шумам регистрации исходных изображений. Конечно, применение соответствующих регуляризирующих алгоритмов, основанных на дискретном преобразовании Фурье [2], позволяет получить устойчивое решение, но это сопряжено со значительными вычислительными затратами, обусловленными высокой размерностью задачи (1).

Более предпочтительным представляется корреляционный подход, используемый для непараметрической идентификации динамических систем. Применение этого подхода обуславливает разбиение поля вектора смещения $h(j_1, j_2)$ на прямоугольные (чаще всего квадратные) фрагменты размером $N_1 \times N_2$ пикселей, называемые спотами. Делается предположение, что внутри каждого k -го спота вектор смещения постоянен, т. е.

$$h_k(j_1, j_2) = \delta(j_1 - j_{1k}, j_2 - j_{2k}), \quad (3)$$

где $\delta(j_1, j_2)$ — функция Дирака, определенная соотношением

$$\delta(j_1, j_2) = \begin{cases} 1, & j_1 = 0, j_2 = 0, \\ 0 & \text{в других случаях.} \end{cases} \quad (4)$$

Данное предположение существенно, так как при больших размерах спота вектор $h_k(j_1, j_2)$ является средней величиной всех векторов смещения, попавших в этот спот. Используя предположение (3), получим выражения для корреляционных функций, вычисляемых по споту размером $N_1 \times N_2$. Эти соотношения в отличие от работы [3] учитывают конечные размеры спота и шумы регистрации, что позволяет оценить шумовой фон корреляционной функции.

Пусть $g(n_1, n_2)$, $f(n_1, n_2)$ — два изображения, определенные на споте $N_1 \times N_2$. Тогда выборочную взаимную корреляционную функцию этих изображений определим выражением

$$r_{gf}(l_1, l_2) = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} g(n_1, n_2) f(n_1 + l_1, n_2 + l_2). \quad (5)$$

Можно показать, что корреляционная функция $r_{\bar{g}\bar{f}}(l_1, l_2)$ изображений (2) определяется суммой

$$\begin{aligned} r_{\bar{g}\bar{f}}(l_1, l_2) &= r_{g\eta}(l_1, l_2) + r_{\xi\eta}(l_1, l_2) + \sum_{j_1=0}^{N_1-1} \sum_{j_2=0}^{N_2-1} h(l_1 - j_1, l_2 - j_2) r_{gg}(j_1, j_2) + \\ &+ \sum_{j_1=0}^{N_1-1} \sum_{j_2=0}^{N_2-1} h(l_1 - j_1, l_2 - j_2) r_{\xi g}(j_1, j_2). \end{aligned}$$

При справедливости допущения (3) и с учетом (4) приходим к выражению

$$r_{\bar{g}\bar{f}}(l_1, l_2) = r_{gg}(l_1 - j_{1k}, l_2 - j_{2k}) + r_{\xi g}(l_1 - j_{1k}, l_2 - j_{2k}) + r_{g\eta}(l_1, l_2) + r_{\xi\eta}(l_1, l_2). \quad (6)$$

Максимум функции $r_{gg}(l_1, l_2)$ достигается в точке $(0, 0)$. Если выполнится условие

$$r_{gg}(0, 0) > \max(r_{\xi g}(n_1, n_2) + r_{g\eta}(n_1, n_2) + r_{\xi\eta}(n_1, n_2)), \quad (7)$$

то максимум функции $r_{\tilde{g}\tilde{f}}(l_1, l_2)$, вычисленной по k -му споту, будет находиться в точке (j_{1k}, j_{2k}) . Координаты этой точки однозначно определяют искомый вектор смещения для k -го спота.

С точки зрения условия (7) значения выборочных корреляционных функций $r_{\tilde{g}\tilde{g}}(l_1, l_2)$, $r_{\tilde{g}\tilde{\eta}}(l_1, l_2)$, $r_{\tilde{\eta}\tilde{\eta}}(l_1, l_2)$ являются своеобразным «шумовым фоном» и для вычисления максимума желателно уменьшить уровень шума. Этот вопрос обсуждается ниже.

Полученное уравнение (6) соответствует измерительной схеме, когда каждое из двух изображений регистрируется на отдельный кадр ("single-exposure double-pulsed system"). Время, необходимое для смены кадров, делает эту схему неприемлемой при малых значениях Δt , которые требуются при диагностике высокоскоростных потоков. В этом случае обращаются к схеме, когда два изображения $g(n_1, n_2)$ и $f(n_1, n_2)$ регистрируются на один и тот же кадр ("double-exposure system"), и в результате этого в кадре имеется суммарное изображение:

$$\tilde{\varphi}(n_1, n_2) = g(n_1, n_2) + f(n_1, n_2) + \xi(n_1, n_2). \quad (8)$$

Так как изображение только одно, по нему можно вычислить лишь выборочную автокорреляционную функцию

$$r_{\tilde{\varphi}\tilde{\varphi}}(l_1, l_2) = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} \tilde{\varphi}(n_1, n_2) \tilde{\varphi}(n_1 + l_1, n_2 + l_2).$$

Возникает вопрос: можно ли определить по $r_{\tilde{\varphi}\tilde{\varphi}}$ координаты вектора смещения? Для ответа вычислим $r_{\tilde{\varphi}\tilde{\varphi}}(l_1, l_2)$ при предположении (3):

$$r_{\tilde{\varphi}\tilde{\varphi}}(l_1, l_2) = 2r_{\tilde{g}\tilde{g}}(l_1, l_2) + r_{\tilde{g}\tilde{\eta}}(l_1, l_2) + r_{\tilde{\eta}\tilde{g}}(l_1, l_2) + r_{\tilde{\eta}\tilde{\eta}}(l_1, l_2) + r_{\tilde{g}\tilde{g}}(l_1 - j_{1k}, l_2 - j_{2k}) + r_{\tilde{\eta}\tilde{g}}(l_1 - j_{1k}, l_2 - j_{2k}) + r_{\tilde{g}\tilde{g}}(l_1 + j_{1k}, l_2 + j_{2k}) + r_{\tilde{\eta}\tilde{g}}(l_1 + j_{1k}, l_2 + j_{2k}). \quad (9)$$

Анализ этого выражения показывает, что корреляционная функция $r_{\tilde{\varphi}\tilde{\varphi}}(l_1, l_2)$ имеет глобальный максимум в точке $(0, 0)$ и этот максимум равен

$$r_{\tilde{\varphi}\tilde{\varphi}}(0, 0) = 2r_{\tilde{g}\tilde{g}}(0, 0) + 2r_{\tilde{g}\tilde{\eta}}(0, 0) + r_{\tilde{\eta}\tilde{\eta}}(0, 0) + 2r_{\tilde{g}\tilde{g}}(j_{1k}, j_{2k}) + 2r_{\tilde{g}\tilde{\eta}}(j_{1k}, j_{2k}).$$

Следующие два равных максимума находятся в точках (j_{1k}, j_{2k}) , $(-j_{1k}, -j_{2k})$, и имеет место приближение

$$r_{\tilde{\varphi}\tilde{\varphi}}(0) - r_{\tilde{\varphi}\tilde{\varphi}}(j_{1k}, j_{2k}) = r_{\tilde{\varphi}\tilde{\varphi}}(0, 0) - r_{\tilde{\varphi}\tilde{\varphi}}(-j_{1k}, -j_{2k}) \approx r_{\tilde{g}\tilde{g}}(0, 0) - r_{\tilde{g}\tilde{g}}(2j_{1k}, 2j_{2k}).$$

Если уровень «шумового фона»

$$r_{\tilde{g}\tilde{\eta}}(l_1, l_2) + r_{\tilde{\eta}\tilde{g}}(l_1, l_2) + r_{\tilde{\eta}\tilde{\eta}}(l_1, l_2) + r_{\tilde{g}\tilde{g}}(l_1 - j_{1k}, l_2 - j_{2k}) + r_{\tilde{\eta}\tilde{g}}(l_1 + j_{1k}, l_2 + j_{2k})$$

достаточно мал, то по положению вторых (по величине) максимумов определяются координаты (j_{1k}, j_{2k}) , $(-j_{1k}, -j_{2k})$.

Возникает вопрос: какие из этих двух пар координат взять в качестве искомых? Для однозначного отбора используют прием, подробно описанный в [4], суть которого заключается в следующем. Перед регистрацией в момент $t + \Delta t$ путем поворота зеркала регистрирующей системы получается изображение, сдвинутое всегда вправо и вверх по отношению к изображению, зарегистрированному в момент t . Это означает, что полученный вектор смещения лежит в первой четверти, и поэтому всегда в качестве (j_{1k}, j_{2k}) берутся значения $j_{1k} \geq 0$, $j_{2k} \geq 0$. Затем из точки (j_{1k}, j_{2k}) вычитается вектор сдвига, обусловленный поворотом зеркала, и получается истинный вектор смещения.

Общей чертой рассмотренных схем регистрации является вычисление выборочных корреляционных функций для каждого спота. Непосредственная реализация формулы (5) требует порядка $N_1^2 \times N_2^2$ вычислительных операций.

Обычно количество спотов в изображении составляет 800—1000. Поэтому этап вычисления корреляционных функций требует существенных затрат машинного времени (примерно 10^3 — 10^4 с). Рассмотрим алгоритмы, позволяющие сократить эти затраты.

Эффективный алгоритм вычисления корреляционных функций. Существенное сокращение числа операций удастся достигнуть, используя для вычисления корреляции (5) двумерное дискретное преобразование Фурье (ДПФ). Прямое ДПФ над двумерным дискретным полем $g(n_1, n_2)$ определяется соотношением

$$G(k_1, k_2) = \sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} g(n_1, n_2) e^{-i(2\pi n_1 k_1)/N_1} e^{-i(2\pi n_2 k_2)/N_2}, \quad (10)$$

$$k_1 = 0, \dots, N_1 - 1; \quad k_2 = 0, \dots, N_2 - 1,$$

где $i = \sqrt{-1}$, а $G(k_1, k_2)$ называются коэффициентами ДПФ. Обратное ДПФ имеет вид

$$g(n_1, n_2) = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{k_1=0}^{N_1-1} \sum_{k_2=0}^{N_2-1} G(k_1, k_2) e^{i(2\pi n_1 k_1)/N_1} e^{i(2\pi n_2 k_2)/N_2}. \quad (11)$$

По аналогии со свойством коэффициентов ДПФ двумерной дискретной свертки [5, с. 95] можно показать, что для (5) справедливо свойство

$$R_{\tilde{g}\tilde{f}}(k_1, k_2) = \tilde{G}^*(k_1, k_2) \tilde{F}(k_1, k_2), \quad (12)$$

где * — знак комплексного сопряжения.

Для коэффициентов ДПФ функции $r_{\tilde{g}\tilde{f}}(n_1, n_2)$ справедливо соотношение

$$R_{\tilde{g}\tilde{f}}(k_1, k_2) = |\Phi(k_1, k_2)|^2. \quad (13)$$

Таким образом, процедуру вычислений корреляционных функций можно представить следующими шагами:

1. Вычисление коэффициентов ДПФ $\tilde{G}(k_1, k_2)$, $\tilde{F}(k_1, k_2)$ (или $\tilde{\Phi}(k_1, k_2)$) от исходных изображений $\tilde{g}(n_1, n_2)$, $\tilde{f}(n_1, n_2)$ (или $\tilde{\varphi}(n_1, n_2)$) взятием прямого ДПФ (10).

2. В соответствии с (12) (или (13)) находятся коэффициенты ДПФ $R_{\tilde{g}\tilde{f}}(k_1, k_2)$ (или $R_{\tilde{\varphi}\tilde{f}}(k_1, k_2)$).

3. По вычисленным $R_{\tilde{g}\tilde{f}}(k_1, k_2)$ (или $R_{\tilde{\varphi}\tilde{f}}(k_1, k_2)$) взятием обратного ДПФ (11) вычисляется $r_{\tilde{g}\tilde{f}}(l_1, l_2)$ (или $r_{\tilde{\varphi}\tilde{f}}(l_1, l_2)$).

Если вычисление ДПФ производить непосредственно по формулам (10), (11), то изложенный алгоритм также потребует порядка $N_1^2 \times N_2^2$ вычислительных операций. Применение алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ) требует порядка $(N_1 \log_2 N_1) (N_2 \log_2 N_2)$ операций и при типичных размерах спота позволяет уменьшить количество операций в 5—10 раз.

Вычисление корреляционных функций по изображениям РИВ-метода имеет свою специфику. Во-первых, идеальное изображение должно состоять из набора δ -функций, расположенных в пикселах, в которых зарегистрированы частицы, т. е. изображение является бинарным. Очевидно, что нулевые значения изображения можно исключить из вычисления ДПФ. Во-вторых, «шумовой фон» корреляционных функций (см. (6), (9)) имеет широкополосный спектр и для надежного нахождения точки максимума целесообразно выполнить низкочастотную фильтрацию, простейшим случаем которой является зануление коэффициентов ДПФ, соответствующих высоким частотам. Следовательно, в этом случае коэффициенты ДПФ нужно вычислять только для индексов $l_1 = 0, \dots, K_1 - 1$; $l_2 = 0, \dots, K_2 - 1$; $K_1 < N_1$; $K_2 < N_2$.

Отмеченные особенности нельзя учесть в алгоритме БПФ: в вычислении коэффициентов ДПФ участвуют все пиксели изображения, коэффициенты ДПФ вычисляются для $l_1 = 0, \dots, N_1 - 1; l_2 = 0, \dots, N_2 - 1$. Ниже предлагается алгоритм разреженного ДПФ, который учитывает особенности изображений РИВ-метода.

Определим разреженное ДПФ следующими соотношениями:

$$G_6(k_1, k_2) = \sum_{j=1}^N g_6(n_{1j}, n_{2j}) e^{-i(2\pi n_{1j} k_1)/N_1} e^{-i(2\pi n_{2j} k_2)/N_2}, \quad (14)$$

$$k_1 = 0, \dots, K_1 - 1; \quad k_2 = 0, \dots, K_2 - 1,$$

$$g_6(n_{1j}, n_{2j}) = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{k_1=0}^{K_1-1} \sum_{k_2=0}^{K_2-1} G_6(l_1, l_2) e^{i(2\pi n_{1j} l_1)/N_1} e^{i(2\pi n_{2j} l_2)/N_2}, \quad j = 1, \dots, N, \quad (15)$$

где $g_6(n_{1j}, n_{2j})$ — бинарная дискретная функция, принимающая ненулевые значения только в пикселях (n_{1j}, n_{2j}) ; N — число ненулевых значений.

Видно, что в ДПФ участвуют только ненулевые пиксели и вычисляется заданное число $K_1 \times K_2$ коэффициентов ДПФ. Для уменьшения затрат на вычисление функций синуса и косинуса предложены рекуррентные соотношения.

Переход от исходного изображения к бинарному осуществляется достаточно просто:

$$g_6(n_1, n_2) = \begin{cases} 1, & \text{если } g(n_1, n_2) \geq \tau, \\ 0, & \text{если } g(n_1, n_2) < \tau, \end{cases}$$

где τ — пороговое значение (обычно задаваемое как $0,25 \div 0,35 \max g(n_1, n_2)$).

Эффективность разреженного ДПФ (РДПФ) характеризуется соотношением между затратами машинного времени для вычисления разреженного ДПФ (соотношение (14)) и затратами вычисления ДПФ с помощью алгоритма БПФ, т. е.

$$E_c = (\text{время РДПФ}) / (\text{время БПФ}).$$

Значения E_c для стандартных концентраций частиц (ненулевые значения изображений) приведены в таблице.

Анализ таблицы показывает, что применение разреженного ДПФ дополнительно уменьшит в 3—5 раз затраты времени на вычисление двумерных корреляционных функций.

Число частиц в споте N	Количество коэффициентов K_1	Количество коэффициентов K_2	E_c
10	5	5	0,04
10	8	8	0,08
10	10	10	0,13
10	15	15	0,21
13	5	5	0,06
13	8	8	0,12
13	10	10	0,18
13	15	15	0,31

Нелинейная фильтрация и сглаживание полей скоростей. Очевидно, что точность PIV-метода зависит от точности определения положения максимума корреляционной функции. С этой точки зрения можно выделить две ситуации.

1. Максимум корреляционной функции явно выражен (существенно превосходит ее шумовой фон), и его положение определяется с небольшими ошибками. Эта ситуация имеет место при большом числе частиц в споте, а ошибки могут быть вызваны совмещением некоторых частиц в момент регистрации, ошибками преобразования в бинарное изображение, эффектом аберрации при регистрации частиц, а также целочисленными координатами положения максимума, особенно при малых $j_{1k} = 0, 1; j_{2k} = 0, 1$.

2. Имеет место высокий шумовой фон корреляционной функции, что обуславливает существование нескольких сравнимых максимумов, среди которых, возможно, отсутствует истинный максимум. Причины возникновения такой ситуации могут быть различными [6]: неодинаковый размер частиц, небольшое количество частиц в споте, неточная фокусировка оптической системы регистрации, выход большого числа частиц за пределы спота за интервал времени Δt регистрации, непостоянство вектора смещения внутри спота (т. е. нарушается допущение (3)). В этой ситуации возможно появление «аномальных» векторов скорости (выбросов), сильно отличающихся по направлению и величине от векторов скорости в близлежащих спотах.

Для уменьшения ошибок оценивания вектора скорости используются различные приемы, применяемые как к исходным изображениям [7] (правильный выбор порогового значения τ при формировании бинарного изображения, «центрирование», т. е. замена образа частицы, занимающего несколько пикселей, одним пикселем с координатами центра), так и к вычисленной корреляционной функции [3] (определение координат смещения вектора не по положению максимального значения корреляционной функции, а по координатам максимума экспоненциальной или квадратичной аппроксимации, построенной по точкам в окрестности максимума).

В данной работе предлагаются алгоритмы обработки уже полученного поля скоростей, которые в определенной степени решают противоречие между разрешающей способностью PIV-метода и устойчивостью вычисляемых оценок времени вектора скорости.

Заметим, что доступным параметром обработки изображений, управляющим этими двумя характеристиками, является размер спота. Действительно, из-за случайности ошибок регистрации изображений увеличение размера спота (т. е. объема выборки) уменьшает шумовой фон выборочной корреляционной функции и увеличивает точность оценивания. Однако при этом ухудшается разрешающая способность метода из-за замены всех истинных векторов скорости, попавших внутрь спота, одним усредненным значением. При уменьшении размера спота наблюдается обратная картина.

Предлагается выбирать размер спота максимально допустимым, исходя из априорной информации о структуре исследуемого поля скоростей. Размеры спота N_1 и N_2 могут быть различными, например 32×16 , если градиент скорости по первой оси в 2 раза меньше градиента по второй оси.

Однако при этом уменьшается общее число неперекрывающихся спотов, а следовательно, увеличивается шаг сетки, в узлах которой вычисляется вектор скорости $v(s_{1k}, s_{2k})$, где (s_{1k}, s_{2k}) — координаты центра k -го спота. Возможны два способа получения «густого» поля скоростей:

— построение по значениям $j_{1k}(s_{1k}, s_{2k}), j_{2k}(s_{1k}, s_{2k})$ двумерных сплайнов и вычисление по ним проекций вектора смещения в любой точке (s_1, s_2) , не обязательно с целыми координатами;

— построение взаимно перекрывающихся спотов. Так, вводом перекрытия, равного $1/2$ по каждой оси, в 4 раза увеличивается число узлов, но также в 4 раза увеличиваются затраты машинного времени по сравнению с неперекрывающимися спотами.

Поэтому более предпочтительным с точки зрения уменьшения вычислительных затрат и повышения точности оценивания за счет дополнительного сглаживания представляется использование сглаживающих сплайнов. По-

строение двумерного кубического сглаживающего сплайна сводится к построению набора одномерных сплайнов сначала по первой переменной s_1 , затем по s_2 . Выбор параметра сглаживания осуществляется по заданной ширине аппаратной функции сплайна [8], которая может быть различной по s_1 и s_2 .

Если при выбранном размере спота все же появились аномальные векторы скорости (выбросы), то для их удаления можно применить нелинейную фильтрацию изображений $\{j_{1k}(s_{1k}, s_{2k})\}$, $\{j_{2k}(s_{1k}, s_{2k})\}$. Простейшим примером такой фильтрации является медианная [9], которая хорошо удаляет выбросы, но плохо подавляет низкоамплитудные шумы. Более предпочтителен комбинированный алгоритм, описанный в [10] и сочетающий медианный фильтр с интервальным усреднением внутри перемещающейся апертуры фильтра.

Предлагаемый подход к удалению аномальных векторов на основе нелинейной фильтрации представляется более предпочтительным по сравнению с использованием методов гистограммы и усредняющего оператора, рассмотренных в [6]. Следует заметить, что в случае экспресс-диагностики потоков можно ограничиться только медианной фильтрацией, которая устранил аномальные векторы скорости и сохранит «тонкую структуру» исследуемого поля скоростей. При возникновении в дальнейшем интереса к этому полю скоростей для сглаживания низкоамплитудных ошибок и получения «густой» сетки используются двумерные сглаживающие сплайны (этап пост-обработки).

Результаты обработки экспериментальных данных. Предлагаемый в работе подход проиллюстрируем на примере обработки данных, любезно предоставленных Дж. Компенхансом (DLR — Институт механики жидкостей, Геттенген, Германия). Эти данные представляют два изображения частиц в потоке, снятых в моменты t (рис. 1) и $t + \Delta t$. Размер изображения 512×480 пикселей.

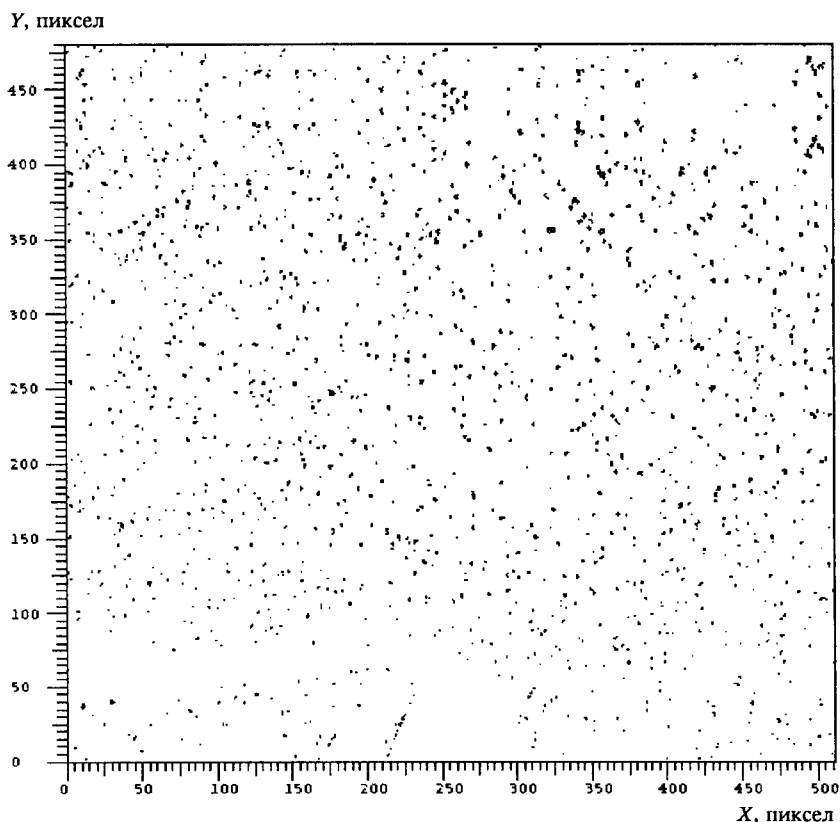


Рис. 1. Исходное расположение частиц, зарегистрированное в момент времени t

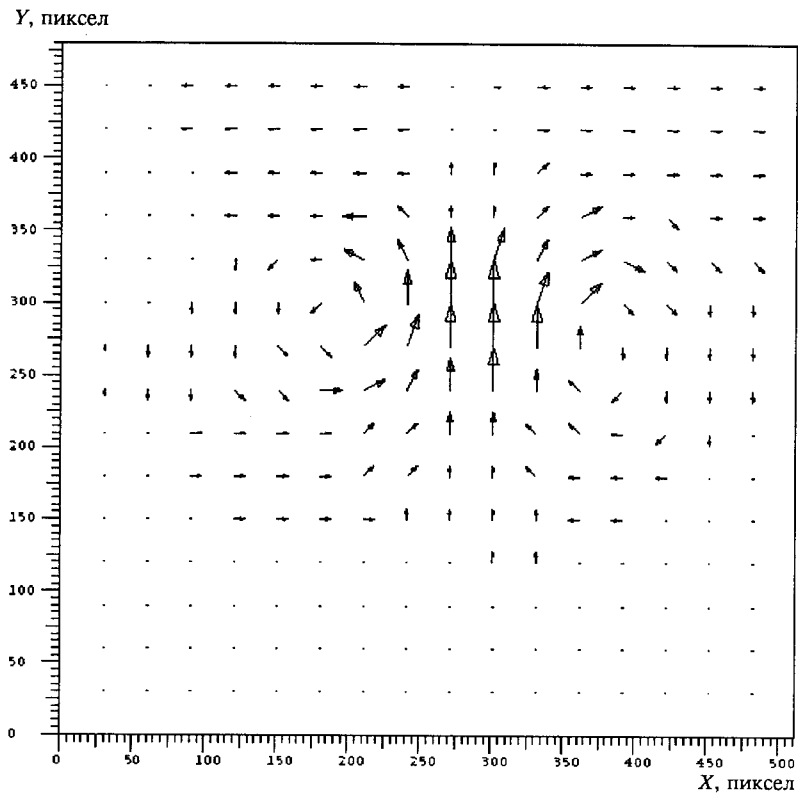


Рис. 2. Поле скоростей, построенное по споту размером 32×32

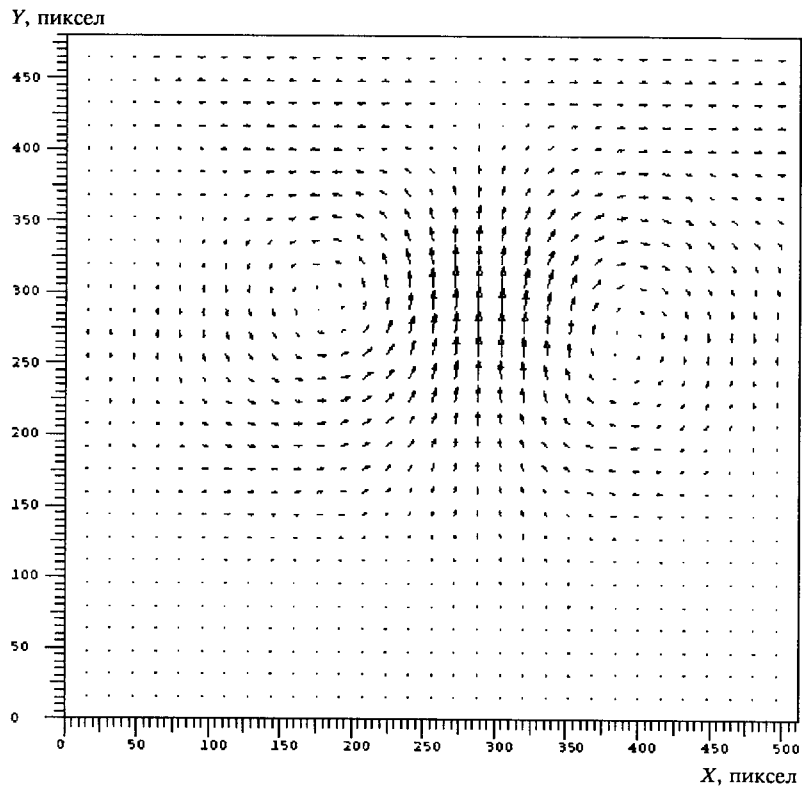


Рис. 3. Поле скоростей, вычисленное по сглаживающему сплайну (размер спота 32×32)

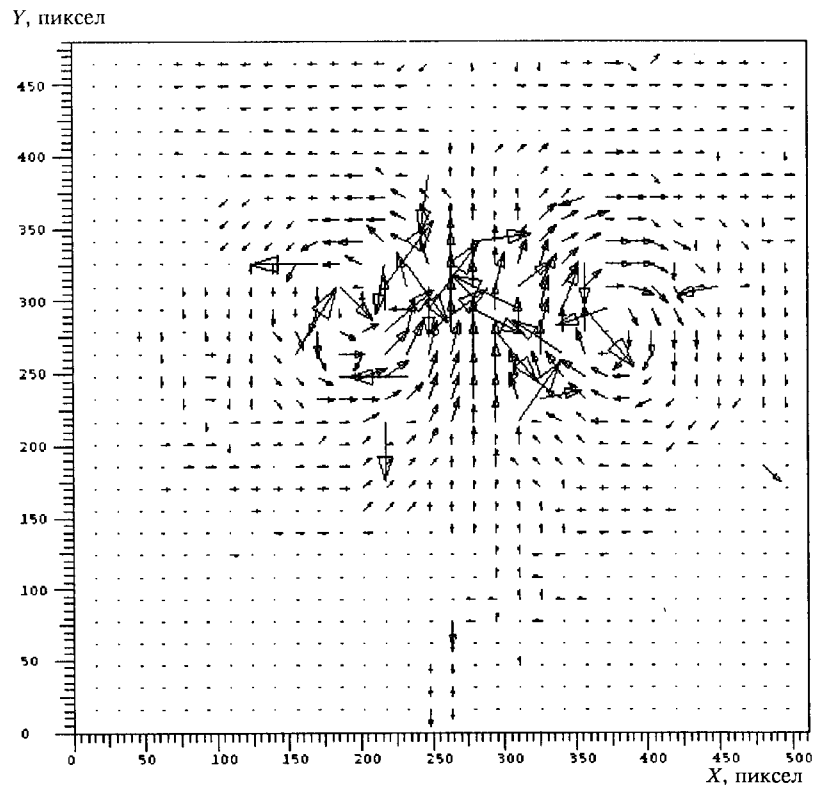


Рис. 4. Поле скоростей, построенное по споту размером 16×16

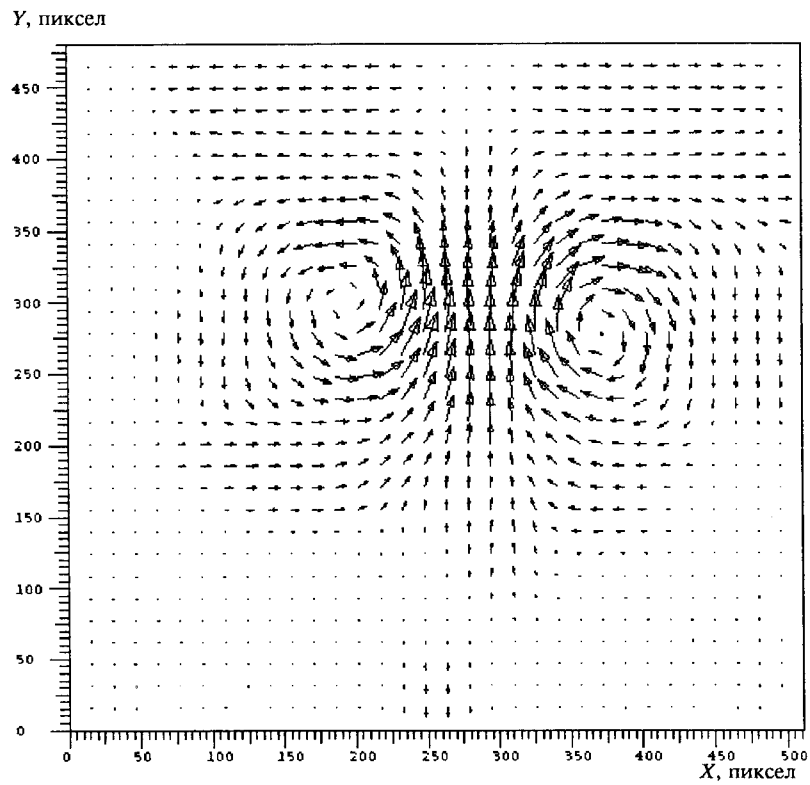


Рис. 5. Поле скоростей, являющееся результатом медианной фильтрации и сглаживания сплайном (размер спота 16×16)

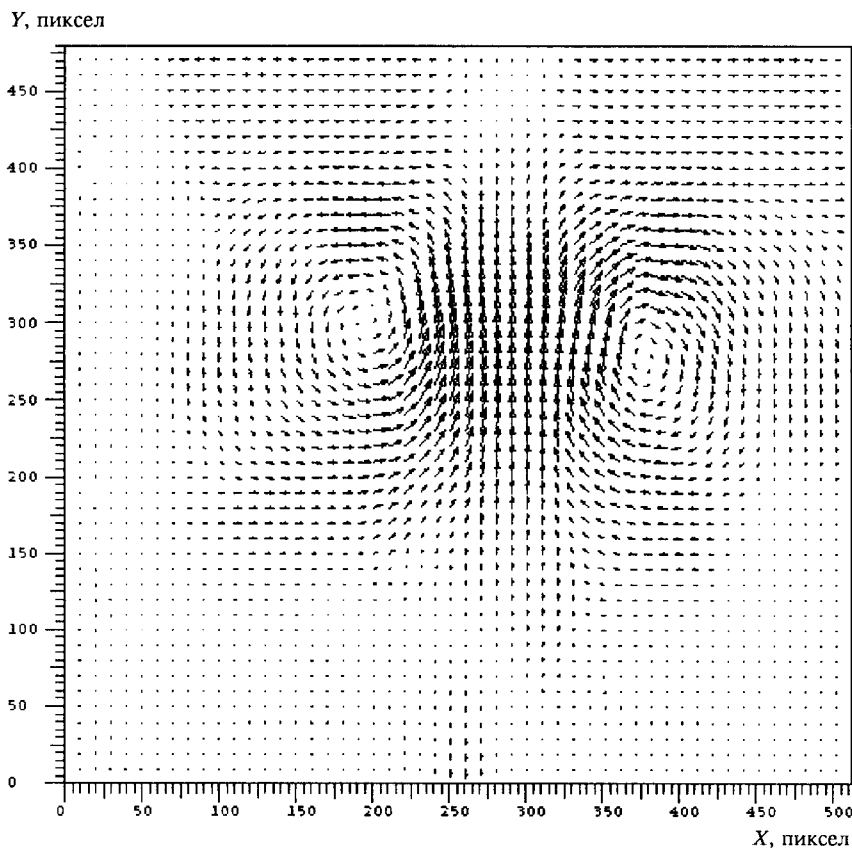


Рис. 6. Поле скоростей, вычисленное по сглаживающему сплайну в узлах «густой» сетки

Первоначально размер спота был принят 32×32 , и на основе вычисления выборочной корреляционной функции получено поле скоростей в узлах сетки 16×15 , представленное на рис. 2. Для получения «густой» сетки 32×30 по этому полю построен двумерный сглаживающий сплайн, по которому вычислены значения в узлах «густой» сетки (рис. 3).

Для исследуемого потока размер спота 32×32 являлся завышенным, что привело к сглаживанию «тонких» деталей потока, находившихся в нижней части поля. Для повышения разрешающей способности метода принят новый размер спота 16×16 и получено поле скоростей, представленное на рис. 4. К сожалению, в нем присутствуют аномальные векторы скорости, и для их удаления выполнена двухэтапная обработка:

- комбинированная нелинейная фильтрация выбросов [10];
- сглаживание двумерным сглаживающим сплайном.

На рис. 5 представлено поле скоростей, полученное в результате этой обработки в узлах исходной сетки (32×30), а на рис. 6 — в узлах «густой» сетки (50×47). На рисунках иллюстрируется хорошая разрешающая способность (в нижней части рисунков отчетливо видны векторы скорости, направленные вниз) и высокая устойчивость предложенного подхода к обработке данных PIV-метода.

Полные затраты машинного времени (компьютер с процессором "Pentium 90") составили 11 с, что существенно меньше затрат, приводимых в литературе (например, [11] — 100 с на компьютере SUN SPARC Station).

Таким образом, изложенные алгоритмы вычисления поля скоростей не только имеют высокую разрешающую способность и хорошую точность, но и требуют для своей реализации существенно меньше вычислительных операций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1983.
2. Воскобойников Ю. Е., Преображенский Н. Г., Седельников А. И. Математическая обработка эксперимента в молекулярной газодинамике. Новосибирск: Наука, 1984.
3. Willert C. E., Gharib M. Digital particle image velocimetry // Experiments in Fluids. 1991. 10. P. 181.
4. Adrian R. J. Image shifting technique to resolve directional ambiguity in double-pulsed velocimetry // Appl. Opt. 1986. 25, N 21. P. 3855.
5. Даджион Д., Мерсеро Р. Цифровая обработка многомерных сигналов. М.: Мир, 1988.
6. Raffel M., Leiti B., Kompenhans J. Data validation for particle image velocimetry // Laser Techniques and Applications in Fluid Mechanics. Springer-Verlag, 1993.
7. Cenedse A., Paglialunda A. Digital direct analyses of a multiexposed photograph in PIV // Experiments in Fluids. 1990. 8. P. 273.
8. Воскобойников Ю. Е. Частотный подход к оценке точности сглаживания и дифференцирования экспериментальных данных на основе сглаживающих сплайнов // Автометрия. 1986. № 1.
9. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений /Под ред. Т. С. Хуанга. М.: Радио и связь, 1984.
10. Бронников А. В., Воскобойников Ю. Е. Комбинированные алгоритмы нелинейной фильтрации зашумленных сигналов и изображений // Автометрия. 1990. № 1.
11. Hind A. K., Christy J. R. E. Digital PIV applied to flows around artificial heart valves: analyses by autocorrelation // Laser Techniques and Applications in Fluid Mechanics. Springer-Verlag, 1993.

Поступила в редакцию 26 марта 1996 г.