

УДК 004.932.2: 533.6.08

Д.В. Ильин, О.А. Евтихиева

Национальный Исследовательский Университет «МЭИ», Россия,  
111250, Москва, Красноказарменная ул., 17, E-mail: berserker1@mail.ru

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

### АННОТАЦИЯ

В данной статье рассматривается влияние турбулентности, смоделированной на изображении, на оптические методы обработки изображений. Создается пара изображений, состоящая из исходного изображения и такого же изображения, смещенного относительно исходного, проводится моделирование турбулентности на изображении со смещением. Проводится обработка данной пары изображений кросскорреляционным методом при различных коэффициентах турбулентности. Была получена зависимость значения смещения и, соответственно, погрешности результатов от значения коэффициента турбулентности.

Evaluation of simulated turbulence model

МОДЕЛИРОВАНИЕ, ТУРБУЛЕНТНОСТЬ, ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, КРОСС-КОРРЕЛЯЦИЯ, PIV

### ВВЕДЕНИЕ

Движение жидкости или газа называется турбулентным, если в данном течении скорость изменяется беспорядочным образом. Для такого движения характерны беспорядочные неустановившиеся перемещения жидкости или газа, которые накладываются на основной поток среды. Коэффициент турбулентности  $k$  характеризует турбулентные свойства атмосферы, при которых производилась регистрация изображения.

Анемометрия по изображениям частиц (АИЧ, Particle Image Velocimetry – PIV) была впервые предложена в 1984 году для векторного представления поля скорости. Исследование потоков с помощью АИЧ осуществляется путем записи двух соседних изображений потока с последующей обработкой этих изображений, что позволяет получить информацию о скорости потока.

Основа метода состоит в записи двух положений частиц, движущихся вместе с потоком в два момента времени с задержкой между ними, и последующем анализе их смещения в результате обработки полученных изображений. Благодаря этому становится возможным определить распределение скорости для заданного момента времени, которое может быть получено из анализа смещения частиц. Для визуализации движения всего потока строят векторное поле. Изображение частиц записывается с помощью видеокамеры.

При обработке изображений применяется кросскорреляционный метод, позволяющий получить мгновенное поле скорости потока в измерительной области. Для этого все изображение разбивается на элементарные ячейки (области опроса), идущие с некоторым шагом друг относительно друга. Для стандартного алгоритма размер областей опроса и шаг сетки разбиения в процессе вычисления всего поля скорости остается постоянным. Затем необходимо выяснить, имеется ли в области опроса хотя бы одна пара частиц, и если

имеется, то в этом случае можно определить их смещения. По такому алгоритму может быть получено векторное поле скоростей частиц в потоке.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ

В качестве тестового изображения, на котором будет проводиться моделирование турбулентности, был выбран фоновый экран, состоящий из произвольно расположенных черных точек на белом фоне.

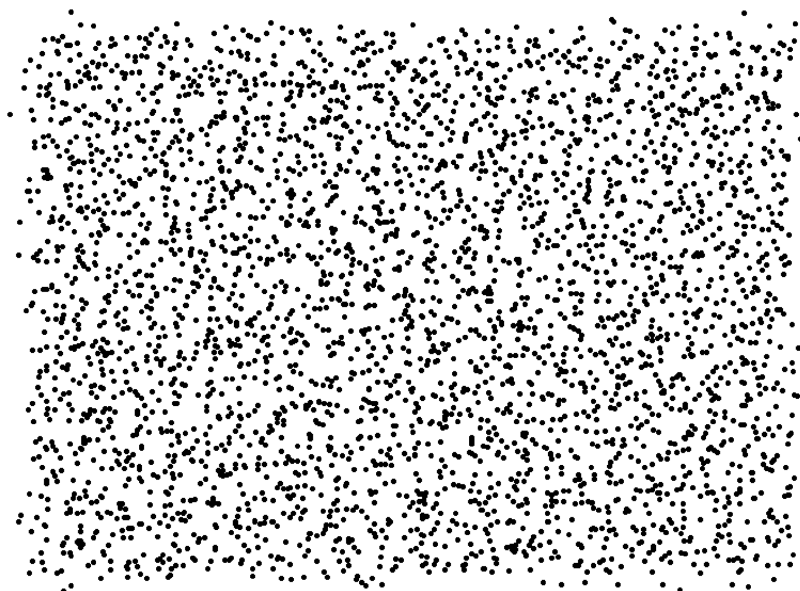


Рис. 1. Используемый фоновый экран

Для дальнейшей обработки берётся пара изображений фонового экрана; исходное неизменённое изображение и изображение, смещённое относительно исходного положения вправо на 7 пикселей.

Далее проводится моделирование турбулентности, наложенной на изображение со смещением, по следующему алгоритму:

1. Определяется спектр изображения путем применения преобразования Фурье.
2. На спектр изображения накладывается турбулентность согласно следующей модели:

$$N_{i,j} = M_{i,j} \cdot \exp \left\{ -k \cdot \left[ \left( i - \frac{a}{2} \right)^2 + \left( j - \frac{b}{2} \right)^2 \right]^{\frac{5}{6}} \right\}.$$

3. Выполнив обратное преобразование искаженного турбулентностью Фурье-спектра, может быть получено изображение с этой турбулентностью.

Меняя значения коэффициента турбулентности  $k$ , можно найти влияние турбулентности на точность обработки изображений. Начальное значение коэффициента турбулентности было выбрано равным  $k=0,0001$ . Изображение, на которое была наложена турбулентность, представлено на рис. 2, а векторное поле, полученное в результате обработки данного изображения с турбулентностью и исходного фонового экрана

, – на рис.3. В результате обработки было получено практическое значение смещения, которое при данном коэффициенте турбулентности практически совпадает с теоретическим смещением, которое было внесено.

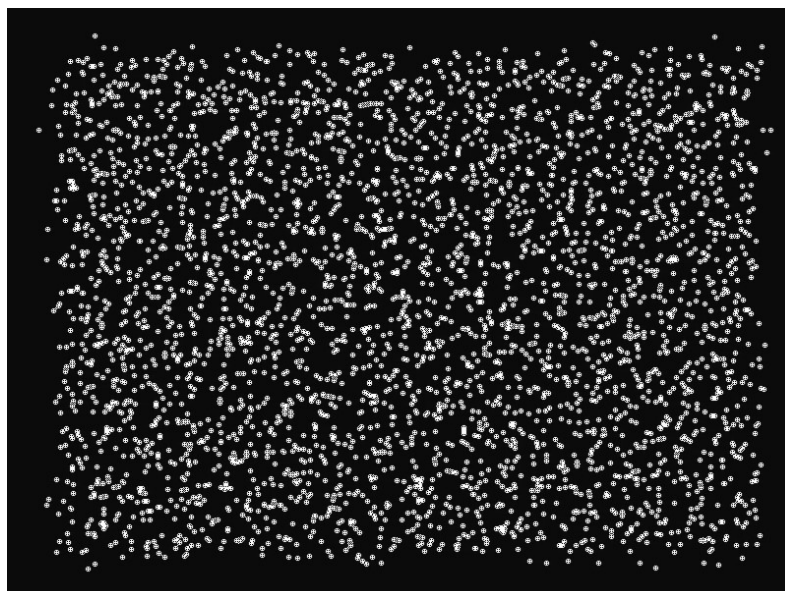


Рис. 2. Пример изображения с наложенной турбулентностью ( $k=0,0001$ )

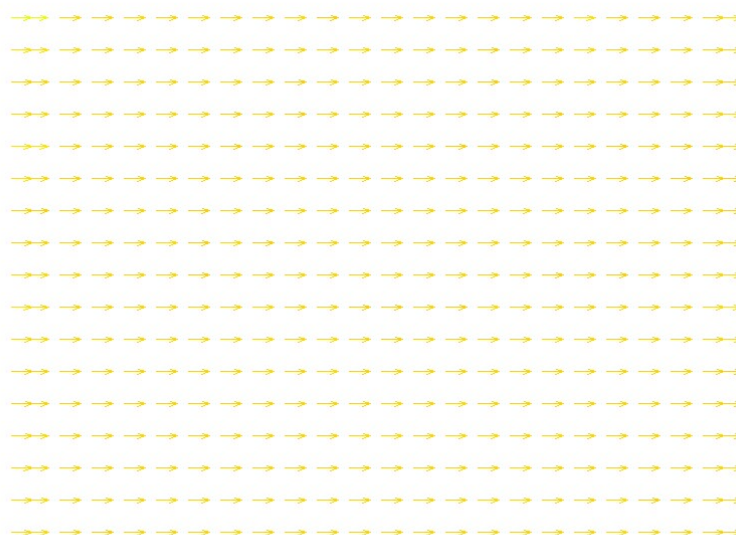


Рис. 3. Векторное поле при  $k=0,0001$

Аналогичным образом по мере постепенного увеличения коэффициента турбулентности были получены векторные поля и практические значения смещения для каждого значения коэффициента турбулентности. Далее на рис. 4-6 приведены изображения некоторых из них.



Рис. 4. Векторное поле при  $k=0,001$

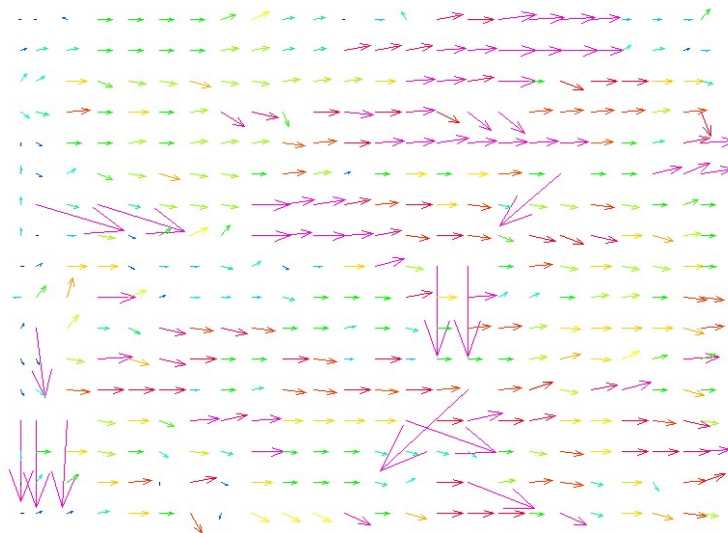


Рис. 5. Векторное поле при  $k=0,005$

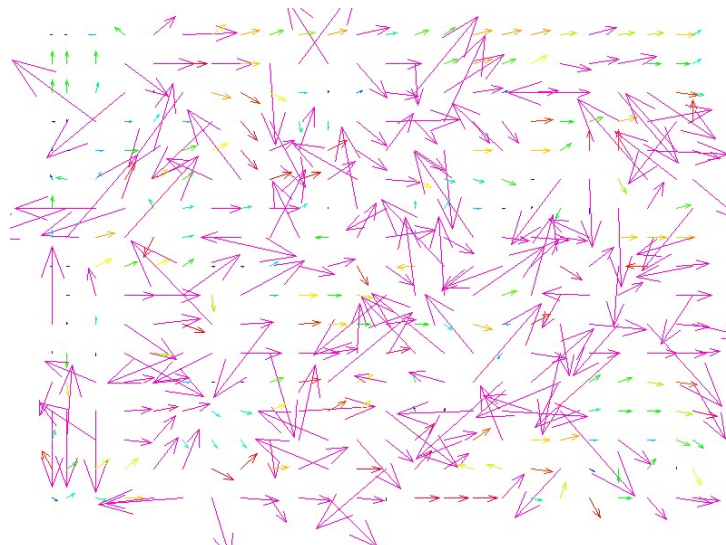


Рис. 6. Векторное поле при  $k=0,01$

Как видно из представленных выше рисунков, при увеличении коэффициента турбулентности, моделируемой на одном из изображений, в векторном поле появляются ошибочные векторы, что приводит к уменьшению точности результатов обработки изображений.

В результате были получены практические значения смещения, соответствующие различным значениям коэффициента турбулентности. Затем, используя полученные данные, была найдена величина погрешности  $\delta$ , возникающей из-за наличия турбулентности, по формуле:

$$\delta = \frac{\Delta_m - \Delta_{np}}{\Delta_m} \cdot 100\%$$

Таким образом, была получена зависимость погрешности при определении величины смещения изображения. Графическое представление данной зависимости представлено на рис. 7.

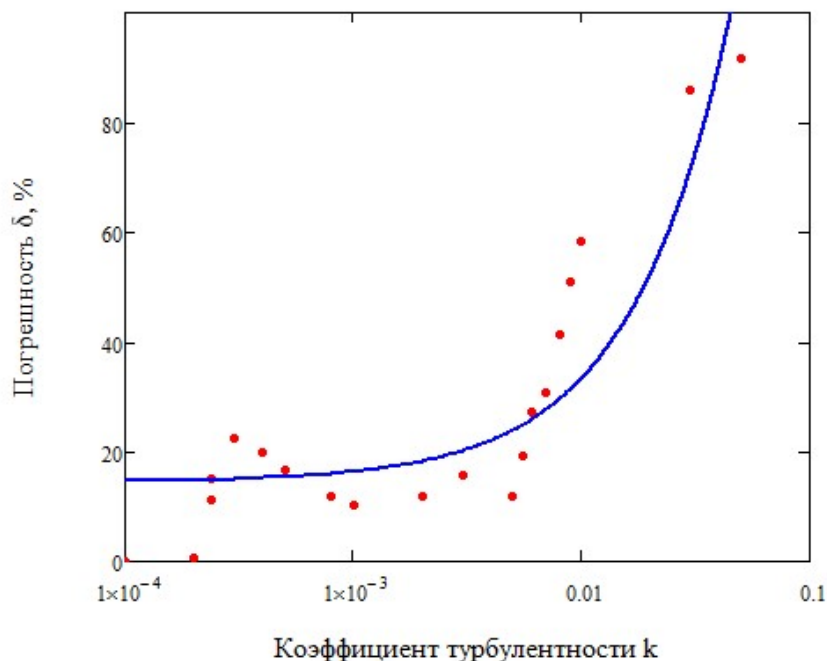


Рис. 7. Зависимость погрешности от величины коэффициента турбулентности

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы, заключавшейся в моделировании турбулентности для наложения на изображение и последующей обработке пар изображений с турбулентностью и без нее, была получена зависимость погрешности, возникающей вследствие наличия турбулентности, от величины коэффициента турбулентности, который характеризует условия при регистрации изображения. Таким образом, полученная зависимость демонстрирует, что точность результатов обработки изображений кросскорреляционным методом снижается при увеличении различия в условиях, при которых были получены используемые изображения. Это означает, что турбулентность накладывает определенные ограничения на возможность применения оптических методов, в частности PIV, поскольку для достижения необходимой точности изображения должны быть получены при достаточно близких условиях.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$M$  – матрица спектра изображения;  
 $N$  – матрица спектра изображения с наложенной турбулентностью;  
 $k$  – коэффициент турбулентности;  
 $a$  и  $b$  – размеры матрицы спектра;  
 $\Delta$  – величина смещения.  
Индексы:  
т – теоретический;  
пр – практический.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вараксин А.Ю.**, Турбулентные течения газа с твердыми частицами. – М.: ФИЗМАЛИТ, 2003. – 192 с.
2. **Информационная оптика**: Учебное пособие / Н.Н. Евтихийев, О.А. Евтихьева, И.Н. Компанец и др.; Под ред. Н.Н. Евтихьева. – М.: Издательство МЭИ, 2000. – 612 с.
3. **Фрик П. Г.**, Турбулентность: подходы и модели // Изд. 2-е, испр. и доп. – М. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010. – 332 с.
4. **Гонсалес Р., Вудс Р.**, Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.

D.V. Ilin, O.A. Evtikhieva

*National Research Univesity “MPEI”, Russia,  
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 17, E-mail: berserker1@mail.ru*

## SIMULATION OF THE TURBULENCE INFLUENCE ON OPTICAL METHODS

*The present article considers the simulated on the image turbulence influence on optical methods of image processing. The pair of images consisting of original image and the same one with displacement was created, turbulence was modeled on the image with displacement. This pair of images was processed by the crosscorrelation method for different values of turbulence coefficient. This made it possible to obtain the dependence of processing results error on turbulence coefficient value.*

MODELING, TURBULENCE, OPTICAL METHODS, CROSSCORRELATION, PIV