

УДК 004.932.2

А.С. Кузменков

*Московский энергетический институт (технический университет), Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: kuzmenkovas89@gmail.com*

БЕСПОИСКОВЫЙ ОРТОКОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ ОЦЕНКИ СДВИГА ИЗОБРАЖЕНИЙ ЛАЗЕРНОЙ РЕФРАКТОГРАФИИ

Представлены результаты работы по созданию и анализу цифровых алгоритмов обработки изображений. Они соответствуют тематике предыдущих разработок и исследований, приведенных в [1], [2]. С учетом высоких требования к скорости и точности обработки картин визуализации внимание уделяется быстрым алгоритмам, удовлетворяющим одновременно этим двум критериям. В работе рассмотрены результаты обработки компьютерных моделей и экспериментальных изображений одним из таких алгоритмов. Приводятся характеристики алгоритма, полученные при оценивании сдвигов смоделированных изображений. Обсуждаются преимущества и недостатки указанного метода при работе с экспериментальными изображениями.

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ СДВИГОВ, БЕСПОИСКОВЫЙ ОРТОКОРРЕЛЯЦИОННЫЙ ДИСКРИМИНАТОР, ОРТОГОНАЛЬНЫЕ БАЗИСНЫЕ ФУНКЦИИ, КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПОГРЕШНОСТИ ОЦЕНКИ СДВИГА, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

ВВЕДЕНИЕ

Быстрые алгоритмы оценки сдвига изображений используются в составе систем и автоматов различного назначения: оптико-электронных следящих систем, программного обеспечения метрологического оборудования. Следящие системы нашли применение в навигации беспилотных летательных аппаратов, астроориентации, обеспечении вхождения в связь по оптическим каналам в космосе [3] и т.п. Одним из перспективных для разработчика алгоритмов оценки сдвигов является ортокорреляционный метод [4], [5], относящийся к методам беспойскового оценивания (МБО).

БЕСПОИСКОВЫЙ ОРТОКОРРЕЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ

Преимущества беспойскового оценивания

Базовым блоком разработанной программы считается беспойсковый корреляционный дискриминатор (КД), в котором исключаются недостатки поисковых КД и снижаются требования к мощности вычислительных устройств. Основным недостатком методов поискового оценивания (МПО) является большой объем вычислений, растущий пропорционально величине диапазона измерения сдвигов и точности измерения, и экспоненциально увеличивающийся при увеличении размерности измеряемого обобщенного сдвига. При пошаговом поиске существует также риск пропустить истинный максимум корреляционной функции, если он окажется слишком узким и попадет в промежуток между шагами. Кроме этого, такой метод будет чувствителен к посторонним сдвигам, не участвующим в измерении. Работа беспойсковых КД основана на вычислении взаимно-корреляционной функции (ВКФ) изображений подвергнутых ортогональной фильтрации. В результате, максимум ВКФ превращается в точку перехода функции через ноль, и

измеряемый сдвиг будет пропорционален значению ВКФ в некоторой окрестности этой точки. Выбором подходящих операторов фильтрации изображений можно обеспечить необходимый диапазон измерений сдвига, а также некоторую инвариантность к посторонним сдвигам. Преимуществами МБО являются: высокое быстродействие (объем вычислений пропорционален только размерности сдвига) и высокая точность измерения сдвига, не зависящая от дискретности шагов сдвига или размера пикселей изображения. К недостаткам можно отнести то, что без применения специально подобранных базисных функций (БФ), диапазон измерения сдвигов будет существенно ограничен. Кроме того, и диапазон, и точность измерения сдвигов, будут варьироваться в зависимости от структуры изображения. По предварительной оценке алгоритм ортокорреляционного метода может обеспечивать получение результатов в масштабе реального времени и будет относиться к категории быстрых алгоритмов.

Структура программной реализации метода

Для оценивания сдвигов элементов картин визуализации потоков была разработана программа оптико-электронной следящей системы (ОЭСС), используемая для слежения за аддитивным одномерным вектором сдвига элемента. Программа включает в себя модули, работающие аналогично следующим устройствам:

- Одномерный ортокорреляционный дискриминатор, исполняющий роль измерительного звена системы авторегулирования. На его вход поступают исходное и текущее изображение. Мерой рассогласования служит одномерный сдвиг между этими входными сигналами.

- Запоминающее устройство (ЗУ) для хранения исходного изображения. В процессе оценивания возможна перезапись эталонного изображения (или его фрагмента) в ЗУ, которая производится после сдвига окна обработки.

- Блоки обратных связей и органы управления. Первые формируют управляющие воздействия, которые затем подаются на органы управления и исполнительные устройства. Органы управления под влиянием поступающих на них воздействий изменяют текущее положение окна обработки сигналов. Этим модулем реализуется возможность итерационного оценивания сдвигов элементов изображений.

Использование базисных функций, алгоритм КД

В алгоритме для фильтрации использованы БФ в виде отрезков гармонических функций, вмещающих целое число m периодов:

$$C_m(z) = \cos \omega_m z = \cos \frac{2\pi m z}{M}, \quad (1)$$

$$S_m(z) = \sin \omega_m z = \sin \frac{2\pi m z}{M}, \quad (2)$$

где M – длина обрабатываемой строки (столбца) изображения, $z \in [-M/2, M/2]$, $\omega_m = \frac{2\pi m}{M}$ – пространственная циклическая частота.

В базисе, состоящем из двух взаимно-ортогональных финитных функций, любой сигнал f представим радиус-вектором (a, b) :

$$\bar{x} = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (f, C_m) \\ (f, S_m) \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Оценка сдвига находится как решение обратной корреляционной задачи:

$$\tilde{\tau} = \frac{M}{2\pi m} \operatorname{arctg} \frac{a(0)b(\tau) - b(0)a(\tau)}{a(0)a(\tau) + b(0)b(\tau)}, \quad (4)$$

где $a(0)$, $b(0)$ – коэффициенты разложения исходного сигнала; $a(\tau)$, $b(\tau)$ – коэффициенты разложения смещенного сигнала.

При произвольных взаимно-ортогональных БФ выражение (4) справедливо лишь в области малых сдвигов, точность приближения падает с удалением от нуля.

Аргументом нелинейной функции в правой части (4) служит коэффициент ортокорреляции текущего и эталонного сигналов. Нормирующий знаменатель $(a(0)a(\tau) + b(0)b(\tau))$ выражает их взаимную энергию, множитель $M/2\pi m$ приводит оценку сдвига к долям от размера рабочего поля обработки. Арктангенс обусловлен выбором БФ и линеаризует связь между сдвигом и его оценкой в диапазоне $[-M/2, M/2]$.

В программном модуле КД были реализованы следующие типы БФ:

1. Отрезки гармонических функций, ограниченные рабочим полем, в дальнейшем обозначаемые как «Синус».

$$C_m(z) = \cos \omega_m z \cdot h(z) = \cos \frac{2\pi m z}{M} \cdot h(z), \quad (5)$$

$$S_m(z) = \sin \omega_m z \cdot h(z) = \sin \frac{2\pi m z}{M} \cdot h(z), \quad (6)$$

$$h(z) = \begin{cases} 1, & z \in [z_1, z_2] \\ 0, & z \notin [z_1, z_2] \end{cases}, \quad (7)$$

2. Функции Габора (далее «Габор»). Эти функции широко используются в вейвлет-анализе в качестве обобщенных базисов для разложения сигналов. Они представляют собой гармонические функции, модулированные гауссовой огибающей.

$$S_m(z) = \sin\left(\frac{2\pi m z}{M}\right) e^{-\frac{(z-z_0)^2}{2\sigma^2}} \cdot h(z), \quad (8)$$

$$C_m(z) = \cos\left(\frac{2\pi m z}{M}\right) e^{-\frac{(z-z_0)^2}{2\sigma^2}} \cdot h(z), \quad (9)$$

3. Линейная комбинация гармонических функций с заданными коэффициентами.

$$S_m(z) = \left(\sin\left(\frac{2\pi(m-0.5)z}{M}\right) - \sin\left(\frac{2\pi(m+0.5)z}{M}\right) \right) \cdot h(z), \quad (10)$$

$$C_m(z) = \left(\cos\left(\frac{2\pi(m-0.5)z}{M}\right) - \cos\left(\frac{2\pi(m+0.5)z}{M}\right) \right) \cdot h(z), \quad (11)$$

далее обозначаемые как «Синус 2 гармоники».

Сигналы, передаваемые на вход одномерного КД, задавались простейшей моделью изображения в виде поперечного сечения астигматического лазерного пучка гауссовой формы. Сигнал приведен на рис. 1.

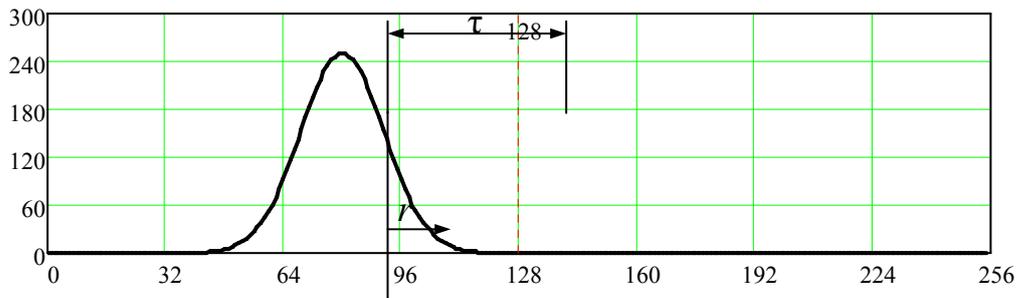


Рис. 1. Вид входного сигнала. Параметры моделирования: τ – рассогласование центра частицы и центра окна обработки, r – эффективный радиус частицы, $2 \cdot r = L$

По результатам тестирования программы КД на смоделированных сигналах построено семейство дискриминационных характеристик (ДХ), которое представлено на рис. 2.

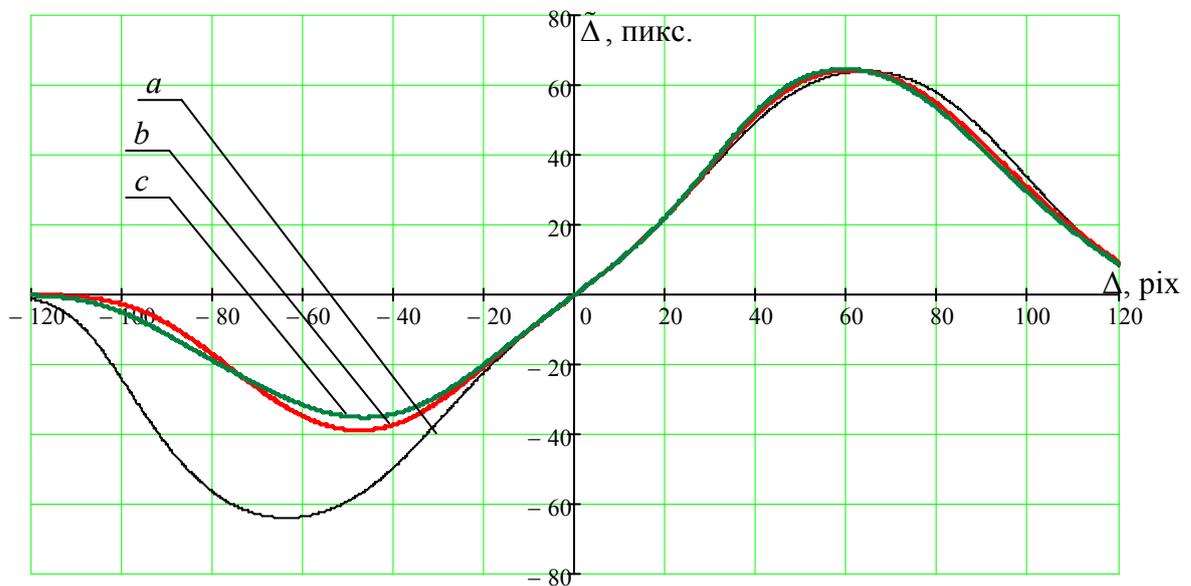


Рис. 2. Семейство дискриминационных характеристик. a – БФ «Синус», b – БФ «Синус 2 гармоники», c – БФ «Габор». Параметры моделирования: $\tau = -32$ пикс., $r = 32$ пикс.

Моделирование тестовых изображений

Поскольку исследовалась работа алгоритма с одномерными сигналами, была смоделирована простая структура изображения. Базовой частью картины была дуга, пиковая интенсивность которой описывается функцией косинус с регулируемыми параметрами. Профиль поперечного сечения был задан гауссовой функцией с постоянной шириной. Это обусловлено тем, что во всех используемых БФ была задана постоянная частота $\omega_1 = 2\pi/256$. Примеры тестовых картин представлены на рис. 3. Сдвиг дуги по вертикали формировался изменением амплитуды косинусоиды.

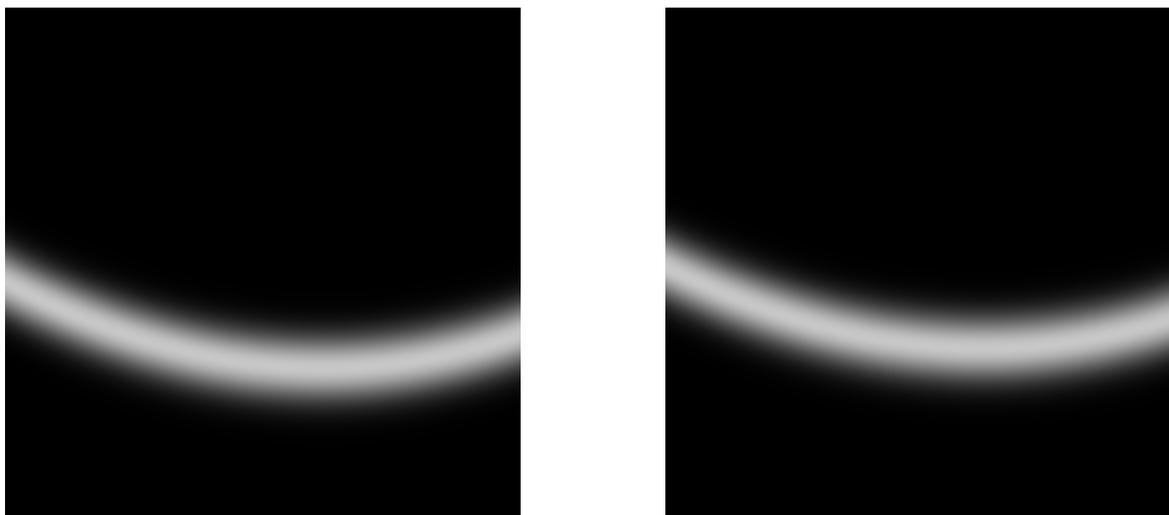


Рис. 3. Типовые смоделированные изображения

При реализации программы моделирования была предусмотрена возможность добавления шумовой составляющей с заданными параметрами. В дальнейшем функция использовалась для формирования тестов, выявляющих характеристики алгоритма при разном отношении сигнал-шум.

Анализ характеристик метода

Контрольным параметром оценки качества работы метода была установлена относительная погрешность измерения сдвига. Нормировка проводилась по величине сдвигов столбцов изображения, известной из процесса моделирования картин. Для исследования использовались БФ «Синус», поскольку они обеспечивали самую широкую рабочую область ДХ. Была реализована возможность добавления шума, с распределением амплитуды по равномерному закону. Отношение сигнал-шум оценивалось как отношение пиковой интенсивности профиля распределения интенсивности к максимальному значению уровня шума.

Для тестирования алгоритма формировались изображения описанного выше типа.

Использовались диапазоны параметров:

- 1) сдвиг профиля дуги от 2 до 50 пикс.;
- 2) отношение сигнал-шум от 50 до 12 дБ.

В процессе тестирования алгоритма фиксировались значения относительной погрешности при однократном измерении, при двух и трех уточняющих итерациях.

Семейство зависимостей относительной погрешности показано на рис. 4.

Как показывают исследования, беспоисковый ортокорреляционный метод при трех итерациях дает практически независимую от величины сдвига (в пределах зоны монотонности ДХ) погрешность оценивания. При отсутствии шума эта величина составляет 5%. С уменьшением отношения сигнал-шум погрешность в интервале типовых сдвигов вырастает, но остается постоянной на интервале задаваемых сдвигов. Однократное и двукратное оценивание происходит с относительной погрешностью, зависящей от величины сдвига. Относительно невысокие уровни шума (сигнал-шум 20 дБ) при таком оценивании существенных изменений точности не вносят.

Как показали исследования смоделированных картин, только при использовании нескольких итераций беспоисковый итерационный метод позволяет получить сравнительно небольшие, около 5 – 10 %, значения относительной погрешности. В абсолютных значениях это составляет 0,5 – 3 пикселя. Вместе с этим, алгоритм обладает хорошей устойчивостью к шумовой составляющей и сохраняет работоспособность с удовлетворительными потерями точности в случаях небольшого отношения сигнал-шум (18 – 20 дБ).

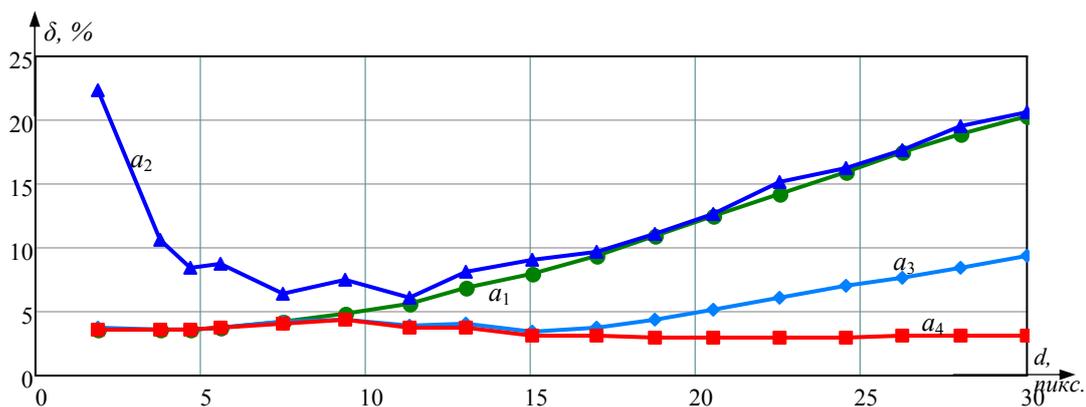


Рис. 4. График зависимости среднего значения относительной погрешности оценки сдвига профиля распределения столбца изображения от величины поперечного сдвига. a_1 – шума нет, a_2 – отношение сигнал/шум 20 дБ, использовалась 1 итерация оценивания; a_3 – шума нет, использовались 2 итерации; a_4 шума нет, использовались 3 итерации

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для проверки работоспособности метода в реальных условиях были использованы результаты экспериментов, полученные на кафедре физики имени В.А.Фабриканта с использованием метода лазерной рефрактографии [6]. Для обработки были взяты картины визуализации теплофизических процессов, происходящих при естественной конвекции в пограничном слое прозрачной жидкости вокруг нагретого тела со сферической формой поверхности. Картины визуализации были получены в [6] путем регистрации изображения астигматического лазерного пучка, прошедшего исследуемый пограничный слой. Схема эксперимента приведена на рис. 5 [6]. Для тестирования работы алгоритма использовались изображения, получаемые с цифровой видеокамеры 9.

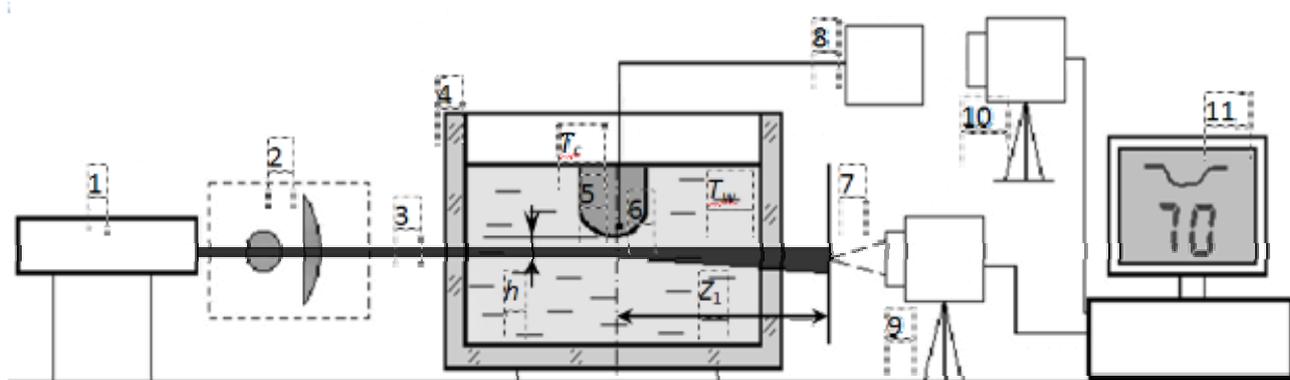


Рис. 5. Схема экспериментальная установка. 1 – лазерный источник излучения, 2 – блок формирования ЛП, 3 – ЛП, 4 – кювета с водой, 5 – нагретый цилиндр, 6 – термопара, 7 – экран, 8 – милливольтметр, 9, 10 – цифровые видеокамеры, 11 – персональный компьютер [6]

Пример тестовых изображений и соответствующее им усредненное распределение оценок сдвигов представлено на рис. 6.

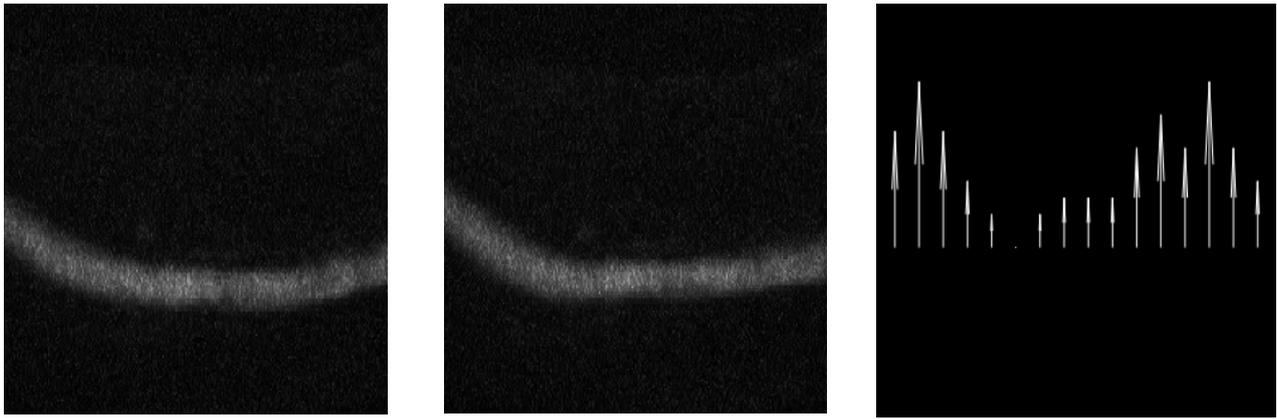


Рис. 6. Пример фрагментов картин визуализации и усредненные оценки сдвигов

По данному результату и аналогичным оценкам получены выводы о работе алгоритма с экспериментальными изображениями указанного вида. При разных вариантах экспериментальных изображений алгоритм формировал нормальные, достоверные оценки.

Таким образом, был проведен анализ работы метода с экспериментальными изображениями. Для обработки картин лазерной рефрактографии с формированием детерминированной структуры лазерной плоскости этот метод, безусловно, будет рекомендуемым. Время обработки пары изображений 256×256 пикс. в *Mathcad* составляет несколько сотен миллисекунд. Программная реализация алгоритма на языке высокого уровня увеличивает скорость работы как минимум в пять раз. Слабая чувствительность работы метода к шумам является вторым положительным свойством.

Существенным недостатком метода является слабая универсальность к виду обрабатываемых картин визуализации. Труднореализуема обработка изображений мелкой структуры, содержащих бесформенные и случайные элементы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе реализована программа одномерного беспоищенного ортокорреляционного метода измерения оценок сдвигов распределения интенсивности столбцов изображений. Получены одномерные распределения оценок сдвигов для смоделированных и экспериментальных картин визуализации процесса естественной конвекции в пограничном слое. Во всех случаях обработки подтверждается получение стабильных оценок сдвигов.

Предельная точность оценивания для исследованных типов картин реализуется в диапазоне небольших и средних сдвигов (участок монотонности ДХ) и составляет около 5–10 % при 2–3 итерациях оценивания (0,5–3 пикселя в абсолютном выражении).

Погрешность оценивания начинает резко зависеть от параметров аддитивного шума при уменьшении отношения сигнал-шум до 15–17 дБ.

Достаточно малое время обработки картин имеет место благодаря простоте и идейной компактности алгоритма. Максимальная производительность метода достигается с привлечением языка высокого уровня, с реализацией устранением избыточности вычислений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает глубокую признательность сотрудникам кафедры Физики имени В.А. Фабриканта за любезно предоставленные экспериментальные материалы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

МБО – метод беспоищенного оценивания
 КД – корреляционный дискриминатор
 МПО – метод поискового оценивания

ВКФ – взаимно-корреляционная функция
ОЭСС – оптико-электронная следящая система
ЗУ – запоминающее устройство
БФ – базисные функции
ДХ – дискриминационная характеристика

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кузменков А.С.** Алгоритм оценки векторного поля сдвигов картин визуализации потоков. // Оптические методы исследования потоков: Тез.докл. 10-й Межд. конф. М.: МЭИ, 2009. С. 552.
2. **Кузменков А.С.** Разработка и анализ алгоритма оценки векторного поля сдвигов элементов картин визуализации потоков. / Выпускная квалификационная работа на степень бакалавра техн. и технолог. – М.: МЭИ (ГУ), 2010.
3. **Астапов Ю.М., Васильев Д.В., Заложнев Ю.И.** Теория оптико-электронных следящих систем. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988.
4. **Фирсов Е.А.** Развитие и применение корреляционных методов обработки изображений в быстродействующих оптико-электронных следящих системах. / Диссертация канд. техн. наук. – М.: МФТИ (ГУ), 2007.
5. **Гапон А.В.** Теория и применение инвариантных ортокорреляционных алгоритмов автозахвата направления по изображению в оптико-электронных следящих системах / Диссертация канд. техн. наук. – М.: МФТИ (ГУ), 2009.
6. **Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С.** Лазерная рефрактография. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 176 с.

A.S. Kuzmenkov

*Moscow Power Engineering Institute (Technical University), Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: kuzmenkovas89@gmail.com*

NONSEARCHING ORTHOCORRELATED ALGORITHM FOR ESTIMATION OF SHIFTS OF LASER REFRACTOGRAPHY IMAGES

Results of operation on creation and the analysis of digital algorithms of image processing are presented in the report. They conform to subject area of the previous developments and researches according to [1], [2]. Subject to high speed and accuracy requirements for images of visualization processing the attention is given to the fast algorithms satisfying simultaneously to these two criterions. Results of processing of computer modelling and the experimental images are considered by one of such algorithms in work. The characteristics of the algorithm received at estimation of shifts of simulated images are resulted. Advantages and limitation of the specified method at operation with the experimental images are considered.

ALGORITHM FOR ESTIMATION OF SHIFTS, NONSEARCHING ORTHOCORRELATED DISCRIMINATOR, ORTHOGONAL BASIS FUNCTIONS, COMPUTER MODELLING, ERRORS OF THE ESTIMATION OF SHIFTS, EXPERIMENTAL IMAGES