

РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

Тензорный анализ динамики рефракционных искажений зондирующего оптического пучкаТ. И. Арсеньян¹, А. Л. Афанасьев^{2,a}, В. А. Банах², М. В. Писклин^{1,b},
А. П. Ростов², Н. А. Сухарева^{1,c}¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра фотоники и физики микроволн. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.²Институт оптики атмосферы имени В. Е. Зуева СО РАН, лаборатория распространения волн. Россия, 634021, Томск, пл. Академика Зуева, д. 1.E-mail: ^aafanasiev@iao.ru, ^bmaxim.pisklin@physics.msu.ru, ^csuhareva@phys.msu.ru

Статья поступила 25.07.2015, подписана в печать 03.09.2015.

Представлены возможности метода анализа динамических характеристик профиля интенсивности зондирующего пучка на выходе атмосферной трассы на основе тензора структуры хронограмм. Исследована пространственно-временная структура поля скоростей рефракционных искажений, определены характерные размеры областей трансляционного и ротационного типов движений потоков. Получены профили для локальных проекций скоростей, статистические свойства проекций в режимах малой вариации метеопараметров в интервале регистрации выходного потока. На основе сравнения характерных значений скорости ветра, регистрируемой линейкой анемометров и разработанным методом, предложен способ грубой оценки баланса трансляционных и флуктуационных компонент присутствующих на трассе аэродинамических потоков.

Ключевые слова: открытый оптический канал, скорость ветра, турбулентность, микротечения, тензор структуры изображения, хронограмма.

УДК: 537.876.23, 537.877, 550.338.2, 551.510.535, 621.3.09. PACS: 42.25.Dd, 42.68.Bz, 92.60.Gn, 92.60.hk.

Введение

Помехоустойчивое пространственное кодирование сигнальных оптических пучков и развитие методов оптического зондирования протяженных трасс требуют исследования детальной динамики вариации профиля оптического пучка с временным разрешением, сравнимым с длительностью отдельной фазы пакетной передачи данных [1–4]. Основное внимание в описании подобных вариаций должно быть уделено короткоживущим в десятки миллисекунд квазирегулярным модуляциям профиля пучка, связанным с разнообразными аэродинамическими структурами пересекающих трассу течений. Каждую из подобных структур можно характеризовать позиционным параметром (область зарождения), двумя статистическими (вероятность зарождения и время жизни) и двумя векторными динамическими (поток момента импульса и поток импульса).

Экспериментальный анализ пространственно-временных микроструктур потоков рефракционными методами хорошо развит в гидродинамике, для аэродинамических приложений и протяженных трасс его арсенал существенно беднее [5, 6]. Общий профиль распределения интенсивности в сечении как зондирующего, так и сигнального лазерных пучков на выходе трассы можно характеризовать как совокупность каустических кластеров, динамика которых связана с параметрами аэродинамических течений,

а пространственная структура должна анализироваться на основе моделей топологической статистики [7]. Именно такой профиль может стать базой извлечения параметров аэродинамических рефракционных искажений.

Общим свойством большинства наблюдаемых типов «движения» профиля можно считать дрейф пространственного распределения уровня засветки в плоскости регистрации пучка на выходе трассы. Определение скорости дрейфа регистрируемого изображения также представляет значительный интерес с точки зрения оптических методов измерения динамических параметров турбулентных потоков, в том числе скорости ветра в атмосфере [8–10]. Информативной характеристикой в этих методах являются амплитудно-фазовые искажения параметров зондирующего излучения, обусловленные пространственно-временными турбулентными флуктуациями показателя преломления среды распространения [11]. При реализации методов просвечивания с применением когерентного лазерного излучения анализируются временные флуктуации сигналов и делаются оценки их «перемещений» под воздействием ветрового переноса [12].

В настоящей работе предлагаются новые подходы к анализу динамики рефракционных искажений зондирующего оптического пучка на основе тензора структуры хронограмм и приводятся результа-

ты анализа экспериментальных выборок, полученных на оснащённом комплексе метеооборудования полигоне.

1. Синтез проекционных хронограмм

Изображения лазерного пучка, искаженного турбулентными неоднородностями показателя преломления воздуха, регистрировались после прохождения атмосферной трассы длиной 100 м в приземном слое над ровной подстилающей поверхностью [12]. Для визуализации изображения пучка использовался экран, установленный в конце трассы. Временные реализации распределений интенсивности лазерного излучения на экране регистрировались высокоскоростной цифровой видеокамерой NAC Hot Shot 512С. Технические возможности данной камеры позволяют осуществлять видеозапись с частотой кадров до 4 кГц с размерами кадров 512×512 пикселей и до 200 кГц при уменьшении размеров кадра. В качестве оптического источника был использован твердотельный импульсный лазер с диодной накачкой LCS-DTL 314QT с длиной волны 532 нм и средней мощностью 30 мВт. Диаметр пучка на выходе лазера составлял 0.4 мм, угловая расходимость 1.2 мрад. Частота следования импульсов лазера и частота кадров видеозаписи были синхронизированы.

Запись скоростных видеоизображений осуществлялась в оперативную память видеокамеры объемом 2 ГБ. После заполнения оперативной памяти информация с видеокамеры переписывалась в виде бинарных файлов на жесткий диск компьютера, в связи с этим видеозапись пучка проводилась циклически. При частоте регистрации 4 кГц и размере кадра 512×512 пикселей длительность

непрерывного цикла записи составляет 8147 кадров или порядка 2 с. С целью охвата большего временного интервала каждый цикл мог быть разбит на 8 сегментов (соответственно возможности сегментации памяти камеры) по 1018 кадров, которые могли последовательно заполняться с произвольно задаваемой временной задержкой. В данном случае интервал между сегментами был выбран 50 с, а весь цикл записи занимал около 6 мин. При повышении частоты регистрации до 10 кГц вертикальный размер кадра уменьшался до 200 строк и размер выборки составлял 2601 кадр. В результате были получены временные последовательности пространственных реализаций распределений интенсивности в изображениях лазерного пучка, искаженных оптической турбулентностью, на атмосферной трассе с частотой дискретизации порядка нескольких килогерц и экспозицией порядка сотен микросекунд.

Для получения независимых данных о скорости ветра и температуре при проведении атмосферных экспериментов на оптической трассе был размещен массив из десяти однокомпонентных ультразвуковых анемометров, объединенных в единую вычислительную сеть. Измерительная база анемометров ориентировалась перпендикулярно трассе для измерения поперечной компоненты скорости ветра. По сигналу начала сегмента видеозаписи происходил опрос всех анемометров и запись в файл мгновенных значений скорости и температуры воздуха. Схема эксперимента представлена на рис. 1, а. Наблюдаемая в плоскости регистрации «кинематика» уровня засветки может быть условно разделена на три типа: трансляционное движение по направлению аэродинамических течений, вращательное движение

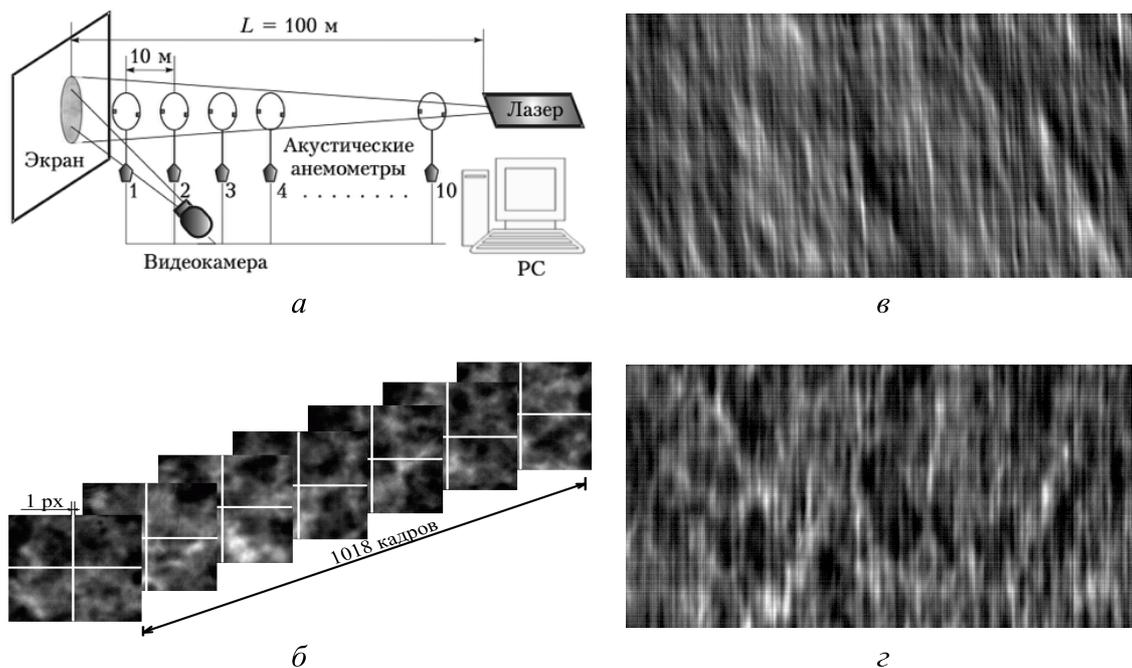


Рис. 1. Схема выполнения измерений (а), схема «сборки» ориентированных хронограмм из последовательности кадров (б): горизонтальная хронограмма (в), вертикальная хронограмма (г)

«конгломератов» и колебания кластерных структур в пространственном распределении интенсивности рефракционной картины.

Для визуализации и анализа движений используются формируемые на основе фрагментов кадров видеоряда изображения — проекционные хронограммы (горизонтальная и вертикальная). Хронограмма представляет собой синтезированное изображение, составленное из последовательности строк (горизонтальная хронограмма) или столбцов (вертикальная хронограмма). Схема синтеза хронограммы представлена на рис. 1, б–г. Хронограмму можно интерпретировать как временную развертку последовательности кадров (трассировку), наблюдаемую через цифровую щелевую апертуру шириной в один пиксель, и содержащую информацию о скорости перемещения неоднородностей уровня засветки, подобных совокупности аэродинамических течений. Цифровая щелевая апертура, как правило, проходила через центр кадра. Отметим, что визуализация движения возможна благодаря исходным или привнесенным пространственным неоднородностям распределения интенсивности пучка в плоскости регистрации.

2. Тензор динамической структуры

Синтезированные пространственно-временные отображения несут информацию о проекции траекторий элементов оптического потока, попадающих в щелевую апертуру на всем интервале времени наблюдения. Анализ полученного изображения, в зависимости от поставленной задачи, возможен различными методами — отображения на плоскость пространственных частот (2D-фурье-отображение), корреляционными, фазовыми, методами направленной фильтрации, дифференциальными, тензорными (на основе аналога тензора инерции для элементов видеоряда и тензора структуры для хронограмм) [13]. Нестационарность, неоднородность и статистическая неравновесность поля скоростей и температур требуют детального пространственно-временного исследования. Сформулированному правилу отбора соответствует метод тензора структуры, в равной мере позволяющий восстановить макро- и микросвойства течений для синтезированной хронограммы.

Определим локальный тензор динамической структуры распределения интенсивности хронограммы (далее — тензор структуры) следующим образом [14]:

$$\hat{J}(s, t) = \begin{bmatrix} J_{tt}(s, t) & J_{st}(s, t) \\ J_{ts}(s, t) & J_{ss}(s, t) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где t — время, s — одна из проецируемых координат (x, y).

Элементы тензора структуры, привязанные к точке хронограммы (s, t), получим в результате усреднения производных по соответствующим координа-

там в выбранном окне усреднения:

$$J_{tt}(s, t) = \sum_{\tau} \sum_{\xi} \omega(s-\xi, t-\tau) \left(\frac{\partial I(\xi, \tau)}{\partial \tau} \right)^2, \quad (2)$$

$$J_{ss}(s, t) = \sum_{\tau} \sum_{\xi} \omega(s-\xi, t-\tau) \left(\frac{\partial I(\xi, \tau)}{\partial \xi} \right)^2, \quad (3)$$

$$J_{ts}(s, t) = J_{st}(s, t) = \sum_{\tau} \sum_{\xi} \omega(s-\xi, t-\tau) \left(\frac{\partial I(\xi, \tau)}{\partial \xi} \right) \left(\frac{\partial I(\xi, \tau)}{\partial \tau} \right).$$

Здесь T — число кадров, использованных при синтезе хронограммы, N — число строк или столбцов (вертикальная или горизонтальная выборка) исходного изображения, $\omega(s, t)$ — нормированная весовая функция окна. Ниже при расчетах использован гауссовый профиль с варьируемой дисперсией по обоим направлениям. Диагональные и недиагональные элементы тензора структуры, созданные на основе частных производных, несут информацию о локальной динамике уровня засветки элементов изображения.

Каждый из полученного массива тензоров структуры может быть приведен к диагональному виду поворотом системы сопровождающих координат на соответствующий угол. Подобный угол и пара значений диагональных элементов также вводятся для каждого пикселя дискретного изображения. Значение необходимого угла поворота для локальной диагонализации тензора можно определить на основе уравнения

$$\begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{tt} & J_{st} \\ J_{ts} & J_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Из условия обнуления недиагональных элементов в результате двойного перемножения матриц в правой части соотношения (5) получим значение необходимого локального угла поворота или ориентации большей оси эллипсоида (далее — локального эллипсоида), геометрически отображающего локальный симметричный тензор структуры второго ранга:

$$(J_{ss}(s, t) - J_{tt}(s, t)) \sin 2\theta(s, t) + 2J_{st}(s, t) \cos 2\theta(s, t) = 0, \quad (6)$$

$$\theta(s, t) = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(\frac{2J_{st}(s, t)}{J_{tt}(s, t) - J_{ss}(s, t)} \right). \quad (7)$$

На рис. 2 представлены типичные «ориентационные карты», получаемые при обработке хронограмм. При построении карт ось времени выставлялась в горизонтальном направлении, нулевой отсчет угла ориентации совпадает с направлением оси времени, диапазон изменения $[-\pi/2, +\pi/2]$ соответствует главной области значений аргумента функции arctg . Структура поля ориентаций локальных эллипсоидов может быть описана в терминах ориентированных доменов, горизонтальные размеры которых соответствуют времени жизни парциальных аэродинамиче-

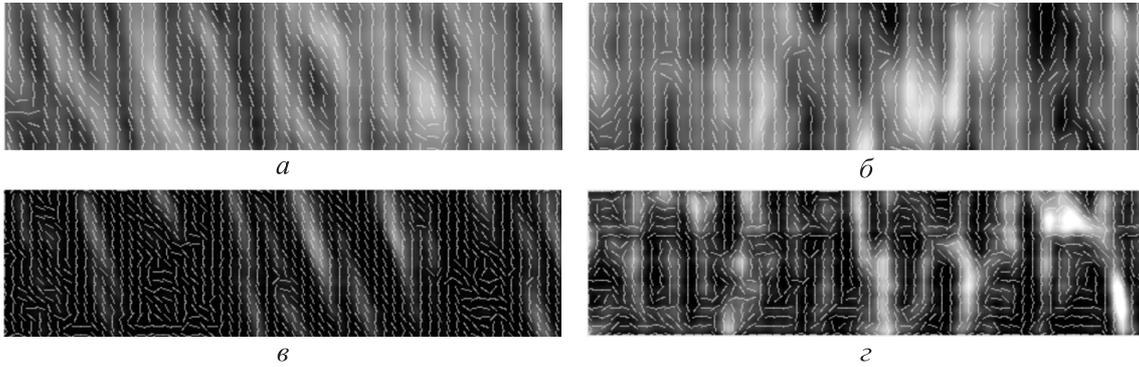


Рис. 2. Поле ориентаций для фрагментов хронограмм, полученных с различными частотами регистрации: *а* — горизонтальная и *б* — вертикальная 4 кГц; *в* — горизонтальная и *г* — вертикальная 10 кГц. Длительность всех представленных выборок 100 мс, размер пространственной отсечки 7 см

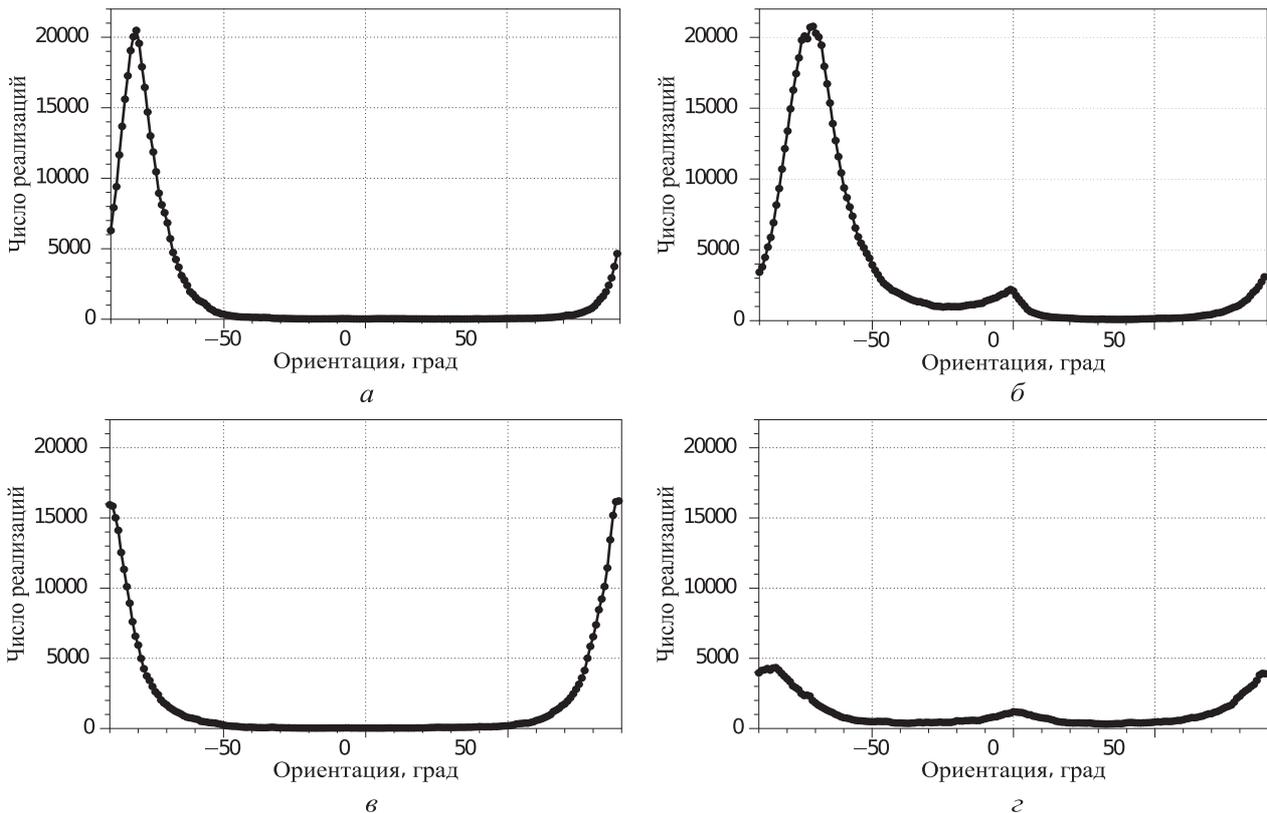


Рис. 3. Функции распределения углов ориентации локальных эллипсоидов для горизонтальной (*а*) и вертикальной (*в*) хронограмм, соответствующих частоте регистрации 4 кГц и горизонтальной (*б*) и вертикальной (*г*) при частоте регистрации 10 кГц

ских потоков, а вертикальные — линейным размерам потоков.

Статистика наблюдаемого поля ориентаций, прежде всего положение максимума и значение первого момента, в первом приближении характеризует доминирующее направление и скорость движения кластеров. Профили функций распределения угла ориентации зависят от апертуры усреднения и для значения апертуры, совпадающего со сглаживающим цифровой шум пространственным фильтром (гауссово окно с полушириной 3 pt), изображены на рис. 3.

Одномодальность функций распределения угла ориентации для 4-кГц-хронограмм и бимодальность для 10-кГц-хронограмм объясняются высоким уров-

нем цифрового шума исходного видеоряда при малом времени экспозиции кадра (100 мкс). Максимумы вблизи вертикальной ориентации на 4 кГц (рис. 3, *г*) и 10 кГц (рис. 3, *б*) на вертикально ориентированных хронограммах связаны с квазистатической (в масштабе исследуемого движения) компонентой пространственной модуляции уровня засветки исходных кадров видеоряда.

3. Выраженность структуры и энергоёмкость поля ориентаций

Элементы тензора структуры можно использовать для построения вспомогательных характеристик, например вектора ориентации, впервые предложенного

Гренлундом [15]

$$\mathbf{O} = \begin{bmatrix} J_{ss}(s, t) - J_{tt}(s, t) \\ 2J_{st}(s, t) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

квадрат амплитуды которого характеризует «выраженность» ориентации и для изотропных распределений интенсивности ($J_{ss}(s, t) = J_{tt}(s, t)$, $J_{st}(s, t) = 0$) равен нулю. Вектор Гренлунда использует только часть информации тензора структуры, его применение требует опорной информации о неоднородности распределения засветки анализируемого изображения. Полную форму векторного представления ориентационной структуры можно описывать с помощью оператора структуры следующего вида:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} J_{ss}(s, t) - J_{tt}(s, t) \\ 2J_{st}(s, t) \\ J_{ss}(s, t) + J_{tt}(s, t) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Отметим, что элемент в третьей строке соответствует квадрату модуля полного градиента исследуемого распределения уровня засветки. Вычислив отношение квадрата модуля вектора ориентации (8) к квадрату модуля полного градиента, построим количественную характеристику, позволяющую разделить постоянную засветку в зоне регистрации и изотропную засветку. В первом случае постоянной засветки и модуль вектора ориентации, и модуль оператора структуры обращаются в ноль, во втором случае нулевое значение принимает лишь модуль вектора ориентации.

Для идеально ориентированной структуры с постоянными значениями ориентаций по всему полю наблюдения квадрат модуля вектора ориентации $[(J_{ss}(s, t) - J_{tt}(s, t))^2 + 4J_{st}(s, t)^2]$ совпадает с квадратом полного градиента $[(J_{ss}(s, t) + J_{tt}(s, t))^2]$. Определим новую характеристику ориентированных хронограмм — выраженность структуры — следующим образом:

$$C(s, t) = \frac{(J_{tt}(s, t) - J_{ss}(s, t))^2 + 4J_{st}(s, t)J_{st}(s, t)}{(J_{tt}(s, t) + J_{ss}(s, t))^2} = \left(\frac{J_1(s, t) - J_2(s, t)}{J_1(s, t) + J_2(s, t)} \right)^2. \quad (10)$$

Значение $C(s, t)$ лежит в диапазоне $[0, 1]$.

Типичные для исследуемых хронограмм пространственно-временные распределения поля ориентаций и выраженности структуры приведены на рис. 4. Для достижения точности построения карты поля ориентаций был использован метод вычисления градиентов на основе фильтра Рика [16, 17], использующий разложение моногенной функции локальной структуры по совокупности базисных функций с варьируемой ориентацией. Яркость пикселя на рис. 4, в, г пропорциональна углу ориентации (минимум $-\pi/2$, максимум $+\pi/2$), а на рис. 4, д, е пропорциональна выраженности структуры.

Повышение разрешающей способности метода определения поля углов ориентации локальных эллипсоидов позволяет выявить ряд особенностей в выбранных сечениях для фазы поступательного движения и вихревой фазы. Длительности каждой из фаз для рассматриваемой выборки оказываются одного порядка и составляет в пространственных направлениях ~ 5 см, во времени ~ 20 мс. Поступательная компонента движения для горизонтальной хронограммы сохраняет вектор вдоль ветрового потока, для вертикальной хронограммы наблюдается изменение направления поступательного движения для вертикальной компоненты.

Интересна еще одна характеристика — «энергетическая емкость» изображения, определяемая через квадраты значений пространственных и временных вариаций уровня засветки [13]. При этом производную по времени $\partial I(s, t)/\partial t$ можно трактовать как скорость изменения локальной засветки, а производную по выбранной координате $\partial I(s, t)/\partial s$ — как пространственную деформацию локальной засветки:

$$E(s, t) = J_{ss}(s, t) + J_{tt}(s, t) \sim \left(\frac{\partial I(s, t)}{\partial s} \right)^2 + \left(\frac{\partial I(s, t)}{\partial t} \right)^2 \sim U(s, t) + T(s, t). \quad (11)$$

Проводимое при диагонализации тензора структуры преобразование координат (5) сохраняет след матрицы, следовательно справедливо утверждение

$$J_1(s, t) + J_2(s, t) = J_{ss}(s, t) + J_{tt}(s, t), \quad (12)$$

эквивалентное сохранению энергоемкости при повороте системы координат. Однако отдельные компоненты энергоемкости изменяют свои значения, правило подобного изменения может быть записано в виде

$$J_1(s, t) - J_2(s, t) = (J_{ss}(s, t) - J_{tt}(s, t)) \cos 2\theta + 2J_{st}(s, t) \sin 2\theta. \quad (13)$$

Пример карт распределения энергоемкости для обсуждаемых хронограмм дан на рис. 4, ж, и. Все приведенные на рис. 4 карты демонстрируют сложную топологическую структуру, независимо от метода и параметров первичной обработки хронограмм.

4. Определение скорости дрейфа регистрируемого изображения

Ориентационные метрики проекционных хронограмм позволяют в большинстве ситуаций определить компоненты поступательных и вращательных составляющих скорости оптических кластеров. Связь подобных «виртуальных» скоростей со скоростями реальных аэродинамических течений устанавливается при выполнении соответствующей калибровки измерительной системы и в пределах справедливости гипотезы Тейлора о «замороженной турбулентности» [18].

Строго говоря, на протяженной трассе редко выполняется условие однородности течений, что при-

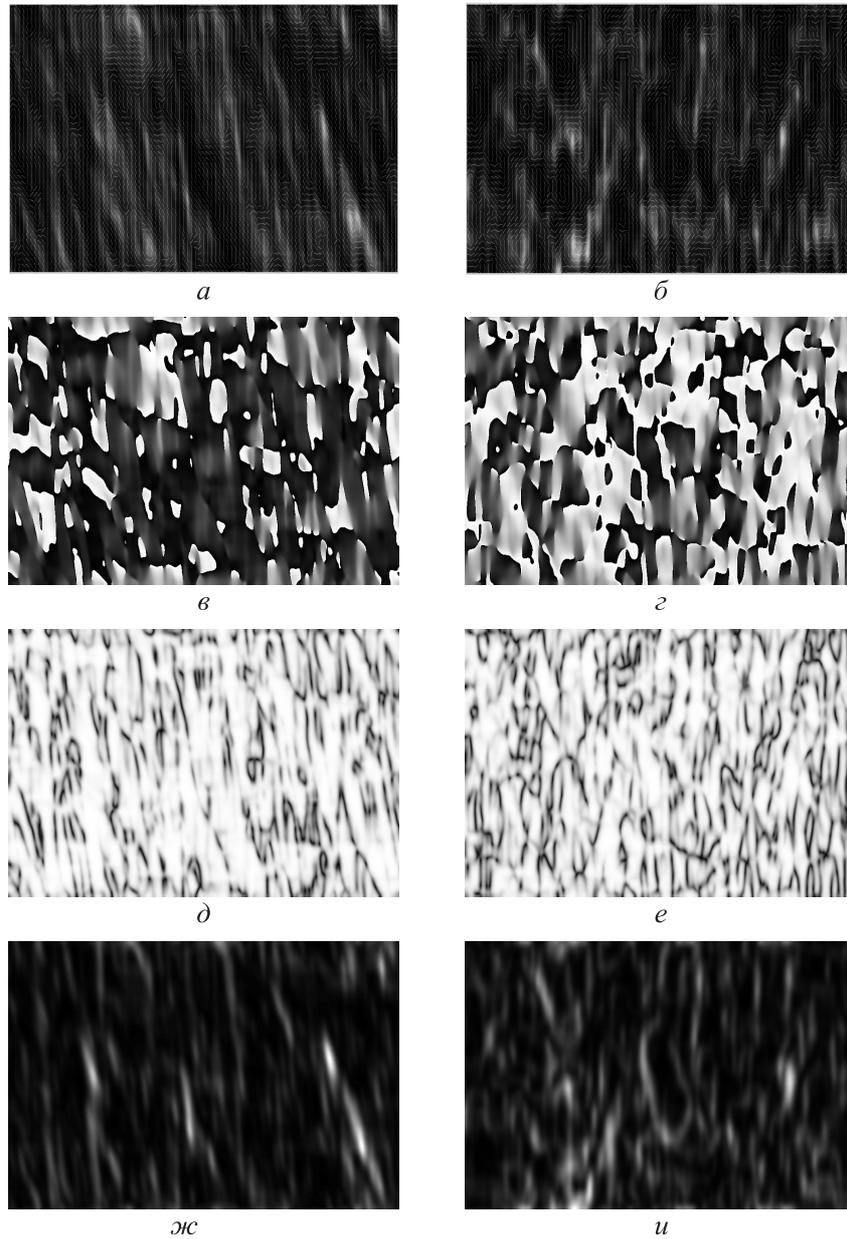


Рис. 4. Карты горизонтальной (левый столбец) и вертикальной (правый столбец) хронограмм. Первый ряд — поле ориентаций локальных эллипсоидов, второй ряд — эта же характеристика в градациях серого, третий ряд — выраженность структуры в градациях серого, четвертый ряд — энергоёмкость в градациях серого

ведет к наложению множества потоков на наблюдаемом изображении. Также следует учитывать искажения размеров наблюдаемых кластеров за счет расходимости пучка [19–21]. В зависимости от условий регистрации и свойств регистрируемых течений рассмотрим несколько вариантов соотношения между углом наклона локального эллипсоида и скоростью дрейфа.

4.1. Однородный дрейф

Рассмотрим хронограмму, соответствующую последовательности распределений уровней засветки $I(s, t)$, описываемых как дрейф со скоростью u вдоль координаты s без изменения общего профиля интенсивности:

$$I(s, t) = I(s - ut). \quad (14)$$

Выполнив необходимое дифференцирование по координате и времени, получим для тангенса угла ориентации локальных эллипсоидов

$$\operatorname{tg} \left(\frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2u \langle I(s, t)_s^2 \rangle}{\langle I(s, t)_s^2 \rangle - u^2 \langle I(s, t)_s^2 \rangle} \right) = u. \quad (15)$$

Здесь $\langle I(s, t)_s^2 \rangle$ — усредненный в заданном окне сглаживания квадрат производной регистрируемого уровня засветки проекционной хронограммы по аргументу s .

Выраженность структуры в рассматриваемой ситуации

$$C(s, t) = \frac{(\langle I(s, t)_s^2 \rangle - \langle I(s, t)_t^2 \rangle)^2 + 4 \langle I(s, t)_s I(s, t)_t \rangle^2}{(\langle I(s, t)_s^2 \rangle + \langle I(s, t)_t^2 \rangle)^2} = 1. \quad (16)$$

Фактически по всему полю наблюдения хронограмм сохраняется исходная глубина модуляции уровня засветки, а хронограмма представляет собой регулярный набор равнонаклоненных полос.

4.2. Анализ зашумленных последовательностей кадров

Режим регистрации видеоряда сопровождается неизбежным шумом, уровень которого зависит от частоты смены кадров, экспозиции, усиления, разрядности буферизации потока данных. В первом приближении подобный шум можно считать однородным и изотропным в зоне регистрации и слабокоррелированным с полезным сигналом.

Определим профиль засветки зашумленного кадра видеоряда следующим образом:

$$I(s, t) = I(s - ut) + N(s, t). \quad (17)$$

Статистические свойства пространственно-временной шумовой компоненты зададим так:

$$\langle N(s, t) \rangle = 0, \quad \langle N(s, t)_s N(s, t)_t \rangle = 0, \quad (18)$$

$$\langle N(s, t)_s^2 \rangle = \langle N(s, t)_t^2 \rangle, \quad (18)$$

$$\langle I(s, t)_s N(s, t)_t \rangle = \langle I(s, t)_t N(s, t)_s \rangle = 0. \quad (19)$$

Отметим, что утверждение о нулевом среднем уровне шума и нулевых значениях для кросс-корреляций компонент шума и сигнала, строго говоря, некорректны при положительной определенности уровня засветки независимо от породивших эту засветку причин. Однако эта некорректность снимается сдвигом начала отсчета уровня засветки на среднее значение уровня шума, зарегистрированное на периферии кадра. Формальное возникновение отрицательных величин «смещенной засветки» в отдельных фрагментах не влияет на работу алгоритмов определения ориентации локальных эллипсоидов и результат вычисления производных.

После выполнения дифференцирования получим для тангенса угла наклона оси локального эллипсоида проекционной хронограммы

$$\begin{aligned} & \operatorname{tg} \left(\frac{1}{2} \arctg \{ 2u \langle I(s, t)_s^2 \rangle \} \times \right. \\ & \left. \times \{ \langle I(s, t)_s^2 \rangle + \langle N(s, t)_t^2 \rangle - u^2 \langle I(s, t)_s^2 \rangle - \langle N(s, t)_t^2 \rangle \}^{-1} \right) = \\ & = u \quad (20) \end{aligned}$$

и для структурности синтезированной из зашумленного видеоряда хронограммы

$$C(s, t) = \frac{(1 + u^2) \langle I(s, t)_s^2 \rangle}{(1 + u^2) \langle I(s, t)_s^2 \rangle + \langle N(s, t)_t^2 \rangle + \langle N(s, t)_t^2 \rangle}. \quad (21)$$

Определяемая на основе тензора структуры скорость дрейфа оптических кластеров в режиме некоррелированного шума не зависит от уровня шума. Шумовые компоненты понижают степень структурности, но не изменяют профиль локальных эллипсоидов.

Многообразие методов вычисления градиентов анализируемого изображения (кубическая интерполяция, метод конечных разностей, фурье-градиенты, гауссовские градиенты, конечные разности на основе гессианов, фильтры Рица) и достаточно произвольный выбор окна усреднения $\omega(s, t)$ порождают различные профили функций распределения локальных ориентаций, различающиеся в частности, но имеющие практически тождественные значения доминирующей ориентации.

Понятие доминирующей ориентации — часто используемая в системах компьютерного зрения и идентификации характеристика изображения [22]. Для вычисления доминирующей ориентации конкретной хронограммы размера $D \times S$ (D — число временных отсчетов, S — линейный пространственный «захват» хронограммы в пикселях) следует построить вспомогательную матрицу размерности $(D \cdot S) \times 2$ с числом строк $D \cdot S$, совпадающим с количеством пикселей анализируемого изображения или при огрублении оценки с числом используемых локальных эллипсоидов. Столбцы вспомогательной матрицы содержат значения проекций единичного вектора на орты:

$$\hat{U} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \\ \vdots & \vdots \\ \cos \theta_{D \cdot S} & \sin \theta_{D \cdot S} \end{bmatrix}. \quad (22)$$

Определим матрицу ковариаций размерности 2×2 следующим образом:

$$\hat{C} = \hat{U}^T \hat{U}. \quad (23)$$

Максимальный по величине собственный вектор матрицы (23) определяет доминирующую ориентацию для изображения θ_d , а тангенс этого угла $v_d = \operatorname{tg} \theta_d$ — искомую доминирующую скорость. Именно этот параметр был выбран как основная характеристика хронограммы. Структурность обрабатываемых хронограмм не ниже 0.93.

На рис. 5 отображен ход изменения скорости ветра, полученной из медианной оценки синхронных показаний анемометров, разнесенных по трассе с шагом 10 м, и доминирующей скорости. Корреляция рассматриваемых характеристик составляет 0.83. Использование медианы, а не среднего обосновано в данном случае асимметрией функции распределения регистрируемых значений скоростей. Систематический сдвиг «ориентационной скорости» в сторону больших значений объясняется чередованием трансляционных и ротационных фаз горизонтальной хронограммы. Как показывает грубая оценка на основе рис. 4, а, площадь фрагментов хронограммы с близкой к доминирующему значению ориентацией локальных эллипсоидов не превышает 0.25 от общей площади анализируемого изображения, соответственно зависимость с рис. 5 косвенно определяет пространственно-временные веса различных типов аэродинамических микротечений.

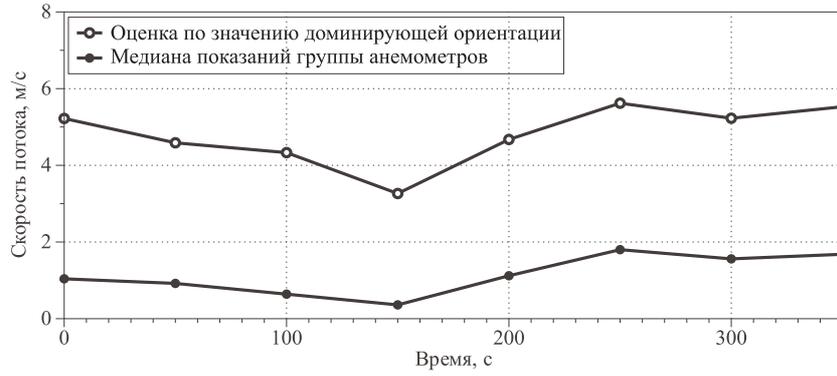


Рис. 5. Последовательность значений скорости ветра, регистрируемых линейкой анемометров и ориентационным методом, с интервалом 50 с

4.3. Вариация уровня засветки последовательности кадров

Если помимо дрейфа кластерной структуры в зоне регистрации наблюдается перераспределение уровня засветки, связанное либо с работой регистратора (дрейф синхроимпульсов), либо с нестационарными процессами поглощения или рассеяния на трассе, закон изменения регистрируемой интенсивности принимает вид

$$I(s, t) = I(s - ut; t). \quad (24)$$

Теперь связь скорости дрейфа и углов ориентации локальных эллипсоидов не столь очевидна:

$$u \neq \operatorname{tg} \left(\frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left\{ u \langle I(s, t)_s^2 \rangle - \langle I(s, t)_s I(s, t)_t \rangle \right\} \times \left\{ (1 - u^2) \langle I(s, t)_s^2 \rangle + 2u \langle I(s, t)_s I(s, t)_t \rangle - \langle I(s, t)_t^2 \rangle \right\}^{-1} \right). \quad (25)$$

Рассинхронизация изменения хронограммы вдоль пространственной и временной координат не допускает простой интерпретации локального угла поворота $\theta(s, t)$ как меры скорости дрейфа. Если временные вариации общего уровня засветки слабо коррелируют с регулярными пространственными, можно использовать грубое приближение

$$\langle I(s, t)_s I(s, t)_t \rangle = 0, \quad (26)$$

в условиях которого допустима следующая оценка:

$$\theta(s, t) = \frac{u}{1 - \langle I(s, t)_s^2 \rangle / \langle I(s, t)_t^2 \rangle}. \quad (27)$$

Согласно выражению (27), оцениваемая из ориентационных значений скорость дрейфа кластерной структуры при вариации общей интенсивности приходящего излучения будет завышена, непостоянна во времени и в ряде случаев знакопеременна.

Заключение

Предложенный метод анализа экспериментальных выборок на базе ориентированных хронограмм с последующим определением массива тензоров динамической структуры позволяет определить локальные и усредненные по выбранной простран-

ственно-временной области проекции скорости течений и восстановить их геометрию в зоне пересечения с зондирующим пучком. Дополнительные характеристики, построенные для диагонализированных локальных тензоров структуры, — локальная энергоёмкость и локальная структурированность, — информативны для оценки пространственных размеров неоднородностей, времени прохода через рассматриваемое сечение, динамики «энергетических вбросов».

Для обработки ориентированных хронограмм использованы модули анализа изображения ImageJ, разработанные первично для биомедицинских приложений, но к настоящему времени расширенные дополнительными библиотеками для различных прикладных задач [24, 25]. Представленные карты ориентаций, согласованности структур ориентированных хронограмм и статистические характеристики проекций скоростей получены с подключением плагина OrientationJ [26, 27] и ряда управляющих макросов.

Анализ ориентационного поля локальных скоростей, получаемых с временным разрешением 250 мкс, позволил визуализировать квазирегулярную структуру трансляционных и ротационных «доменов», динамика распространения и взаимодействия которых требует последующего детального изучения с подключением контроля фазовой структуры волнового фронта. Однако уже на выполненном этапе исследования наблюдается хорошее соответствие оценок скорости на основе проведенного ориентационным методом анализа и синхронных независимых измерений акустическими анемометрами. Возможность отдельной оценки трансляционных и ротационных компонент скорости в пределах интервала статистического усреднения может быть полезной во многих практических случаях и является одним из достоинств метода.

Потенциал представленного метода не ограничивается исследованием динамики рефракционных искажений зондирующих оптических пучков. Без изменения алгоритмов анализа метод может быть распространен на широкий класс задач исследования нестационарных регулярных или случайных

пространственных структур при условии первичной регистрации последовательности изображений с достаточными для поставленной задачи пространственным и временным разрешением.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 14-02-00461 и 15-05-04210).

Список литературы

1. Abaza M., Mesleh R., Mansour A., Aggoune el-H. // *Opt. Commun.* 2015. **334**. P. 247.
2. Rodrigues G.K., Carneiro V.G.A., Cruz A.R. da, Giral-di M.Th.M.R. // *Opt. Commun.* 2013. **305**. P. 42.
3. Kashani F.D., Reza Hedayati R.M., Kazemian E. et al. // *Optik – Internat. J. for Light and Electron Optics*. 2013. **124**, N 22. P. 5462.
4. Prabu K., Sriram Kumar D., Srinivas T. // *Optik – Internat. J. for Light and Electron Optics*. 2013. **125**, N 19. P. 5573.
5. Евтихеева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. Лазерная рефрактография. М., 2008.
6. Белозеров А.Ф. Оптические методы визуализации газовых потоков. Казань, 2007.
7. Кляцкин В.И. Статистический анализ когерентных явлений в стохастических динамических системах. М., 2015.
8. Lawrence R.S., Ochs G.R., Clifford S.F. // *Applied Optics*. 1972. **11**, N 2. P. 239.
9. Wang Ting-i, Ochs G.R., Lawrence S. // *Applied Optics*. 1981. **20**, N 23. P. 4073.
10. Tichkule S., Muschinski A. // *Applied Optics*. 2012. **51**, N 21. P. 5272.
11. Банах В.А., Фалиц А.В. // *Оптика атмосф. и океана*. 2009. **22**, N 12. С. 1135.
12. Афанасьев А.Л., Банах В.А., Ростов А.П. // *Оптика атмосф. и океана*. 2010. **23**, N 8. С. 723.
13. Bernd J. Spatio-Temporal Image Processing: Theory and Scientific Applications. Springer-Verlag, 1993.
14. Bigun J., Bigun T., Nilsson K. // *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2004 **26**, N 12. P. 1590.
15. Granlund G.H. // Search of a General Picture Processing Operator. 1978. P. 155.
16. Reisz M. // *Mathematische Zeitschrift*. 1928. **27**, N 1. P. 218.
17. Langley K., Anderson S.J. // *Vision Research*. 2010. **50**, N 17. P. 1748.
18. Taylor G.I. The scientific papers of Sir Geoffrey Ingram Taylor / Ed. by G.K. Batchelor. Vol. 2. Meteorology, Oceanography and Turbulent Flow. Cambridge, 1960.
19. Афанасьев А.Л., Банах В.А., Ростов А.П. // *Опт. и спектроск.* 2008. **105**, № 4. С. 698.
20. Афанасьев А.Л., Банах В.А., Ростов А.П. // *Оптика атмосф. и океана*. 2008. **21**, № 7. С. 640.
21. Афанасьев А.Л., Банах В.А., Маракасов Д.А., Ростов А.П. // *Изв. вузов. Физика*. 2010. **53**, № 9/3. С. 101.
22. Fransens R., Prins J. De, Gool L. Van // *Proc. Ninth IEEE Internat. Conf. on Computer Vision (ICCV 2003)*. **2**. P. 1289.
23. Massaro M., Graham J.M.R. // *J. Fluids and Structures*. 2015. **57**. P. 81.
24. Burger W., Burge M. Digital Image Processing: An Algorithmic Approach Using Java. Springer, 2008.
25. ImageJ – An Open Source Image Processing Program Designed for Scientific Multidimensional Images.
26. Rezakhaniha R., Agianniotis A., Schrauwen J.T.C. et al. // *Biomech. Model. Mechanobiol.* 2012. **11**, N 3–4. P. 461.
27. OrientationJ. ImageJ's plugin for directional analysis in images.

Tensor analysis of the refraction distortions dynamics of a sounding optical beam

T. I. Arsenyan¹, A. L. Afanasiev^{2,a}, V. A. Banakh², M. V. Pisklin^{1,b}, A. P. Rostov², N. A. Suhareva^{1,c}

¹Department of Photonics and Physics of Microwaves, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

²Laboratory of Wave Propagation, Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Tomsk 634021, Russia.

E-mail: ^aafanasiev@iao.ru, ^bmaxim.pisklin@physics.msu.ru, ^csuhareva@phys.msu.ru.

The capabilities of dynamics analysis of the sounding-beam intensity profile at the output of an atmospheric path on the basis of the chronogram structure tensor are considered. The spatio-temporal structure of the velocity field of refraction distortions is investigated. The characteristic dimensions of the regions of the translational and rotational types of flow motions are determined. The profiles of local velocity projections are obtained, as well as their statistical properties under the conditions of weak variations of meteorological parameters in the output flow recording interval. Comparison of the characteristic values of wind velocity that is recorded with an array of anemometers and those calculated with the suggested method allowed us to elaborate an approach to the rough estimation of the translational and fluctuation components of aerodynamic flows at the path.

Keywords: free optical channel, wind velocity, turbulence, microflows, image structure tensor, chronogram.

PACS: 42.25.Dd, 42.68.Bz, 92.60.Gn, 92.60.hk.

Received 24 July 2015.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 6(2015).

Сведения об авторах

1. Арсеньян Татьяна Ишхановна — доктор физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-15-86, e-mail: arsenyan@mail.ru.
2. Афанасьев Алексей Леонидович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (382) 249-26-82, e-mail: afanasiev@iao.ru.
3. Банах Виктор Арсентьевич — доктор физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник, рук. лаборатории; тел.: (382) 249-29-65, e-mail: banakh@iao.ru.
4. Писклин Максим Валентинович — мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-46-01, e-mail: maxim.pisklin@physics.msu.ru.
5. Ростов Андрей Петрович — канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (382) 249-27-17, e-mail: rostov@iao.ru.
6. Сухарева Наталия Александровна — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-11-14, e-mail: suhareva@phys.msu.ru.