

УДК 004.932.2, 537.876.23, 537.877

doi 10.26089/NumMet.v21r102

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ КОЛЛИМИРОВАННОГО ВОЛНОВОГО ПУЧКА

А. В. Бланк¹, Н. А. Сухарева²

Представлен метод сравнительного анализа профилей распределения интенсивности на основе тензора структуры изображения. Совокупность параметров массива локальных тензоров, вводимых для каждого пикселя регистрируемого изображения, используется для определения спектра локальных ориентаций, профиля энергоемкости изображения и согласованности его структуры. Рассматриваемый метод актуален для дискретного анализа пространственной и пространственно-временной структуры волновых пучков, прошедших область локализованных или распределенных рефракционных помех.

Ключевые слова: профиль интенсивности волнового пучка, тензор структуры изображения, согласованность структуры, энергоемкость структуры, спектр локальных ориентаций.

Введение. Феноменологический анализ профиля распределения интенсивности волнового пучка, его динамика и статистика позволяет восстановить только часть информации, заложенной в наблюдаемых распределениях. Существенно более значимыми могут быть параметры, синтезированные из наблюдаемых временных рядов распределений интенсивности с опорой на структуру уравнений распространения пучка в нестационарных неоднородных средах. Наиболее информативны для векторных пучков распределения, получаемые при дифференцировании вдоль физически значимых направлений в плоскости, перпендикулярной направлению распространения пучка. Сложная динамическая структура распределения комплексной амплитуды оптического пучка на выходе протяженной атмосферной трассы может быть рассмотрена в терминах, типичных для описания профиля поверхности, применяемых в физике твердого тела или геофизике. Характеристические величины при подобных подходах основаны на анализе геометрии кривых постоянного уровня и направления наискорейшего спуска из данной точки поверхности и на квадратичных комбинациях, описывающих деформацию анализируемой поверхности.

Работы выполнены на прототипе оптической системы наведения и позиционирования, установленной на экспериментальном атмосферном полигоне РКК “Энергия” с длиной трассы 1350 метров. Оптическая схема системы наведения и позиционирования пучка построена по трехлинзовой децентрированной схеме с использованием на выходе сектора параболического интерференционного зеркала. Оптическая система позволяет по однотипной геометрии работать с волновыми пучками различных длин волн. Ниже описаны результаты, полученные для одномодового энергонесущего волнового пучка с длиной волны 1083 нм [1].

1. Управление ориентацией профиля. Используемая оптическая система формирования профиля пучка в центрованном состоянии имеет плоскость симметрии, включающую ось вращения параболического зеркала и ось симметрии линзовой группы. При горизонтальных смещениях позиционной линзы от центра сведения оптических элементов плоскость симметрии исчезает, как и при вертикальных смещениях [2].

При различных смещениях подстраиваемого оптического элемента системы можно наблюдать различные приосевые проекции волнового пучка, открытые и закрытые тороиды, переходящие в пределе в гауссову форму вблизи оптического центра системы. Регистрация распределения интенсивности выполнялась камерой технического зрения с частотой опроса 1 кГц и длительностью выборки от 1 с до 3 с в условиях слабого градиента температур и низкой скорости ветра в вечернее время. Профиль пучка регистрировался на рассеивающем мелкодисперсном экране в апертуре 256×256 мм². Относительно малые рефракционные искажения на трассе позволяли пренебречь рефракционным размытием, вносимым атмосферой в масштабе дифракционного расплывания коллимированного волнового пучка. Для обработки использовались средние по выборке распределения интенсивности.

¹ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, физический факультет, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, 119991, Москва; ведущий программист, e-mail: BlankArkadiy@physics.msu.ru

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, физический факультет, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, 119991, Москва; доцент, e-mail: Suhareva@phys.msu.ru

На рис. 1 представлены три блока изображений распределения интенсивности в плоскости регистрации, полученные при продольной перестройке координаты позиционной линзы с шагом 10 мкм и различными ее начальными положениями. Движение по кадрам блока сверху вниз и слева направо соответствует перестройке положения перетяжки пучка из бесконечности к выходному окну оптической системы. Равномерный шаг продольного сканирования положения позиционной линзы не гарантирует равномерный шаг положения перетяжки волнового пучка, детальнее этот вопрос обсуждается в работе [1].

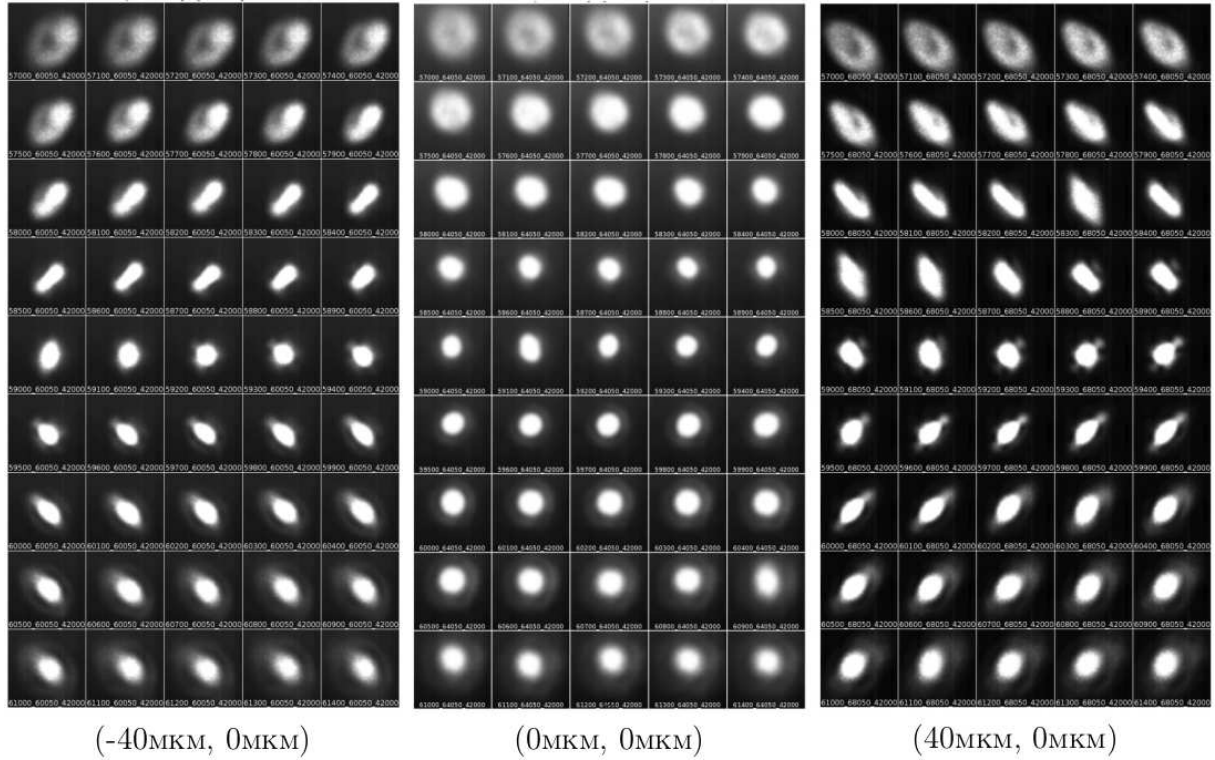


Рис. 1. Изменение профиля интенсивности волнового пучка при продольном сканировании позиционной линзы с шагом 10 микрон для трех поперечных координат

Начальные профили волнового пучка для различных поперечных положений представлены на рис. 2. Потеря ожидаемой осевой симметрии связана с децентровкой оптической схемы с формированием плоскости симметрии второго порядка в процессе юстировки.

2. Дифференциалы интенсивности векторного пучка. Описание пространственной структуры пучка будет выполняться в декартовой системе координат, ось z которой совпадает с направлением распространения пучка. Пусть вектор комплексной амплитуды электрической составляющей электромагнитного поля параксиального векторного пучка определен через профили интенсивности $I(x, y, z; t)$ и фазы $\phi(x, y, z; t)$ в плоскости регистрации:

$$F(x, y, z; t) = \sqrt{I(x, y, z; t)} \exp(i\phi(x, y, z; t)).$$

Система уравнений для интенсивности и фазы в квазистационарном приближении может быть получена на основе уравнения Леонтовича–Фока [3]

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(I \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(I \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + k \frac{\partial I}{\partial z} = 0, \\ 2I \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \right) - \left(\frac{\partial I}{\partial x} \right)^2 - \left(\frac{\partial I}{\partial y} \right)^2 - 4I^2 \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 + 2k \frac{\partial \phi}{\partial z} \right] = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Пространственная модуляция дифференциальных характеристик профиля интенсивности векторного пучка определяет помимо фазовой модуляции ряд собственно векторных свойств, таких как проекции вихревой компоненты поля, z -компоненты поляризационного и орбитального моментов импульса пучка [3, 4]. Например, для области узлов интенсивности ($I(x_0, y_0) = 0$) вихревая компонента векторного

поля пучка определяется так:

$$|\text{rot}_0 j(x_0, y_0)| \sim \sqrt{\frac{\partial^2 I(x, y)}{\partial x^2} \frac{\partial^2 I(x, y)}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 I(x, y)}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 I(x, y)}{\partial y \partial x}}. \quad (2)$$

В случае пучка с эллиптической поляризацией и с компонентами комплексной амплитуды, имеющими вид $E_x = F(x, y, z) \cos \alpha$, $E_y = iF(x, y, z) \sin \alpha$ и E_z , проекция поляризационного момента импульса на направление распространения связана с профилем интенсивности следующим образом:

$$M_z^P \sim \sin 2\alpha \left(x \frac{\partial I(x, y)}{\partial x} + y \frac{\partial I(x, y)}{\partial y} \right). \quad (3)$$

Если в плоскости наблюдения отсутствуют сингулярности фазы, то возможна запись неоднородного дифференциального уравнения для фазы следующего вида:

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 + 2k \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{1}{2I} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{4I^2} \left[\left(\frac{\partial I}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial y} \right)^2 \right].$$

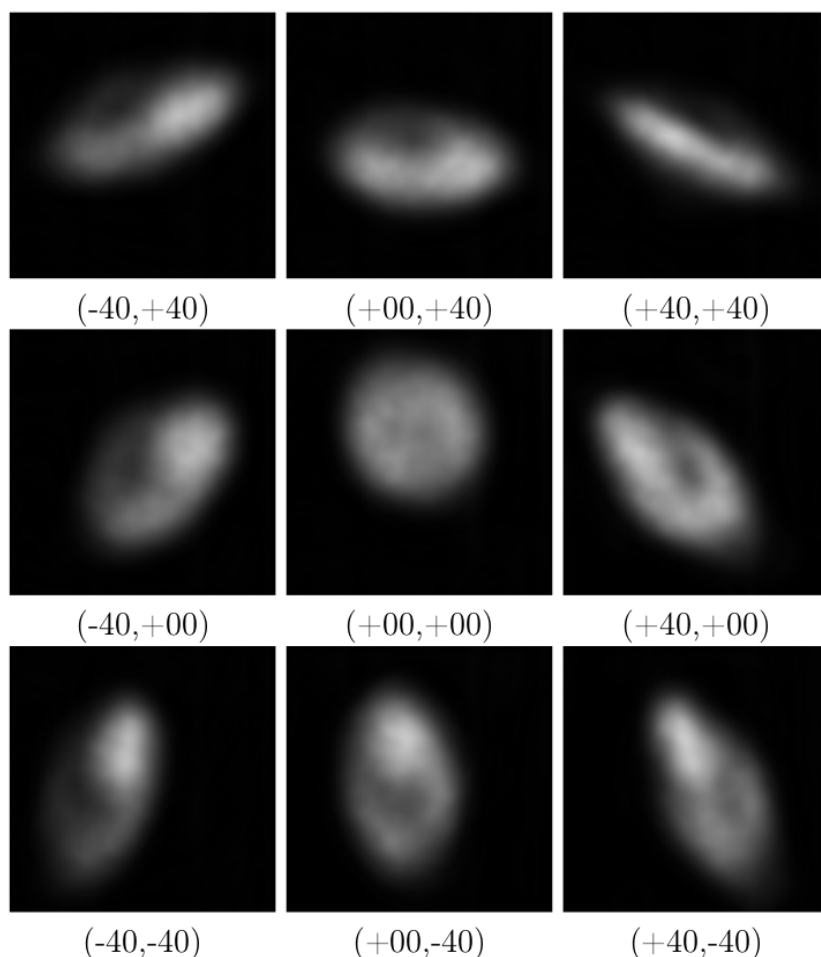


Рис. 2. Профиль волнового пучка в начале продольного сканирования позиций. Поперечные координаты линзы даны в микронах

Пусть $I(x, y, t)$ — мгновенное распределение интенсивности в плоскости регистрации, $I(c, r, k)$ — соответствующий ему стек цифровых значений (c, r — номера столбцов и строк цифрового изображения, k — номер кадра). Определим тензор структуры второго ранга эквидистантной последовательности распределений интенсивности на основе комбинаций дискретных частных производных первого и второго порядков. Тензоры структуры вводятся для каждого пиксела каждого кадра регистрируемой цифровой

последовательности распределений интенсивности (x, y, t) согласно предложенному в [5] методу:

$$\hat{J}(c, r, k) = \begin{bmatrix} J_{xx}(c, r, k) & J_{yx}(c, r, k) & J_{tx}(c, r, k) \\ J_{xy}(c, r, k) & J_{yy}(c, r, k) & J_{ty}(c, r, k) \\ J_{xt}(c, r, k) & J_{yt}(c, r, k) & J_{tt}(c, r, k) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где x, y — декартовы координаты в системе отсчета регистратора, t — время регистрации конкретного кадра в последовательности цифровых распределений интенсивности.

Элементы тензора структуры получены в результате усреднения дискретных производных по соответствующим координатам в выбранном окне (представлены компоненты для пространственных координат):

$$J_{xx}(c, r, k) = \sum_{\eta}^R \sum_{\xi}^C w(c - \xi, r - \eta) \left(\frac{\partial I(\xi, \eta, t)}{\partial \eta} \right)^2,$$

$$J_{yy}(c, r, k) = \sum_{\eta}^R \sum_{\xi}^C w(c - \xi, r - \eta) \left(\frac{\partial I(\xi, \eta, t)}{\partial \xi} \right)^2,$$

$$J_{xy}(c, r, k) = J_{yx}(c, r, k) = \sum_{\eta}^R \sum_{\xi}^C w(c - \xi, r - \eta) \left(\frac{\partial I(\xi, \eta, t)}{\partial \xi} \right) \left(\frac{\partial I(\xi, \eta, t)}{\partial \eta} \right).$$

Здесь (R, C, k) — число строк, столбцов и кадров анализируемой серии изображений, $w(x, y)$ — нормированная весовая функция окна. Ниже при расчетах использован гауссов профиль с варьируемой дисперсией по обоим направлениям. Диагональные и недиагональные элементы тензора пространственной структуры созданы на основе сглаженных локальных проекций градиента поля интенсивности и несут информацию о преимущественных направлениях изменения интенсивности вблизи рассматриваемой пары пространственных координат.

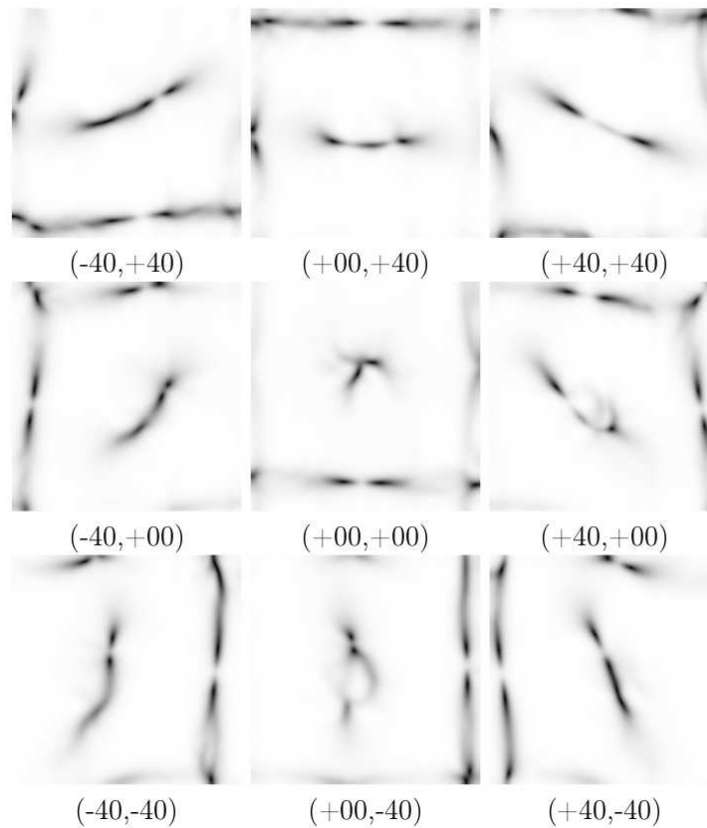


Рис. 3. Карты распределения согласованности структуры профиля распределения интенсивности анализируемой группы. Поперечные координаты линзы даны в микронах

Помимо симметричного тензора на основе первых пространственных производных введем симметричную матрицу вторых пространственных и временных производных, элементы которой определяются

через локальные значения производных второго порядка:

$$\widehat{J}^{(2)}(c, r, k) = \begin{bmatrix} J_{xx}^{(2)}(c, r, k) & J_{yx}^{(2)}(c, r, k) & J_{tx}^{(2)}(c, r, k) \\ J_{xy}^{(2)}(c, r, k) & J_{yy}^{(2)}(c, r, k) & J_{ty}^{(2)}(c, r, k) \\ J_{ty}^{(2)}(c, r, k) & J_{yt}^{(2)}(c, r, k) & J_{tt}^{(2)}(c, r, k) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

а пространственные компоненты вычисляются следующим образом:

$$J_{xx}^{(2)}(c, r, k) = \sum_{\eta}^R \sum_{\xi}^C w(c - \xi, r - \eta) \frac{\partial^2 I(\xi, \eta, t)}{\partial \eta^2},$$

$$J_{xy}^{(2)}(c, r, k) = \sum_{\eta}^R \sum_{\xi}^C w(c - \xi, r - \eta) \frac{\partial^2 I(\xi, \eta, t)}{\partial \eta \partial \xi},$$

$$J_{yx}^{(2)}(c, r, k) = \sum_{\eta}^R \sum_{\xi}^C w(c - \xi, r - \eta) \frac{\partial^2 I(\xi, \eta, t)}{\partial \xi \partial \eta},$$

$$J_{yy}^{(2)}(c, r, k) = \sum_{\eta}^R \sum_{\xi}^C w(c - \xi, r - \eta) \frac{\partial^2 I(\xi, \eta, t)}{\partial \xi^2}.$$

Компоненты тензоров (4) и (5) позволяют определить параметры (2), (3) и ряд слагаемых второго уравнения системы (1).

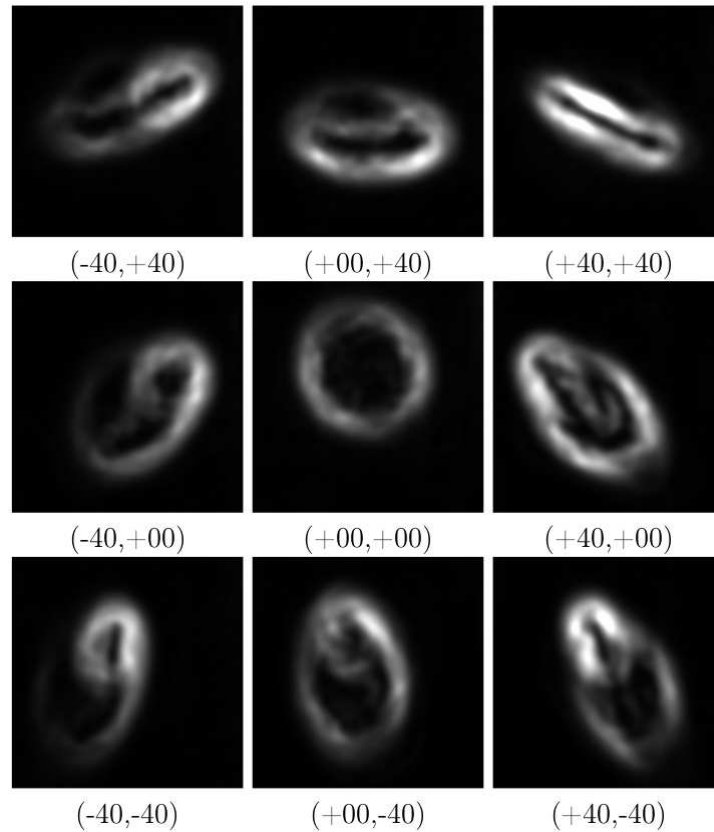


Рис. 4. Распределения “дифференциальной” энергоемкости. Поперечные координаты линзы даны в микронах

2.1. Дифференциальная топография кадра. Последовательность элементов цифрового видеоряда в плоскости регистрации $I(x, y, t)$ будем рассматривать как ансамбль реализаций состояний выходного оптического сигнала с временем когерентности, определяемым геометрией трассы и динамикой рефракционных течений. Отдельный кадр выборки можно трактовать как результат преобразования (свертки) исходного регулярного гауссовского профиля лазерного пучка аппаратной функцией трассы. Последовательность кадров анализируется как стек, три сечения которого — (x, y) , (x, t) , (y, t) — в зависимости от

решаемой задачи рассматриваются отдельно или в едином блоке. Для каждого кадра выборки выполняется вычитание фона методом “перекатываемого шара” с диаметром шара, соответствующего большей оси наблюдаемого профиля в эллиптической аппроксимации.

Элементы тензора структуры можно использовать для построения вспомогательных характеристик, например вектора ориентации, впервые предложенного Гренлундом [6]:

$$\vec{O} = \begin{bmatrix} J_{yy}(x, y) - J_{xx}(x, y) \\ 2J_{yx}(x, y) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

квадрат амплитуды которого характеризует выраженность ориентации и для изотропных распределений интенсивности ($J_{yy}(x, y) = J_{xx}(x, y)$, $J_{yx}(x, y) = 0$) равен нулю.

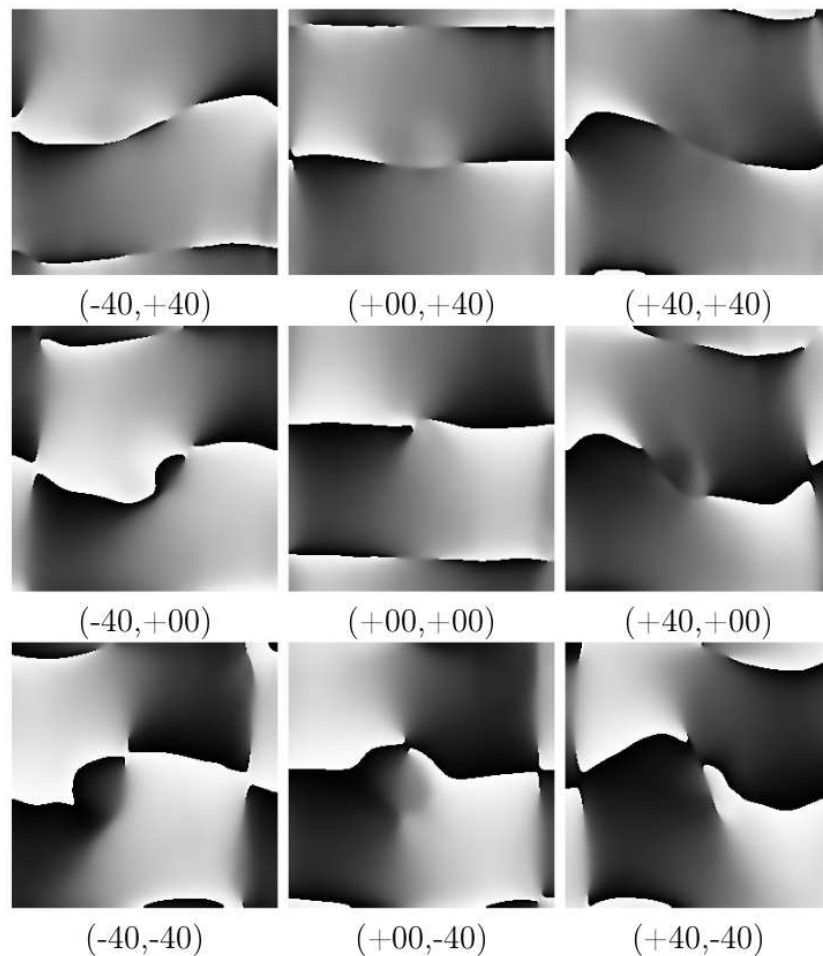


Рис. 5. Пространственное распределение значений ориентации осей локальных аппроксимирующих эллипсов. Поперечные координаты линзы даны в микронах

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:

$$\vec{S} = \begin{bmatrix} J_{yy}(x, y) - J_{xx}(x, y) \\ 2J_{yx}(x, y) \\ J_{yy}(x, y) + J_{xx}(x, y) \end{bmatrix}.$$

Отметим, что элемент в третьей строке соответствует квадрату модуля полного градиента исследуемого распределения уровня засветки. Вычислив отношение квадрата модуля вектора ориентации (6) к квадрату модуля полного градиента, получим 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 нуль, 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 $[(J_{yy}(x, y) - J_{xx}(x, y))^2 + 4J_{yx}(x, y)^2]$ совпадает с квадратом полного градиента $[(J_{yy}(x, y) + J_{xx}(x, y))^2]$.

Определим новую характеристику профиля – выраженность структуры – следующим образом:

$$C(x, y) = \frac{(J_{xx}(x, y) - J_{yy}(x, y))^2 + 4J_{yx}(x, y)J_{yx}(x, y)}{(J_{xx}(x, y) + J_{yy}(x, y))^2} = \left(\frac{J_1(x, y) - J_2(x, y)}{J_1(x, y) + J_2(x, y)} \right)^2,$$

значение $C(x, y)$ лежит в диапазоне $[0, 1]$.

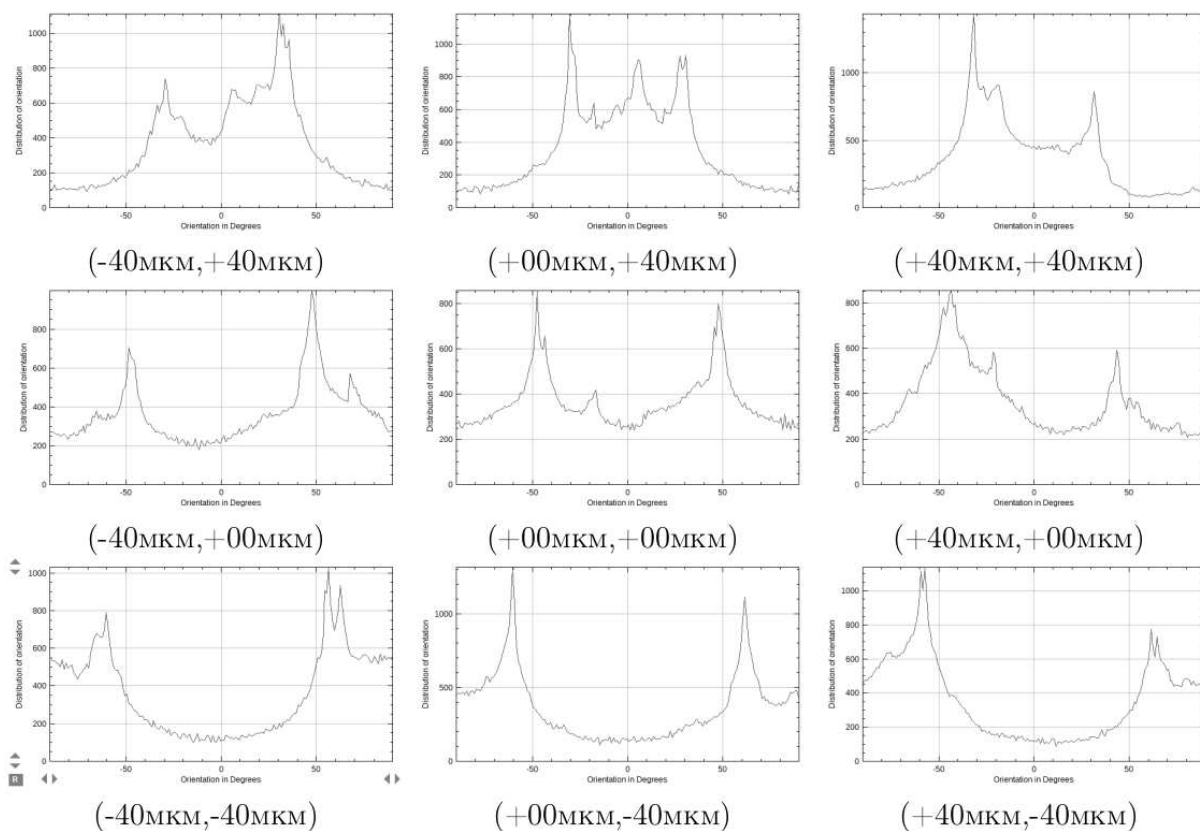


Рис. 6. Ориентационные спектры волновых пучков при заданном продольном положении перестраиваемой линзы

Сумма диагональных элементов тензора (4) (или след тензора) соответствует физически значимой пространственно-временной дифференциальной комбинационной характеристике – “дифференциальной энергоемкости” исходного профиля изображения [5]. Производные $\frac{\partial I(x, y, t)}{\partial x}$, $\frac{\partial I(x, y, t)}{\partial y}$ и $\frac{\partial I(x, y, t)}{\partial t}$ будем трактовать как компоненты пространственной деформации локальной засветки и компоненты потока “кинетической энергии”:

$$\begin{aligned} E(x, y, t) &= J_{yy}(x, y, t) + J_{xx}(x, y, t) + J_{tt}(x, y, t) \sim \\ &\sim \left(\frac{\partial I(x, y, t)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial I(x, y, t)}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial I(x, y, t)}{\partial t} \right)^2 \sim \\ &\sim U_x(x, y, t) + U_y(x, y, t) + T(x, y, t). \end{aligned}$$

Распределение энергоемкости деформации для стека типичной последовательности кадров изображений распределения интенсивности представлено на рис. 4. Вид контура максимальной энергоемкости деформации после прохождения трассы со сложной стохастической модуляцией оптической плотности

несет информацию о трансляционных и ротационных компонентах вариации оптической плотности и порождающих эти вариации скорости поперечного ветра и вертикальных конвективных токов. Энергоемкость пространственно-временной “деформации” профиля распределения интенсивности соответствует первому инварианту тензора пространственно-временной структуры. При вращении системы координат в плоскости регистрации пучка значение первого инварианта не изменяется.

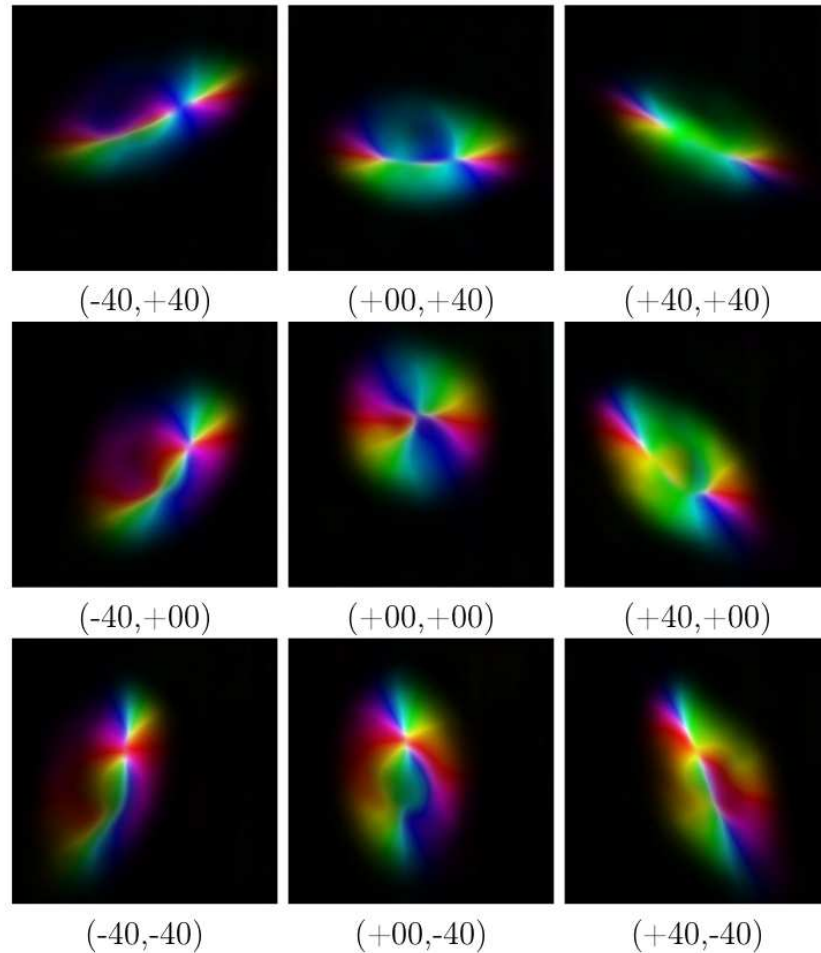


Рис. 7. Объединенная карта ориентации (цветовой оттенок), согласованности (насыщенность цвета) на фоне профиля пучка. Поперечные координаты линзы даны в микронах

2.2. Ориентационные спектры. Рассмотрим пространственные сечения стека видеоизображений $XUT-XU$. Для описания их структуры определим парциальные тензоры второго ранга, включающие пространственные и временные компоненты, следующего вида:

$$\hat{J}(x, y; k) = \begin{bmatrix} J_{xx}(x, y; k) & J_{yx}(x, y; k) \\ J_{xy}(x, y; k) & J_{yy}(x, y; k) \end{bmatrix},$$

где k — номер кадра. Каждый элемент из массива тензоров структуры, привязанных к конкретному пикселу, может быть приведен к диагональному виду поворотом системы сопровождающих координат на соответствующий угол. Подобный угол и пара значений диагональных элементов вводятся для каждого пиксела дискретного изображения. Значение необходимого угла поворота для локальной диагонализации тензора можно определить на основе уравнения

$$\begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{xx} & J_{yx} \\ J_{xy} & J_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Из условия обнуления недиагональных элементов в результате двойного перемножения матриц в правой части соотношения (7) получим значение необходимого локального угла поворота или ориентации

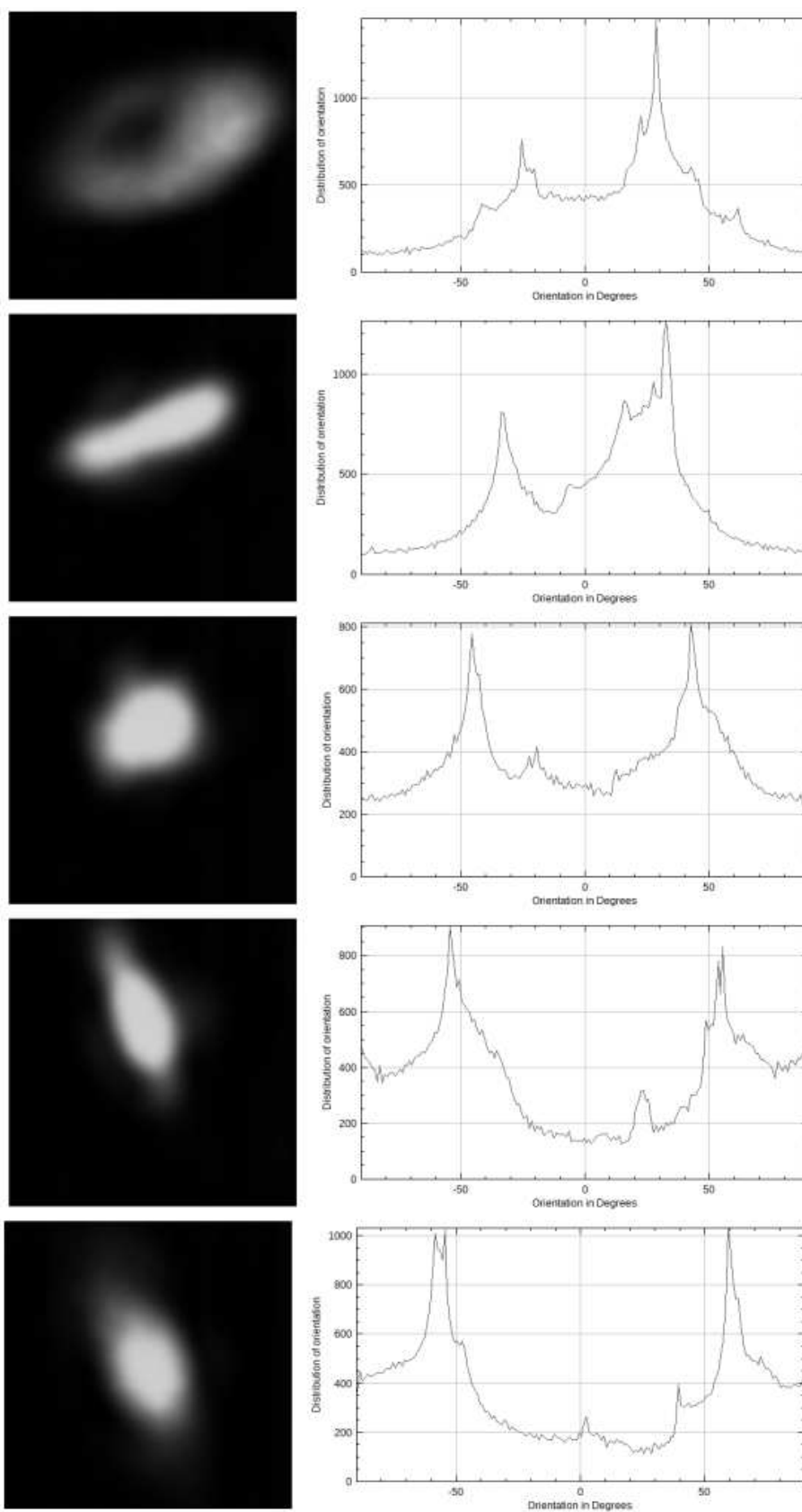


Рис. 8. Изменение профиля пучка при продольном перемещении линзы из положения (-200 мкм, -40 мкм, +40 мкм) с шагом 100 мкм

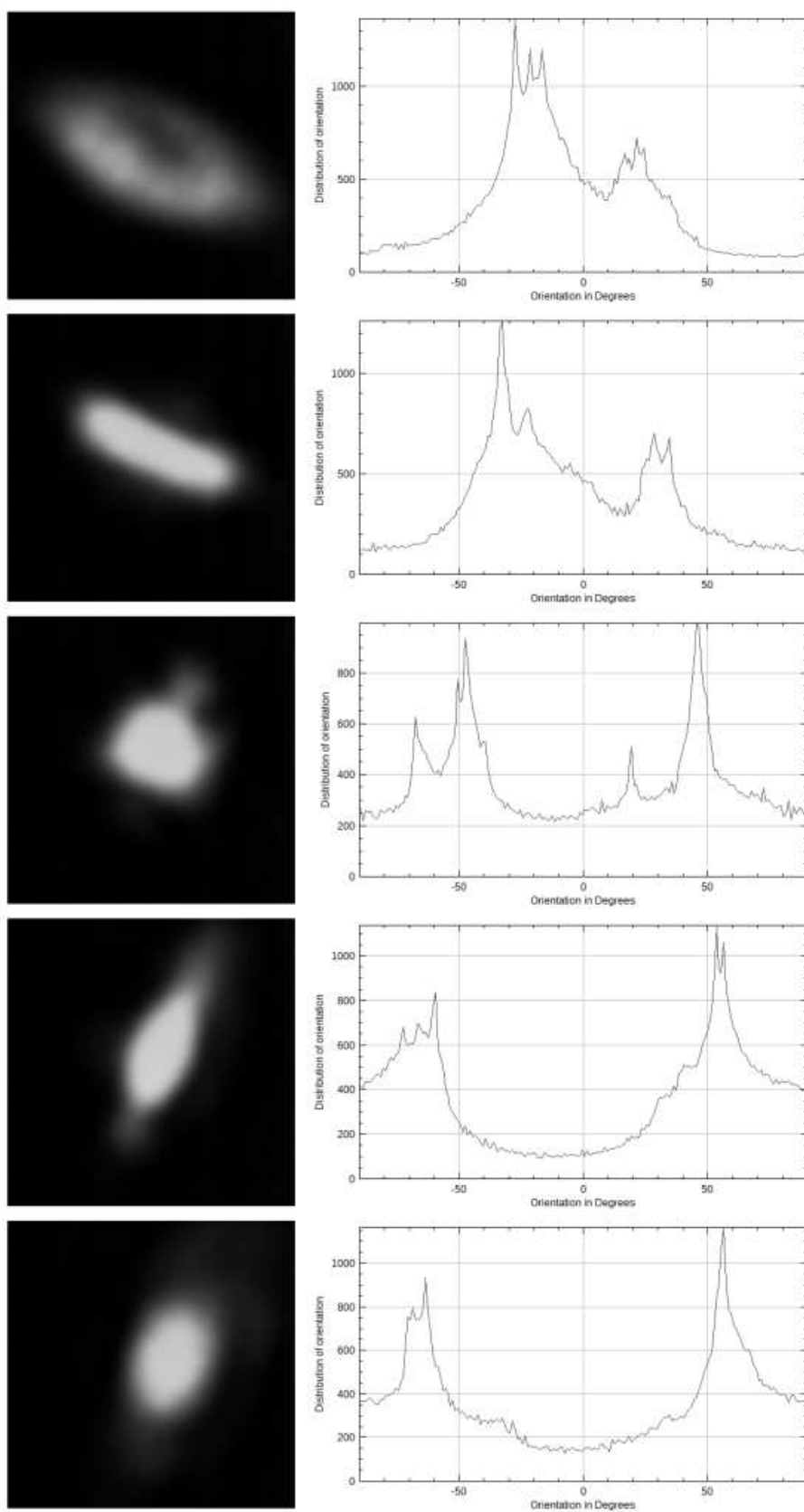


Рис. 9. Изменение профиля пучка при продольном перемещении линзы из положения (-200 мкм, +40 мкм, +40 мкм) с шагом 100 мкм

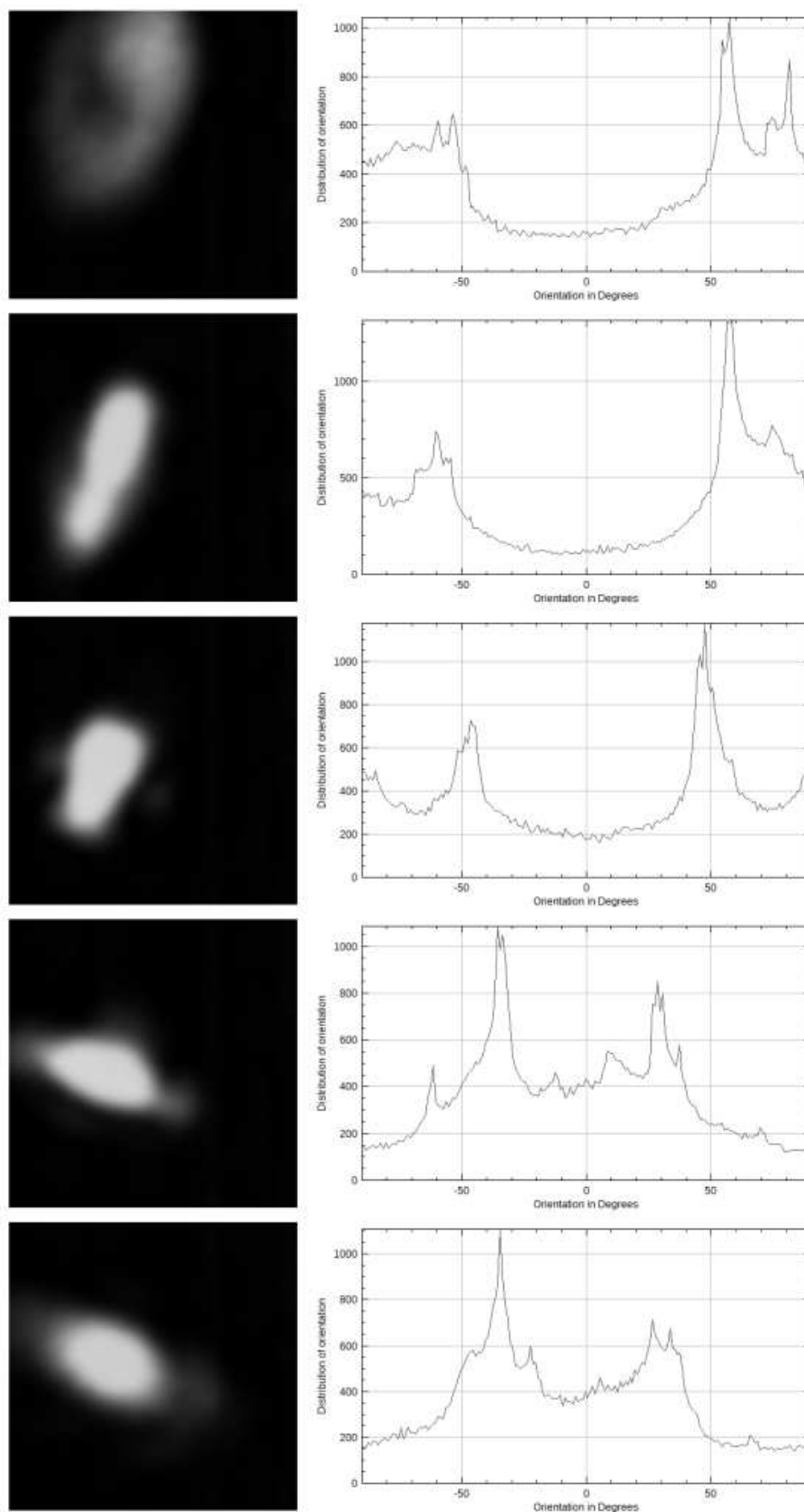


Рис. 10. Изменение профиля пучка при продольном перемещении линзы из положения (-200 мкм, -40 мкм, -40 мкм) с шагом 100 мкм

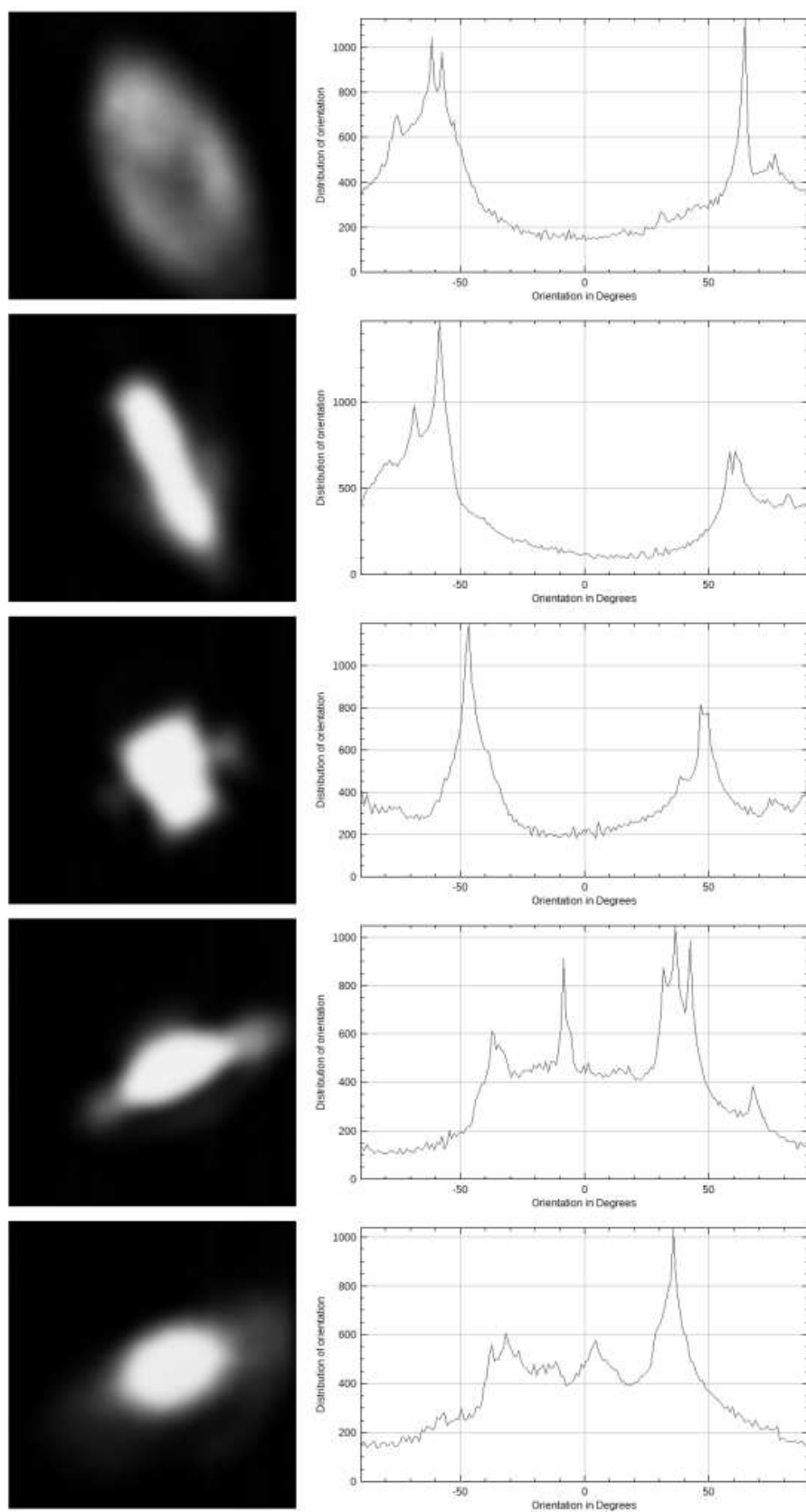


Рис. 11. Изменение профиля пучка при продольном перемещении линзы из положения (-200 мкм, -40 мкм, -40 мкм) с шагом 100 мкм

локального эллипсоида, связанного со значением проекции локальной скорости движения оптического потока вдоль выбранного направления:

$$\theta(s, t) = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2J_{yx}(x, y)}{J_{yy}(x, y) - J_{xx}(x, y)} \right), \quad u_x(x, y) = \operatorname{tg} \theta_x(x, y), \quad u_y(x, y) = \operatorname{tg} \theta_y(x, y).$$

Пример распределения значений ориентации в виде карт яркости представлен на рис. 5. Здесь и далее в качестве тестовых распределений выбрана серия сечений волновых пучков с рис. 2. Построение карты поля ориентаций выполнено по методу градиентов на основе фильтра Рица [7, 8], основанному на разложении моногенной функции локальной структуры по совокупности базисных функций с варьируемой ориентацией. Яркость пиксела на рис. 5 пропорциональна углу ориентации (минимум — $-\pi/2$, максимум — $+\pi/2$).

Помимо карты ориентаций для пространственного распределения интенсивности в сечении волнового пучка определим спектры распределения ориентаций, которые можно рассматривать как идентификаторы пучков. Ориентационные спектры уникальны для каждого пучка и могут быть положены в основу распознавания структуры, поскольку не меняются при масштабировании изображения.

Сводное отображение ориентации и согласованности структуры на поверхности сечения волнового пучка можно представить в условных цветах с дополнением яркости и насыщенности пикселя, пропорциональной интенсивности пучка, согласованности (насыщенность цвета) и ориентации (оттенок цвета), как это показано на рис. 7.

Группы профилей распределения интенсивности коллимированного волнового пучка и соответствующие им ориентационные спектры при изменении фокусного расстояния оптической системы даны на четырех сериях рисунков выше. Поскольку анализируются средние по ансамблю реализаций профили волнового пучка, закономерности перестройки тонкой структуры утеряны в результате усреднения. Точно определяется лишь поворот большей оси наблюдаемой фигуры на угол $\pi/2$ после прохождения области перетяжек волнового пучка.

Заключение. Представлены возможности метода анализа профиля интенсивности векторного пучка на выходе атмосферной трассы на основе тензоров второго ранга для дискретных разностей распределений интенсивности первого и второго порядков. Синтезируемые распределения поля значений позволяют описать топологию фазовой модуляции, контуров изменения распределений интенсивности, определить область локализации энергии пучка и оценить вариацию состояния поляризации. Дискретный дифференциальный анализ структуры временных рядов распределения интенсивности информативен для задач метеоконтроля ветровых и термических условий на трассе, детектирования типов рефракционных неоднородностей и анализа пространственно-временной оптической активности среды.

Разрешающая способность подобных методов ограничена апертурой наблюдения и глубиной модуляции уровня засветки. Рассмотренные дифференциальные характеристики пространственно-временной структуры позволяют классифицировать искажения профиля пучка по типам симметрии и направлению деформаций, связать наблюдаемые пространственные параметры с рефракционными режимами на трассе и в первом приближении восстановить основные направления фазовой модуляции в плоскости наблюдения. Дифференциальные параметры распределения интенсивности связаны с локальной вариацией фазы, вихревыми компонентами потока энергии и модуляцией оптической плотности среды распространения. Каждый из этих физических процессов имеет свой временной и пространственный масштабы проявления в наблюдаемом первичном распределении интенсивности. Сильная сторона тензорного дифференциального анализа структуры пучка в сравнении с распространенным методом центроида или аппроксимацией полиномами Цернике заключена в едином подходе к различным масштабам наблюдаемых искажений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Babanin E.A., Suhareva N.A., Vokhnik O.M., et al. Positional characteristics of generalized decentered elliptical Gaussian beams propagating through extended atmospheric paths // Proc. Int. Conf. Days on Diffraction (DD). New York: IEEE Press, 2017. 24–30.
2. Babanin E.A., Blank A.V., Nasonov A.A., Suhareva N.A. Profile management of astigmatic energy-carrying collimated beam // Proc. SPIE. Vol. 11208. 2019. doi 10.1117/12.2539070.
3. Волостников В.Г. Методы анализа и синтеза когерентных световых полей. М.: Физматлит, 2014.
4. Волостников В.Г. Современная оптика гауссовых пучков // Успехи физических наук. 2012. **182**, № 4. 442–450.
5. Jähne B. Digital image processing. Berlin: Springer, 2005.
6. Granlund G.H. In search of a general picture processing operator // Computer Graphics and Image Processing. 1978. **8**, N 2. 155–173.

7. Riesz R.R. Differential intensity sensitivity of the ear for pure tones // *Physical Review*. 1928. **31**. 867–875.
 8. Park C., Bridewell W., Langley P. Integrated systems for inducing spatio-temporal process models // *Proc. Twenty-Fourth AAAI Conference on Artificial Intelligence*. Palo Alto: AAAI Press, 2010. 1555–1560.

Поступила в редакцию
19.11.2019

Spatial Differential Analysis of the Intensity Distribution for a Collimated Wave Beam

A. V. Blank¹ and N. A. Suhareva²

¹ *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics; Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; Leading Programmer, e-mail: BlankArkadiy@physics.msu.ru*

² *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics; Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; Ph.D., Associate Professor, e-mail: Suhareva@phys.msu.ru*

Received November 19, 2019

Abstract: A method for the comparative analysis of intensity distribution profiles is proposed on the basis of the image structure tensor. The parameter set of the local tensor array introduced for each pixel of the recorded image is used to determine the spectrum of local orientations, the energy intensity profile of the image, and the coherency of its structure. The proposed method is important for the discrete analysis of space-time structures of wave beams transmitted through the regions of localized or distributed refractive noises.

Keywords: intensity profile of wave beam, structure tensor of image, structure consistency, energy capacity of structure, spectrum of local orientations.

References

1. E. A. Babanin, N. A. Suhareva, O. M. Vokhnik, et al., “Positional Characteristics of Generalized Decentered Elliptical Gaussian Beams Propagating through Extended Atmospheric Paths,” in *Proc. Int. Conf. Days on Diffraction (DD), St. Petersburg, Russia, June 19–23, 2017* (IEEE Press, New York, 2017), pp. 24–30.
2. E. A. Babanin, A. V. Blank, A. A. Nasonov, and N. A. Suhareva, “Profile Management of Astigmatic Energy-Carrying Collimated Beam,” *Proc. SPIE* **11208** (2019). doi 10.1117/12.2539070
3. V. G. Volostnikov, *The Methods of Analysis and Synthesis of Coherent Light Fields* (Fizmatlit, Moscow, 2014) [in Russian].
4. V. G. Volostnikov, “Modern Optics of Gaussian Beams,” *Usp. Fiz. Nauk* **182** (4), 442–450 (2012) [*Phys. Usp.* **55** (4), 412–420 (2012)].
5. B. Jähne, *Digital Image Processing* (Springer, Berlin, 2005).
6. G. H. Granlund, “In Search of a General Picture Processing Operator,” *Comput. Graphics Image Process.* **8** (2), 155–173 (1978).
7. R. R. Riesz, “Differential Intensity Sensitivity of the Ear for Pure Tones,” *Phys. Rev.* **31**, 867–875 (1928).
8. C. Park, W. Bridewell, and P. Langley, “Integrated Systems for Inducing Spatio-Temporal Process Models,” in *Proc. Twenty-Fourth AAAI Conference on Artificial Intelligence, Atlanta, USA, July 11–15, 2010* (AAAI Press, Palo Alto, 2010), pp. 1555–1560.