



ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ФРАКТАЛЬНЫХ СТРУКТУР БИОТКАНЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СПЕКЛ-КОРРЕЛОМЕТРИИ

Д. А. Зимняков, В. В. Тучин, А. А. Мишин

Рассмотрены вопросы формирования спекл-полей в дальней зоне дифракции при рассеянии когерентных пучков на фрактальных структурах в рамках модели случайного фазового экрана. Исследована взаимосвязь между параметрами структурных функций флуктуаций фазы граничного поля и интенсивности спеклов в дальней зоне. Разработана методика визуализации структур биотканей путем локальных оценок значений экспоненциального фактора структурной функции флуктуаций интенсивности. Эксперименты с образцами эпидермиса кожи человека на разных стадиях поражения псориазом показали, что подобные двумерные изображения структуры, полученные с помощью сканирующего спекл-коррелометра, адекватно отражают эволюцию структуры эпидермиса по мере развития очага поражения.

Введение

В настоящее время одним из важных направлений морфологического анализа клеточных препаратов и структур является разработка методов и средств исследования общих свойств структур анализируемых объектов, связанных с понятием «фрактальность». Подобные свойства проявляются, в частности, в некоторых особенностях пространственных распределений рассеянных полей, формируемых в результате некогерентного или когерентного освещения биотканей.

Когерентно-оптические методы морфологического анализа биологических объектов являются в настоящее время одним из основных приложений статистической и корреляционной оптики в исследованиях структуры оптически неоднородных объектов и сред [1]. Как правило, область их применения в основном ограничена случаями оптически тонких рассеивателей, создающих фазовую модуляцию зондирующих когерентных пучков и допускающих интерпретацию в рамках скалярной теории дифракции с использованием модели фазового экрана [2]. В качестве анализируемых характеристик спекл-полей, формируемых в дальней зоне дифракции при когерентном освещении исследуемых структур, обычно используются нормированные значения статистических моментов флуктуационной компоненты интенсивности [3-5] (например, контраст спекл-поля выражается через нормированный момент второго порядка и т.д.) или ее корреляционные характеристики (длина корреляции, которая связана со

средним размером спеклов в регистрируемом спекл-поле). В рамках модели случайного фазового экрана (СФЭ), описываемого параметрами пространственного распределения фазы формируемого граничного поля при освещении СФЭ широким коллимированным пучком, взаимосвязь между структурными характеристиками объекта и статистическими свойствами соответствующего спекл-поля может быть получена аналитически [6]. Полученные таким образом значения (например, характерный размер элементарных рассеивателей, образующих структуру объекта, и среднее значение величины флуктуаций показателя преломления) относятся к интегральным морфологическим характеристикам исследуемого образца. Вместе с тем значительный интерес могут представлять методы визуализации структуры, основанные на локальных оценках корреляционных свойств флуктуаций рассеянного поля. В данном случае более предпочтительной для описания статистики второго порядка флуктуаций интенсивности в дальней зоне является структурная функция [2] как объект, более чувствительный, чем автокорреляционная функция, к поведению флуктуационной компоненты в области малых пространственных масштабов. В работе рассматривается методика построения двумерных изображений структуры биотканей с использованием локальных оценок такого параметра структурной функции флуктуаций интенсивности спеклов, как экспоненциальный фактор, при сканировании исследуемого образца когерентным зондирующим пучком. Подобный подход может быть условно назван «пространственной спекл-коррелометрией».

Значение экспоненциального фактора двумерного случайного изотропного распределения однозначно связано с такой его характеристикой, как фрактальная (хаусдорфова) размерность. В связи с этим метод пространственной спекл-коррелометрии представляет интерес с точки зрения морфологического анализа структур биотканей с фрактальными свойствами.

1. Взаимосвязь между корреляционными и фрактальными параметрами фазы граничного поля и интенсивности спеклов в дальней зоне

Для дальнейшего анализа рассмотрим взаимосвязь между характеристиками структурных функций флуктуаций фазы граничного поля и интенсивности рассеянного поля в дальней зоне дифракции. Структурная функция флуктуаций фазы граничного поля для изотропного и статистически однородного СФЭ может быть представлена следующим соотношением [7]:

$$D_{\phi}(\Delta \mathbf{r}) = \langle (\phi(\mathbf{r} + \Delta \mathbf{r}) - \phi(\mathbf{r}))^2 \rangle \cong C_{\phi} L_{\phi}^{2-\nu_{\phi}} |\Delta \mathbf{r}|^{\nu_{\phi}}, \quad (1)$$

в котором подразумевается усреднение по ансамблю реализаций фазовой функции пропускания объекта. Экспоненциальный фактор ν_{ϕ} описывает асимптотические свойства структурной и корреляционной функций при $|\Delta \mathbf{r}| \rightarrow 0$. Параметр L_{ϕ} , имеющий размерность длины и называемый топотезой, в соответствии с [8] равен расстоянию между двумя точками на поверхности, описываемой функцией $\phi(x,y)/C_{\phi}^{0.5}$, для которого среднее значение тангенса угла наклона отрезка, соединяющего эти точки, равно 1. Нормировочный коэффициент C_{ϕ} имеет размерность, обратно пропорциональную квадрату длины.

Со значением экспоненциального фактора ν_{ϕ} тесно связана такая характеристика распределений фазы граничного поля, как их фрактальная (хаусдорфова) размерность $D_{\text{НВ}}$ [7,8]. В частности, для произвольным образом выбранной одномерной реализации распределения $\phi(x,y)$ (его одномерного «среза») выполняется соотношение

$$\nu_{\phi} = 2(2 - D_{\text{НВ}}). \quad (2)$$

При этом хаусдорфова размерность изотропного двумерного распределения

больше соответствующей размерности одномерной реализации на 1 [9].

Для непрерывных многократно дифференцируемых распределений фазы $\nu_\phi = 2$ и $D_{\text{НВ}}=1$. Для непрерывных, но не дифференцируемых распределений, порождаемых, например, рассеивателями с фрактальной структурой, $0 < \nu_\phi < 2$ и $1 < D_{\text{НВ}} < 2$. В [8] выделены следующие характерные примеры двумерных непрерывных распределений, удовлетворяющих условию $D_{\text{НВ}} \geq D_E$, где D_E - соответствующая топологическая размерность (для одномерных реализаций фазы $D_E=1$):

а) $\nu_\phi=0$; $D_{\text{НВ}}=2$ - «предельный» фрактал (extreme fractal);

б) $\nu_\phi=1$; $D_{\text{НВ}}=1.5$ - броуновский фрактал (Brownian fractal);

в) $\nu_\phi=2$; $D_{\text{НВ}}=1$ - «маргинальный» фрактал (marginal fractal), или «обычное»,

непрерывное и дифференцируемое распределение фазы.

Случай «б» может соответствовать изотропным распределениям фазы, порождаемым так называемым процессом Орнштейна-Уленбека [10] с нормированной автокорреляционной функцией вида $\exp(-|\Delta r|)$. Для фазовых экранов рассматриваемого типа характерны степенные зависимости спектральной плотности флуктуаций фазы граничного поля в области высоких пространственных частот с показателями степени, определяемыми значениями экспоненциальных факторов ν_ϕ (и, соответственно, $D_{\text{НВ}}$) [8]. Необходимо отметить, что реально существующие распределения фазы могут демонстрировать фрактальные свойства только в конечном диапазоне пространственных масштабов, верхняя граница которого определяется размерами рассеивателя, а нижняя - соответственно длиной волны освещающего пучка. Как правило, для наблюдаемых на практике рассеивающих объектов, удовлетворяющих моделям фрактальных фазовых экранов, данные особенности (степенной характер спектральной плотности, значения ν_ϕ , меньше 2) могут быть зафиксированы в существенно более узком интервале пространственных масштабов; подобные объекты могут быть отнесены к классу так называемых «физических» фракталов или фракталов с ограниченной полосой частот [11]. Рассмотрим взаимосвязь между значениями экспоненциальных факторов флуктуаций фазы ν_ϕ и интенсивности рассеянного поля ν_I при движении рассеивателя в направлении, перпендикулярном оси освещающего пучка. Для рассеивателей с гауссовой статистикой фазы граничного поля при использовании в качестве освещающего широкого коллимированного пучка с однородным распределением амплитуды по сечению подобная взаимосвязь может быть получена исходя из выражения для поперечной функции когерентности поля [2]

$$\Gamma_U(\Delta \mathbf{p}) = \langle U(\mathbf{p})U^*(\mathbf{p} + \Delta \mathbf{p}) \rangle = \exp(-0.5 D_\phi(\Delta \mathbf{p})). \quad (3)$$

Здесь, как и ранее, предполагается усреднение по ансамблю реализаций фазовой функции пропускания рассеивателя, $U(\mathbf{p})$ и $U^*(\mathbf{p})$ - комплексная амплитуда граничного поля и сопряженная величина в точке с радиус-вектором \mathbf{p} . С другой стороны, автокорреляционная функция флуктуаций интенсивности рассеянного поля в дальней зоне выражается следующим образом:

$$R_I(\Delta \mathbf{p}) = |\Gamma_U(\Delta \mathbf{p})|^2 - |\nu_0|^4, \quad (4)$$

где $|\nu_0|$ - модуль средней амплитуды граничного поля. Подставляя выражение (3) в (4) и используя взаимосвязь между структурной и корреляционной функциями, можно получить, что

$$D_I(\Delta \mathbf{r}) \cong 2D_\phi(\Delta \mathbf{r}) \quad (5)$$

при $|\Delta \mathbf{p}| \rightarrow 0$ и равенстве 1 модуля комплексной амплитуды исходного освещающего

пучка. Таким образом, для развитых спекл-полей [12], порождаемых рассеивающими объектами с гауссовой статистикой фазы граничного поля, в области малых пространственных масштабов имеет место равенство экспоненциальных факторов ν_1 и ν_ϕ , следующее из уравнения (5).

При использовании в качестве освещающих когерентных сфокусированных пучков характер взаимосвязи между величинами ν_1 и ν_ϕ становится более сложным. В частном случае остросфокусированных пучков с квазиоднородным пространственным спектром можно показать, используя взаимосвязь между автокорреляционной функцией и спектральной плотностью флуктуационной компоненты изотропного двумерного случайного процесса [7], что

$$\nu_1 = 2\nu_\phi - 2. \quad (6)$$

Выражение (6) позволяет сделать несколько любопытных заключений относительно свойств флуктуационной компоненты интенсивности рассеянного поля, формируемого при сканировании фрактальных рассеивателей остросфокусированными когерентными пучками. Очевидно, что функция $I(x,y)$ описывающая мгновенное значение интенсивности в параксиальной области дальней зоны при сканировании фрактального СФЭ в направлениях (x,y) , перпендикулярных оси освещающего пучка, также будет являться фрактальным двумерным распределением с хаусдорфовой размерностью, превышающей соответствующую размерность распределения фазы граничного поля. Предельным случаем является сканирование «броуновского» СФЭ с $\nu_\phi=1$, порождающее распределение флуктуаций интенсивности, которое относится к «предельным» (extreme) фрактальным распределениям с $\nu_\phi=0$ и $D_{\text{нв}}=2$. Вместе с тем для «маргинальных» фрактальных рассеивателей характерно равенство экспоненциальных факторов и хаусдорфовых размерностей флуктуаций фазы и интенсивности как в случае сканирования широким коллимированным пучком с однородным распределением амплитуды, так и в случае сканирования остросфокусированным пучком. Таким образом, схема формирования динамического частично развитого спекл-поля при сканировании фрактальных СФЭ остросфокусированным когерентным пучком может быть интерпретирована как «усилитель хаоса», приводящий к возрастанию хаусдорфовой размерности флуктуационной компоненты интенсивности по сравнению с исходной размерностью фазы граничного поля [13]. Оценки значения ν_1 в результате анализа асимптотического поведения корреляционной или структурной функции флуктуаций интенсивности спеклов в параксиальной области дальней зоны могут быть использованы для описания высокочастотной составляющей структуры рассеивающих объектов; при этом переход к значениям ν_ϕ , характеризующим двумерное распределение фазы, в зависимости от условий освещения объекта производится либо исходя из равенства ν_ϕ и ν_1 , либо в соответствии с выражением (6).

Применение метода вычисления ν_1 по конечному числу отсчетов интенсивности, меньшему, чем общий объем выборки при сканировании по трассе заданной длины («скользящее окно» для выборки данных) позволяет осуществлять двумерную визуализацию данных с использованием экспоненциального фактора флуктуаций интенсивности как параметра визуализации. В данном случае двумерное сканирование осуществляется по схеме растровой развертки, а локальные оценки ν_1 могут быть сделаны в соответствии со следующим выражением:

$$\nu_1(i,j) \cong 1.44(\ln\{\sum_{k=i-M}^{k=i+M}[I(k+2p,j) - I(k,j)]^2\} - \ln\{\sum_{k=i-M}^{k=i+M}[I(k+p,j) - I(k,j)]^2\}). \quad (7)$$

Здесь i - текущий номер отсчета вдоль строки раstra сканирования, определяющий положение центра «скользящего окна»; M - число шагов дискретизации, определяющее полуширину окна; j - номер обрабатываемой

строки растра; p - число шагов дискретизации, определяющее интервал, используемый для оценки экспоненциального фактора v_i ; $I(i,j)$ - дискретный отсчет интенсивности спекл-поля в точке растра сканирования с координатами (i,j) . Использование подобной процедуры будет приводить к анизотропии формируемого двумерного изображения, обусловленной существенно одномерным характером обработки регистрируемого двумерного массива (ориентацией «скользящего окна» вдоль строк растра). Данная анизотропия связана прежде всего с различной разрешающей способностью используемого алгоритма вдоль строк растра и в перпендикулярном направлении и может быть устранена в результате применения специальных корректирующих цифровых фильтров или двумерного «скользящего окна». Недостатком последнего способа является существенное увеличение вычислительных затрат по сравнению с «одномерным» алгоритмом, описываемым выражением (7).

2. Эксперименты с пространственным спекл-коррелометром

Были проведены экспериментальные исследования по предложенной методике; в качестве исследуемых объектов были использованы отрывы эпидермиса нормальной и пораженной псориазом кожи человека на разных стадиях заболевания. Исследуемые образцы представляли собой тонкие (30-50 мкм) поверхностные слои эпидермиса площадью от 1 до 3 см², фиксируемые на стеклянных подложках с помощью медицинского клея. Проведенные ранее исследования формирования спеклов при рассеянии лазерных сфокусированных пучков в слоях эпидермиса [14] показали существенное влияние процесса возникновения и развития фокусов паракератоза на пораженных псориазом участках на корреляционные свойства флуктуаций интенсивности спеклов. Развитие паракератоза носит преимущественно очаговый характер; средние размеры элементов структуры - порядка 0.3-0.7 мм. Плотность очагов на свежепораженных участках может достигать 50 и более. Эти особенности структуры проявляются в специфическом поведении автокорреляционной функции интенсивности (возрастание полуширины главного автокорреляционного пика и появление сравнительно высокоамплитудных низкочастотных флуктуаций на ее «хвосте» для образцов эпидермиса, пораженного псориазом) [14]. Кроме того, асимптотические характеристики структурной и автокорреляционной функций флуктуаций интенсивности (в частности, значение v_0) также должны быть весьма чувствительны к структурным изменениям эпидермиса, обусловленным развитием псориаза. Исследования проводились с помощью сканирующего спекл-коррелометра, оптическая схема которого представлена на рис. 1. В качестве источника излучения использован одномодовый He-Ne лазер 1. Для формирования зондирующего пучка применяется телескопическая система-расширитель 2. Фокусировка изображения на исследуемый образец 4 осуществляется фокусирующим объективом 3. С помощью двухкоординатного сканирующего устройства 5 производится перемещение исследуемого объекта в плоскости (x,y) , перпендикулярной оптической оси системы. Фотодетектор 7 (ФЭУ с точечной диафрагмой) расположен на расстоянии z от объекта, удовлетворяющем критерию дальней зоны дифракции для используемых размеров освещаемого участка объекта. В схеме также используется фурье-преобразующий объектив 6, при этом $z=2f$, где f - фокусное расстояние фурье-объектива. Аналого-цифровое преобразование мгновенных значений интенсивности и управление шаговыми приводами сканирующего устройства осуществляется с помощью интерфейсного блока 8, подключенного к системной шине персонального компьютера, используемого для управления спекл-коррелометром и обработки результатов анализа. Минимальная величина шага сканирования, обеспечиваемая шаговыми приводами сканирующего устройства при сканировании по координатам (x, y) , равна 5 мкм. Для увеличения разрешающей способности при регистрации фотоэлектрического сигнала

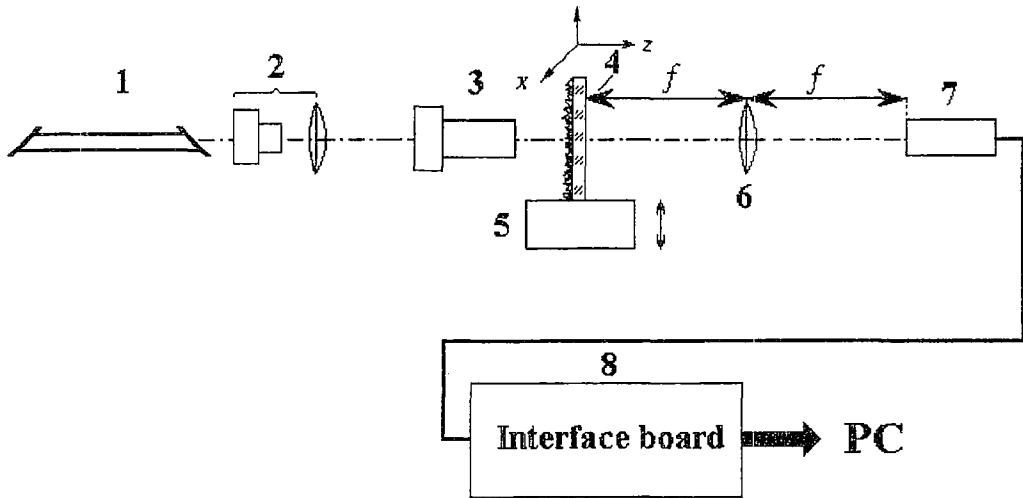


Рис. 1. Оптическая схема сканирующего спекл-коррелометра. 1 - He-Ne лазер, 2 - телескопическая система, 3 - фокусирующий объектив, 4 - исследуемый образец, 5 - сканирующее устройство, 6 - фурье-преобразующий объектив, 7 - фотодетектор, 8 - интерфейсный блок

использован следующий прием: частота синхронизации аналого-цифрового преобразования существенно выше, чем тактовая частота управления шаговым приводом при сканировании по строке раstra. При отношении этих двух частот, равном 20, и тактовой частоте, равной 1 кГц (в данном случае обеспечивается квазиравномерное движение объекта со скоростью 5 мм/с), величина шага дискретизации флуктуаций интенсивности равна 0.25 мкм. Фрагменты полученных двумерных изображений структуры эпидермиса кожи представлены на рис. 2. Рис: 2, а соответствует структуре здорового эпидермиса, а рис. 2, б-г - различным

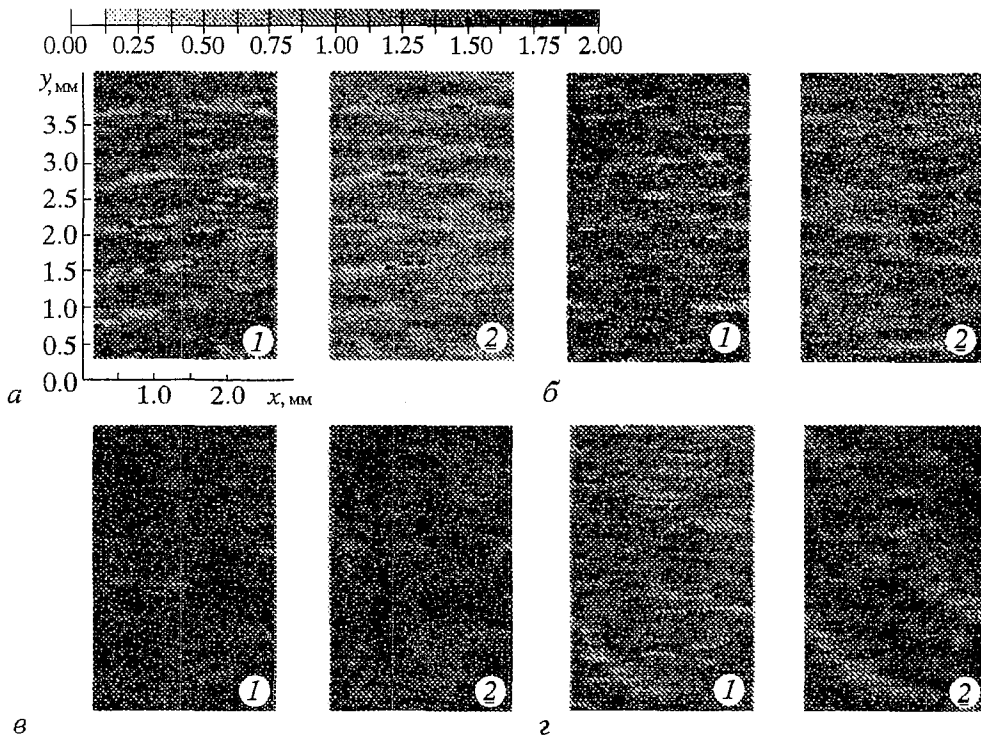


Рис. 2. Двумерные изображения структуры эпидермиса человеческой кожи для различных стадий псориаза при освещении образца эпидермиса широким пучком (1) и острогофокусированным пучком (2): а - нормальная кожа; б - начальная стадия развития псориаза; в - промежуточная стадия; г - поздняя стадия

стадиям поражения псориазом. При построении двумерных распределений экспоненциального фактора v_1 использовано «скользящее окно» шириной 1000 шагов дискретизации (250 мкм), что существенно превышает ширину главного автокорреляционного пика флуктуационной компоненты интенсивности спеклов. Цифрой 1 помечены изображения, соответствующие случаю сканирования исследуемых объектов широким зондирующим пучком (образцы располагались на расстоянии порядка 2.0 - 2.5 мм (приблизительно $(60 - 80)R$) от плоскости перетяжки пучка; здесь R - конфокальный параметр освещающего пучка [15]), а цифрой 2 - сфокусированным пучком (образцы располагались в плоскости перетяжки). Для первого случая характерна конечная кривизна радиуса волнового фронта освещающего пучка, в то время как проведенный ранее анализ соответствует коллимированным пучкам с плоским волновым фронтом и однородным распределением амплитуды. Тем не менее, проведенные оценки позволяют утверждать, что при используемой геометрии эксперимента влияние фазовой компоненты апертурной функции зондирующего пучка вследствие конечной кривизны его волнового фронта на характеристики высокочастотной составляющей интенсивности в рассматриваемом диапазоне пространственных масштабов (0.25 - 5.0 мкм) можно пренебречь.

3. Обсуждение результатов

Полученные изображения качественно отображают эволюцию структурных изменений эпидермиса, обусловленную прогрессированием заболевания. Для здоровой кожи характерно структурированное изображение с относительно малыми значениями v_1 , что обусловлено сильным рассеянием зондирующего пучка клеточной структурой здоровой кожи, характеризуемым относительно медленным спадом спектральной плотности флуктуаций интенсивности в области высоких пространственных частот (см. рис. 2, а). По мере развития псориазического поражения, наряду с возникновением очагов паракаротоза происходит насыщение окружающих их тканей тканевыми жидкостями [16], снижающими величину флуктуаций показателя преломления в исследуемом объеме (иммерсионный эффект), в результате чего скорость спада спектральной плотности флуктуаций интенсивности в высокочастотной области может существенно возрасти, приводя к увеличению v_1 (см. рис. 2, б, в - начальная и промежуточная стадии развития псориазической бляшки). На поздних стадиях наблюдается уменьшение среднего значения v_1 и возрастание его дисперсии, обусловленное разрыхлением структуры эпидермиса вследствие образования микрополостей с воздушным заполнением и частичным отделением фрагментов верхних слоев («scaling», «desquamation stage» [17]).

Различие между изображениями структуры в случаях 1 и 2 обусловлено «хаотизацией» флуктуационной компоненты спекл-поля при использовании остросфокусированных освещающих пучков, в соответствии с выражением (6). Поскольку статистика распределений фазы, порождаемых исследуемыми объектами, может существенно отличаться от гауссовой, точная аналитическая связь между значениями v_1 для различных условий освещения объекта может быть иной, чем предписываемая выражением (6). Тем не менее, эффект «хаотизации» наблюдается и может быть использован для контрастирования изображений структур биотканей, получаемых в соответствии с предложенной методикой.

Возникает вопрос о применимости понятий теории фрактальных структур [9] (хаусдорфова размерность, фрактальные распределения) для данного случая. Определяемые в эксперименте значения экспоненциального фактора являются обобщенными параметрами, описывающими исследуемые объекты в области высоких пространственных частот (в частности, величину наклона их пространственных спектров в логарифмических координатах) и непосредственно связанными с такими их свойствами, как самоподобие [8,9]. Поскольку оценки значений v_1 производятся на конечном интервале пространственных масштабов,

характеризуемом параметром $\mu = \ln(\Delta_{\max}/\Delta_{\min})$ (в рассматриваемом случае $\mu = \ln(5.0/0.25) \approx 3.0$), имеет смысл говорить о полосно-ограниченных фрактальных структурах. В литературе подобные объекты часто называются «предфрактальными структурами», или «предфракталами» (pre-fractals) [18,19].

Заключение

На наш взгляд, разработанная методика визуализации структуры биологических и медицинских объектов с использованием сканирующего спекл-коррелометра, основанная на локальных оценках значений экспоненциального фактора структурной функции флуктуаций интенсивности спеклов, представляет интерес с точки зрения задач мониторинга структур биотканей оптоэлектронными и лазерными методами. Учет взаимосвязи асимптотических характеристик структурной функции с фрактальной (хаусдорфовой) размерностью при построении двумерных изображений рассмотренного типа позволит осуществлять селекцию участков со специфическими параметрами структурных характеристик, обусловленными особенностями развития тканей. Представляется весьма актуальной разработка комплексного подхода к анализу подобных особенностей, основанного на использовании сканирующего спекл-коррелометра в комбинации с традиционными методами исследования биотканей (традиционная и люминесцентная микроскопия, спектрофотометрические исследования).

Библиографический список

1. *Tuchin V.V. Tissue Optics: Applications in Medical Diagnostics and Therapy // SPIE Milestone Ser. Vol. MS 102. Bellingham (USA), 1994.*
2. *Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Ч.2. Случайные поля. М.: Наука, 1978.*
3. *Jakeman E. Speckle statistics with a small number of scatterers // Optical Engineering. 1984. Vol. 23, № 4. P. 453.*
4. *Briers J.D. Speckle fluctuations and biomedical optics: implications and applications // Optical Engineering. 1993. Vol. 32. P. 277.*
5. *Zimnyakov D.A., Tuchin V.V., Utz S.R. Human skin epidermis structure investigations using coherent light scattering // Proc. SPIE. 1994. Vol. 2100. P. 218.*
6. *Kadono H., Asakura T., Takai N. Roughness and correlation length measurements of rough surface objects using the speckle contrast in the diffraction field // Optik. 1988. Vol. 80, № 3. P.115.*
7. *Джейкмен Э. Рассеяние на фракталах // Фракталы в физике: Тр. VI междунар. симпоз. по фракталам в физике. М.: Мир, 1988. С. 82.*
8. *Church E.L. Fractal surface finish // Appl. Opt. 1988. Vol. 27, № 8. P. 1518.*
9. *Мандельброт Б. Самоафинные фрактальные множества // Фракталы в физике: Тр. VI междунар. симпоз. по фракталам в физике. М.: Мир, 1988. С. 9.*
10. *Лидбеттер М., Ротсен Х., Линдгрэн Т. Экстремумы случайных последовательностей и процессов. М.: Мир, 1989.*
11. *Jaggard D.L., Kim Y. Diffraction by band-limited fractals // JOSA A. 1987. Vol. 4, № 6. P. 1056.*
12. *Dainty J.C. Laser speckle and related phenomena // Topics in applied physics. Berlin, Springer, 1975. Vol. 9.*
13. *Ангельский О.В., Максимьяк П.П., Перун Т.О. Корреляционно-оптический метод оценки размерности пространственного хаоса в оптических полях // Оптика и спектроскопия. 1992. Т. 73, № 5. С. 926.*
14. *Зимняков Д.А., Тучин В.В., Утц С.Р. Исследование статистических свойств частично развитых спекл-полей применительно к диагностике структурных изменений кожи человека // Оптика и спектроскопия. 1994. Т. 76, № 5. С. 838.*
15. *Ринкевичюс Б.С. Лазерная диагностика потоков. М.: Изд-во МЭИ, 1990.*

16. *Zimnyakov D.A., Tuchin V.V., Utz S.R., Mishin A.A.* Speckle-imaging methods using focused laser beams in application to tissues mapping // Proc. SPIE. 1995. Vol. 2433, № 47.

17. *Tuchin V.V., Utz S.R., Yaroslavsky I.V.* Tissue optics, light distribution and spectroscopy. Optical Engineering. 1994. Vol. 10. P. 3178.

18. *Шкуратов Ю.Г.* Фотометрические свойства физических фракталов // Оптика и спектроскопия. 1995. Т. 79, № 1. С. 110.

19. *Sakyra Y., Uozumi J., Asakura T.* Diffraction fields of fractally bounded apertures // Optical Review, Sample Issue. 1994. P. 12.

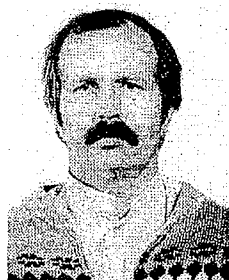
*Саратовский государственный
университет
СФ Институт машиноведения РАН*

Поступила в редакцию 27.10.95

IMAGING OF THE BIOTISSUES FRACTAL STRUCTURES USING SPATIAL SPECKLE-CORRELOMETRY TECHNIQUE

D.A. Zimnyakov, V.V. Tuchin, A.A. Mishin

Far-zone speckles formation due to coherent beam diffraction on fractal structures is discussed using the random phase screen approach. Relationship between parameters of the structure functions of boundary field phase and speckle intensity fluctuations has been analyzed. Biotissues structure imaging technique using local estimations of the intensity exponential factor has been developed. Experiments with psoriasis human epidermis using scanning speckle-correloimeter have shown the adequacy of the obtained 2D-images to structure evolution character caused by disease progress.



Зимняков Дмитрий Александрович - родился в 1956 г. в Саратове, окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1978). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук в Московском институте приборостроения (1989) в области разработки методов и средств контроля материалов, веществ и изделий. В настоящее время является докторантом кафедры оптики СГУ. Им опубликовано более 30 научных статей. Область научных интересов - статистическая и корреляционная оптика и ее метрологические приложения.



Тучин Валерий Викторович - кандидат физико-математических наук с 1973 г., доктор физико-математических наук с 1982 г., профессор, заведующий кафедрой оптики СГУ, заведующий лабораторией Саратовского филиала ИМАШ РАН. Круг его научных и педагогических интересов включает физику лазеров, нелинейную динамику лазерных и оптических систем, биомедицинскую оптику и физику оптических измерений. Он автор или редактор 16 книг и глав в книгах, автор или соавтор 23 изобретений, более 150 статей. Действительный член Международной Академии Информатизации, член Международных Обществ по оптической технике SPIE, по биомедицинской оптике BIOS и по лазерам и электрооптике LEOS, член Совета Российского отделения SPIE/RUS.

