

Э. Г. ГОНЧАРОВ, Л. Г. КОВАЛЕНКО

(Ленинград)

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ДВУМЕРНОГО СЛУЧАЙНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ И ОЦЕНКИ СТРУКТУРНЫХ ПРИЗНАКОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ

При решении задач распознавания изображения большое значение имеет использование в качестве эталона для сравнения изображений модели двумерного поля. Варьируя значения параметров модели и добиваясь совпадения характеристик модели и реального изображения, можно описать это изображение совокупностью значений некоторых параметров, т. е. идентифицировать его. Более того, с помощью модели выявляются и количественно оцениваются такие структурные признаки изображения, точная экспериментальная оценка которых затруднительна. Под структурными признаками понимаются параметры, определяющие структуру изображения, в частности распределение фигур, составляющих изображение, по форме, размерам, ориентации, коэффициенту пропускания (если изображение зафиксировано на фотопленке), плотности расположения центров фигур. Использование модели играет особую роль в обработке результатов исследования случайных физических полей, регистрируемых оптическим методом, например, поля прозрачных неоднородностей в различных средах, в частности в турбулентной среде. В исследованиях такого рода для визуализации оптических неоднородностей применяются теневые приборы с фоторегистрацией, а информация о развитии течения задается серией теневых картин, зафиксированных в последовательные моменты времени. В этом случае выявленная с помощью модели трансформация структурных признаков последовательного ряда изображений отражает изменение характера распределения неоднородностей и позволяет выявить изменение во времени структуры этих неоднородностей.

На рис. 1 (позиции 1—7) показан ряд теневых картин распределения неоднородностей в жидкости, полученных при обтекании цилиндра. Теневые изображения, зафиксированные на фотопленке, характеризуются флуктуациями коэффициента пропускания фотослоя в площади изображения. При этом одной из основных характеристик случайного двумерного поля распределения коэффициента пропускания зафиксированного на фотопленке теневого изображения является энергетический спектр $G_T(p, q)$, называемый иначе спектром Винера. Именно по этой характеристике сравниваются свойства реального изображения и модели двумерного поля, и поэтому определение спектра Винера теневых изображений представляется первоочередной задачей. Для оценки спектра с целью упрощения аппаратуры анализа имеет смысл использовать аналоговые устройства обработки оптических сигналов, в которых применяются одноканальные регистраторы, работающие в реальном масштабе времени. При этом преобразование оптического сигнала во временной производится путем сканирования зафиксированного на фотопленке теневого изображения узкой щелевой диафрагмой, за которой располагается фотоприемник. Полученный в результате обработки временного электрического сигнала его энергетический спектр $g(\omega)$ определяет одномерное сечение спектра Винера:

$$g(\omega) = A G_T(p, 0). \quad (1)$$

Для расчета коэффициента A записывается известное выражение [1], связывающее при сканировании со скоростью v энергетический

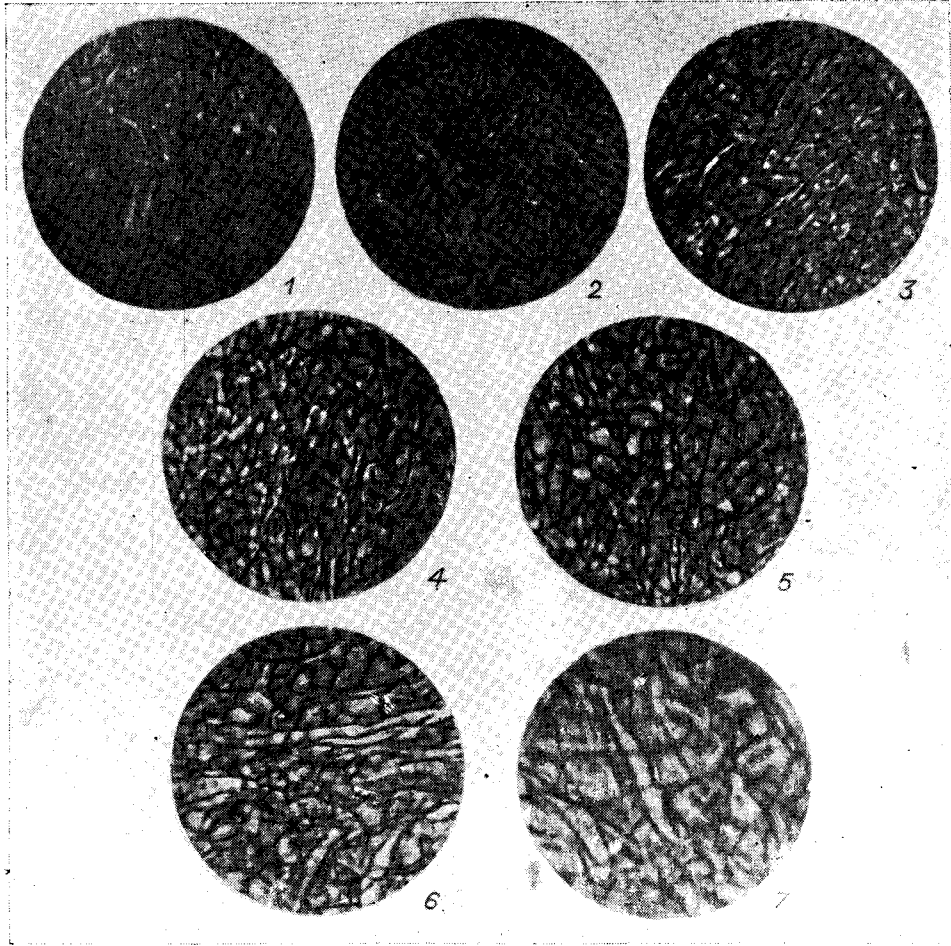


Рис. 1. Теневые картины, зафиксированные в последовательные моменты времени.

спектр временного сигнала и спектр Винера двумерного поля:

$$g(\omega) = \frac{1}{2\pi\omega} \int_{-\infty}^{\infty} G_T(p, q) K_{\xi}(p, q) dq, \quad (2)$$

где $K_{\xi}(p, q)$ есть фурье-преобразование функции вида

$$K_{\xi}(\Theta_1, \Psi_1) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(\Theta, \Psi) h(\Theta + \Theta_1, \Psi + \Psi_1) d\Theta d\Psi$$

(здесь $h(\Theta, \Psi)$ — функция импульсной реакции сканирующей системы).

При сканировании прямоугольной щелью имеем

$$g(\omega) = \frac{1}{2\pi\omega} \frac{\sin^2\left(\frac{pa}{2}\right)}{\left(\frac{pa}{2}\right)^2} \int_{-\infty}^{\infty} G_T(p, q) \frac{\sin^2\left(\frac{qb}{2}\right)}{\left(\frac{qb}{2}\right)^2} dq, \quad (3)$$

где a, b — размеры щели.

Если сканирование осуществляется длинной узкой щелью ($b \gg a$), при этом a меньше, а b значительно больше интервала корреляции исследуемого двумерного поля, это выражение приводится к виду [2]

$$g(\omega) = \frac{c^2}{vb} \frac{\sin^2\left(\frac{pa}{2}\right)}{\left(\frac{pa}{2}\right)^2} G_T(p, 0), \quad (4)$$

где C — фотоэлектрическая постоянная. Из (1) и (4) следует, что

$$A = \frac{c^2}{vb} \left[\sin^2\left(\frac{pa}{2}\right) / \left(\frac{pa}{2}\right)^2 \right].$$

На основе данных об электрическом сигнале на выходе фотоприемника можно определить и некоторые другие параметры распределения коэффициента пропускания, в том числе его математическое ожидание m_T , пропорциональное постоянной составляющей сигнала в нагрузке фотоприемника.

Используемая в работе аппаратура анализа сигналов [2] включала оптико-механическую часть, созданную на основе серийного микрофотометра МФ-2, где производилось сканирование щелью изображения, причем флуктуации коэффициента пропускания фотопленки в пределах площади щели преобразовывались с помощью ФЭУ в электрический сигнал, который затем поступал в блоки последовательного спектрального анализа. Здесь происходила фильтрация сигнала в полосе Δf , возведение в квадрат отфильтрованного напряжения, интегрирование и регистрация на ленту самописца. В качестве перестраиваемого по частоте узкополосного фильтра использовался серийный анализатор, работающий по принципу гетеродинного преобразования частоты. Дисперсия и постоянная составляющая сигнала регистрировались непосредственно в нагрузке ФЭУ.

Параметры аппаратуры устанавливались, исходя из допустимого значения ошибки [3]. В частности, выбор полосы пропускаемых частот фильтра Δf определялся допустимым значением дисперсии оценки спектра при заданной длительности реализации T_p . При ограниченном

значении $\Delta f T_p$ с целью уменьшения ошибки производилось сглаживание по ансамблю N реализаций для различных участков изображения. Например, среднеквадратичная ошибка $\sigma = 1/\sqrt{N \Delta f T_p} = 0,3$ при $\Delta f = 40$ Гц, причем сглаживание по ансамблю девяти реализаций позволило уменьшить ошибку до 0,1. Поскольку при RC-осреднении ошибка смещения менее 0,02 достигается через время $4RC$, скорость развертки спектра R_s при гетеродинном преобразовании частоты в анализаторе определяется из условия $R_s \leq \Delta f / 4T_p$.

На рис. 2 сплошными линиями представлены рассчитанные по формуле (1) сечения спектра $G_T(p, 0)$ изображений рис. 1, причем номера кривых соответствуют номерам изображений, зафиксированных в последовательные моменты времени: $i = 1 - 7$. Измеренные спектры позволяют количественно оценить результат увеличения размеров неоднородностей в процессе развития

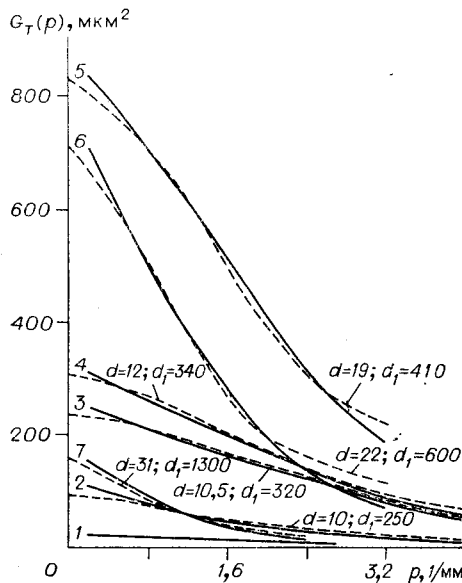


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных спектров изображений рис. 1 (сплошные кривые 1—7) с результатами теоретического расчета, основанного на применении модели изображения (штриховые линии).

течения по увеличению удельного веса низкочастотных составляющих, в то время как по общему уменьшению амплитуд спектра, начиная с некоторого момента (t_6), можно судить о рассеянии энергии турбулентности на заключительных этапах существования течения. Из сопоставления спектров Винера и анализа соответствующих им теневых картин можно заметить, что существует связь между характером изображения и формой кривой спектра. Например, имеет смысл сравнить кривые 2 и 7 на рис. 2 для моментов t_2 и t_7 . Несмотря на то, что значения дис-

персии $\int_0^{\infty} G_T(\rho, 0) d\rho$ для этих моментов времени весьма близки, изменение формы кривых спектра показывает, что к моменту t_7 произошла «перекачка» энергии в более низкочастотную область, что соответствует изменившемуся характеру изображения (ср. позиции 2 и 7 на рис. 1). Эта связь между структурой изображения и формой кривых спектра может быть выявлена с помощью модели случайного двумерного поля, спектр которой совпадает со спектром реального изображения.

Прежде чем выбрать модель, более естественно отражающую характерные особенности реальных изображений, попробуем качественно описать структуру этих изображений. Как видно из приведенных теневых картин, каждое изображение состоит из фигур постоянного контраста, подобных по форме и равномерно распределенных по площади, причем не наблюдается преимущественной ориентации этих фигур: изображения образованы нитеобразными фигурами (свилями), случайным образом и под разными углами наложенными друг на друга. Со временем уменьшается плотность расположения фигур по площади изображения, фигуры увеличиваются в размерах и падает их контраст. Эти особенности теневых картин учитываются при создании модели двумерного случайного поля, имитирующей свойства реальных изображений. В качестве основного элемента модели рассматривается выпуклая геометрическая фигура площади S с произвольно выбранным центром, причем ее форма может быть произвольной, но неизменной в пределах выбранной области. Модель строится на основании сочетания двух случайных процессов, один из которых есть основной, задающий. В частности, таким является процесс распределения центров фигур в области D площади $S(D)$. В соответствии с характером реальных изображений можно допустить, что этот процесс $V(D)$ удовлетворяет условиям однородности, ординарности и отсутствия последствия. Тогда вероятность попадания в область D k центров фигур $V_k(D) = P\{V(D) = k\}$ подчиняется закону Пуассона:

$$V_k(S(D), \lambda) = \exp[-\lambda S(D)] \frac{(\lambda S(D))^k}{k!},$$

где λ — среднее число центров в единице площади.

Путем изменения закона распределения центров можно имитировать широкий круг реальных полей, но в данном случае пуассоновский закон распределения свилей сохраняется для всей исследуемой последовательности теневых картин. Подчиненным этому основному процессу является вероятностный процесс распределения на площади S отдельных фигур по углу поворота φ фигур относительно некоторой фиксированной оси координат и по коэффициенту пропускания α (рассматриваются фигуры различной прозрачности на равномерном яркостном фоне, при этом значение α постоянно по площади отдельной фигуры). В соответствии с этим в самом общем случае модель описывается не только законом распределения центров фигур, но также функцией распределения остальных структурных параметров поля: коэффициента пропускания, площади и угла поворота отдельной фигуры.

Приведем области изменения этих параметров:

$$S \in [S_{\min}, S_{\max}]; \varphi \in [0, 2\pi); \alpha \in [0, 1).$$

Коэффициент пропускания в произвольной точке A области D , накрытой k фигурами, определяется оператором умножения $T_\alpha(A) = \prod_{j=1}^k \alpha_j$

и описывает двумерное случайное поле, подчиненное основному процессу распределения центров фигур. В работе [4] выводятся формулы для расчета статистических характеристик этого поля модели путем нахождения вероятности накрытия точки A k фигурами произвольной ориентации.

В предположении, что угол поворота фигур распределен равномерно в интервале $0 \div 2\pi$, а площади и коэффициенты пропускания фигур одинаковы в пределах выбранной области D , математическое ожидание коэффициента пропускания поля в точке A записывается в виде

$$m_T = \exp[-\lambda S(1 - \alpha)].$$

Центрированная корреляционная функция поля $R_T(\tau)$ представляется следующим образом:

$$R_T(\tau) = m_T^2 (\exp[\lambda(1 - \alpha)^2 H(\tau)] - 1), \quad (5)$$

где $H(\tau) = \int_0^{2\pi} h(\tau, \varphi) d\varphi$; $h(\tau, \varphi)$ — площадь пересечения, полученная сдвигом фигуры параллельно самой себе на расстояние τ под углом φ . (Заметим, что в случае непрозрачных кругов выражение (5) совпадает с формулой, приведенной в [5].)

На основании выражения для корреляционной функции с помощью преобразования Ганкеля определяется спектр Винера поля модели. На рис. 3 сплошными линиями показаны кривые спектров модели, образованной фигурами в виде прямоугольников шириной $d = 10$ мкм и постепенно увеличивающейся длиной $d_1 = 100, 200, 300, 400, 500$ мкм (площади фигур соответственно $S_{\text{пр}1}, S_{\text{пр}2}, S_{\text{пр}3}, S_{\text{пр}4}, S_{\text{пр}5}$). На этом же рисунке пунктирными линиями показано, как изменяется вид спектра при постоянной длине $d_1 = 200$ мкм прямоугольников и постепенно увеличивающейся ширине $d = 12, 14, 18$ мкм. На рис. 4 представлены нор-

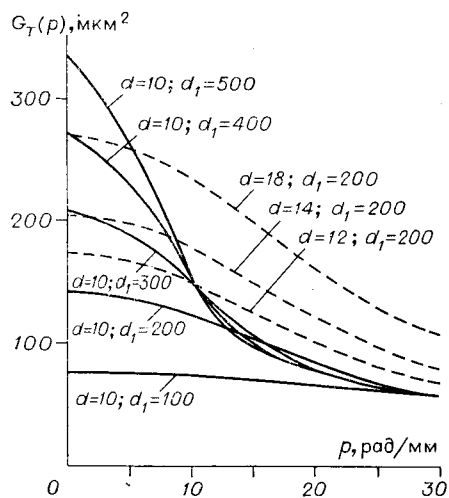


Рис. 3. Изменение характера расчетного спектра изображения в зависимости от размеров фигур, составляющих изображение.

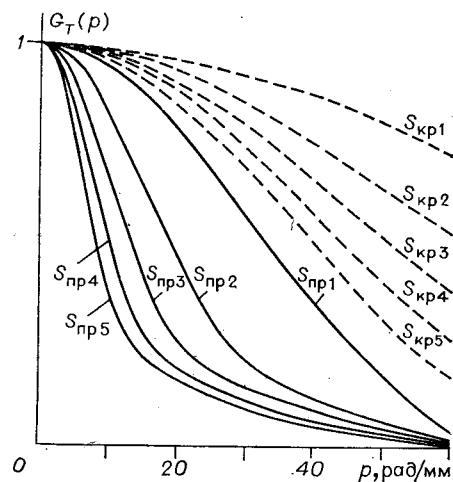


Рис. 4. Изменение характера расчетного спектра изображения при изменении формы фигур, образующих изображение.

мированные кривые спектров поля модели, образованной фигурами в виде кругов с постепенно увеличивающимися радиусами, площади которых равны площадям прямоугольников: $S_{кр1} = S_{пр1}$; $S_{кр2} = S_{пр2}$, ... $S_{кр5} = S_{пр5}$. (На этом же рисунке обозначены приведенные к единице ранее рассчитанные кривые спектров поля прямоугольников со сторонами $d = 10$ мкм и $d_1 = 100 - 500$ мкм.) На основании этих данных можно представить, как влияют форма и размер элементов поля на его спектр. В частности, наличие симметричных фигур, какими являются круги, обуславливает плавное уменьшение амплитуд спектра с ростом пространственной частоты, в то время как для поля прямоугольников характерно преобладание низкочастотных составляющих спектра. При этом чем более вытянутыми они становятся ($d_1 \gg d$), тем более резко проявляются низкие частоты в спектре: из сравнения спектров на рис. 3 для случая прямоугольников со сторонами $d = 10$ мкм, $d_1 = 200$ мкм ($S_{пр2}$) и $d = 10$ мкм, $d_1 = 400$ мкм ($S_{пр4}$) следует, что увеличение вдвое длины фигуры (при постоянной ширине) почти во столько же раз увеличивает амплитуду низкочастотных составляющих, в то время как значения спектра для более высоких частот ($p = 30$ рад/мм) остаются неизменными. Увеличение же ширины прямоугольников при постоянной длине их вызывает пропорциональный подъем всей кривой спектра (см. пунктирные линии на рис. 3). Приведенные кривые были рассчитаны для поля, образованного фигурами с постоянным значением α , причем математическое ожидание поля обуславливало значение оптической плотности, равное $D = \lg(1/m_T) = 0,7$.

Рассмотрим, как влияет пропускание фигур на характер спектра. Если коэффициент пропускания отдельной фигуры α — случайная величина с функцией плотности $k(\alpha)$, то корреляционная функция и математическое ожидание поля записываются в виде [4]

$$R_T(\tau) = \exp \left[-2\lambda S \int_0^1 (1-\alpha) k(\alpha) d\alpha \right] \times \\ \times \left(\exp \left[\lambda H(\tau) \int_0^1 (1-\alpha)^2 k(\alpha) d\alpha \right] - 1 \right); \\ m_T = \exp \left[-\lambda S \left(1 - \int_0^1 \alpha k(\alpha) d\alpha \right) \right].$$

На рис. 5 показаны рассчитанные в соответствии с этими формулами кривые спектра поля, образованного прямоугольниками со сторонами $d = 10$ мкм, $d_1 = 400$ мкм, математическое ожидание которого соответствует оптической плотности $D = 0,7$, причем фигуры либо полностью непрозрачны ($\alpha = 0$) (кривая 1), либо их коэффициенты пропускания подчиняются равномерному закону (кривая 2) или усеченному нормальному распределению с математическим ожиданием пропускания $m_\alpha = 0,5$ и значениями среднеквадратичного отклонения $\sigma_\alpha = 0,25$ (кривая 3) и $\sigma_\alpha = 0,1$ (кривая 4). И здесь закономерности поведения спектров Винера объясняются особенностями структуры модели, в данном случае особенностями распределения фигур по пропусканию: с ростом коэффициента пропускания отдельных фигур увеличивается математическое ожидание поля, что приводит к пропорциональному увеличению амплитуд спектра.

Рассмотрим, как влияет плотность распределения центров фигур в выбранной области на характер спектра. При неизменной площади фигуры увеличение параметра λS модели означает увеличение числа центров фигур в единичной площади. На рис. 6 представлены спектры поля модели, образованной прямоугольниками со сторонами $d =$

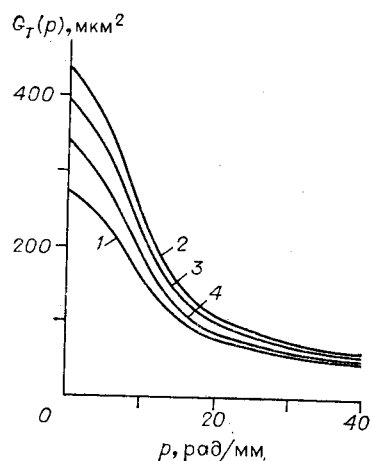


Рис. 5. Изменение характера расчетного спектра изображения в зависимости от коэффициента пропускания фигур изображения.

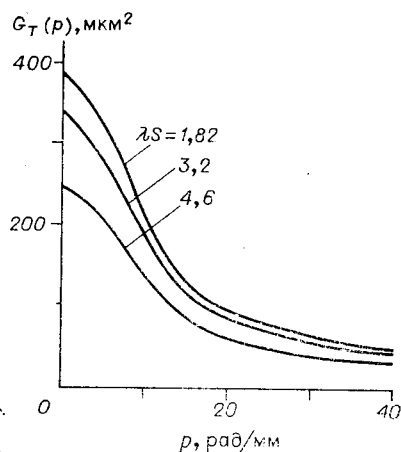


Рис. 6. Изменение характера расчетного спектра изображения при изменении плотности распределения центров фигур в плоскости изображения.

$= 10$ мкм, $d_1 = 400$ мкм, с коэффициентами пропускания, распределенными по усеченному нормальному закону с математическим ожиданием 0,5 и среднеквадратичным отклонением 0,1 и различными значениями параметра λS . Из этого рисунка следует, что по мере заполнения выбранной области все большим числом равномерно распределенных центров фигур уменьшается общее пропускание поля, а следовательно, уменьшается амплитуда спектральных составляющих.

Приведенные примеры, показывающие, как влияет изменение структурных признаков модели на характер спектра, позволяют сделать заключение о существовании однозначной связи между структурой изображения и его спектром Винера и о том, что трансформация формы спектра хорошо отражает изменение пространственной структуры самого поля. Соответствие модели свойствам реальных изображений проверялось сопоставлением теоретических и экспериментальных спектров. Для определенных из опыта значений D последовательным изменением размеров d и d_1 прямоугольников достигалось приближение расчетных спектров к экспериментальным. На рис. 2 пунктиром проведены теоретические кривые и отмечены размеры (в мкм) фигур, для которых производился расчет. При сопоставлении кривых рис. 2 заметно хорошее соответствие расчетных данных экспериментальным. Поскольку, как было показано ранее, между формой спектра и структурой изображения существует однозначная связь, соответствие спектров реального изображения и модели свидетельствует о соответствии структуры модели структуре реального изображения. Таким образом, поскольку используемая модель позволяет выявить связь между спектральными свойствами и структурой изображения (кстати, это позволяет объяснить и закономерность поведения экспериментальных спектров), с помощью модели можно теоретически описать реальные изображения совокупностью значений некоторых структурных признаков. При этом выявляются такие параметры структуры изображения, точная экспериментальная оценка которых затруднительна (в рассмотренном случае оцениваются размеры фигур изображения, как показывают данные d и d_1 расчетных кривых рис. 2). Следует заметить, что с помощью модели можно не только оценить структуру реального изображения, но в некоторых случаях решить обратную задачу, а именно по структуре изображения определить его статистические характеристики:

экспериментально оценить структурные признаки изображения, затем эти параметры ввести в формулу модели и рассчитать ее корреляционную функцию и спектр. Приведенное в данной работе описание модели и результаты ее применения дают возможность утверждать, что полученные расчетным путем статистические характеристики модели будут соответствовать характеристикам реального изображения. Следовательно, и в этом случае применение модели при обработке изображений расширяет возможности экспериментатора и позволяет получить некоторые данные косвенным путем, а не посредством прямых измерений.

В заключение надо отметить, что применение модели при обработке экспериментальных данных о физическом процессе, регистрируемом оптическим методом, позволяет оценить изменение формы, размеров, количества и оптической плотности прозрачных неоднородностей исследуемого поля, на основании чего можно установить динамику процесса (в рассмотренном примере — процесса развития турбулентных образований). И если спектральный анализ последовательного ряда изображений дает оценку изменения исследуемого поля в целом, то применение вероятностей модели позволяет выявить изменения его структуры.

Авторы выражают благодарность Р. П. Филимонову за предоставленную возможность работы со спектроанализатором.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шестов Н. С. Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех. М., «Сов. радио», 1967.
2. Захаренков В. Ф., Филимонов Р. П., Павлючук А. С. Микрофотометрический метод анализа фотографических шумов.— ОМП, 1973, № 3.
3. Бендат Д., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М., «Мир», 1971.
4. Филимонов Р. П., Коваленко Л. Г., Абакшин Ю. Е. Представление двумерного случайного поля каскадным процессом.— ОМП, 1975, № 6.
5. О'Нейл. Введение в статистическую оптику. М., «Мир», 1966.

Поступила в редакцию 7 июня 1978 г.

УДК 681.5 : 681.3.01

В. А. ИВАНОВ, Б. М. ПУШНОЙ

(Новосибирск)

ОПТИМИЗАЦИЯ ВРЕМЕНИ ПОСТРОЕНИЯ ПРОСТЫХ ФОТОИЗОБРАЖЕНИЙ

В настоящее время появился и разрабатывается ряд устройств и автоматов, аналогичных системе «Зенит» [1, 2]. Данные устройства (системы) представляют собой прецизионный двухкоординатный привод с высокой точностью позиционирования (0,32 мкм), снабженный считывающими (сканирующими) и записывающими устройствами. Управление такой системой осуществляется средней или мини-ЭВМ. Появление мощных (лазерных) источников света с малым ($\sim 1 \div 2$ мкм) размером пятна и высокой скоростью коммутации позволяет решать ряд ранее неразрешимых задач записи информации на фотоносителях. Один из основных показателей такой системы — время, затрачиваемое на определенный вид работы. Поэтому важно оптимизировать этот по-