

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-

казатель системы. При наличии лазерных записывающих устройств становится нецелесообразным осуществлять перемещение фотоматериала с остановками в точках экспозиции или с малой скоростью. Невысокая скорость перемещения обусловлена необходимостью избежания существующих погрешностей (отклонений) при движении фотоматериала.

В данной работе рассматривается один из подходов к оптимизации времени построчного построения квадратной решетки (при заданной точности) при движении вдоль строки с максимально возможной скоростью. Основным допущением является пропуск наносимых точек, если координаты точек не попадают в заданную зону, с последующим их заполнением в режиме позиционирования после обхода всей решетки.

Оценка времени построения решетки при точном прохождении ее узлов. Предположим, что привод симметричен относительно координат и динамика его по одной координате описывается передаточной функцией

$$W(p) = a/p^2,$$

где a — коэффициент усиления (величина ускорения при $|u| = 1$); u — управляющее воздействие.

Пусть N — число точек в строке решетки, b — расстояние между точками в строке. Вычислим время обхода решетки из $N \times N$ элементов для трех режимов движения подвижной части привода.

I. Режим позиционирования. Предполагается, что перемещение из точки в точку осуществляется оптимально, т. е. за одно переключение управляющего воздействия подвижная часть перемещается в заданную зону с максимальным ускорением a . Согласно принятому алгоритму движения время прохождения расстояния b между двумя соседними точками [3]

$$t = 2\sqrt{b/a}.$$

Максимальная и средняя скорости в этом случае

$$V_{\max} = \sqrt{ab}; \quad V_{\text{ср}} = \sqrt{ab}/2.$$

Для обхода всех точек решетки требуется время, равное

$$t_{\text{I}} = 2N^2\sqrt{b/a}. \quad (1)$$

II. Режим постоянной скорости. При достаточно большом N для простоты можно предположить, что разгон до заданной скорости осуществляется на расстоянии, кратном $b/2$. Обозначим: N_p — число полуинтервалов ($b/2$) разгона и торможения; t_p — время разгона и торможения; t_n — время движения с постоянной скоростью; t_c — время перехода на соседнюю строку. Тогда

$$t_{\text{II}} = N(2t_p + t_n) + (N - 1)t_c, \quad (2)$$

а на разгон и торможение необходимо время

$$2t_p = 2\sqrt{N_p b/a}.$$

Время движения с постоянной скоростью по одной строке

$$t_n = ((N - 1)/N_p - 1)\sqrt{N_p b/a}.$$

Время обхода решетки

$$t_{\text{II}} = 2N \left(\frac{N - 1}{N_p} + 1 \right) \sqrt{\frac{(N - 1)b}{a}} + 2(N - 1) \sqrt{\frac{b}{a}}.$$

III. Режим максимального ускорения. Если проходить строку с максимальным ускорением, то время обхода решетки в таком режиме можно определить из t_{II} , положив $N_p = N - 1$, т. е.

$$t_{III} = 2N \left[\sqrt{\frac{(N-1)b}{a}} + \left(1 - \frac{1}{N}\right) \sqrt{\frac{b}{a}} \right]. \quad (3)$$

Для больших N из (1)–(3) можно получить следующие оценки и неравенства:

$$t_I/t_{II} \approx \sqrt{N}; \quad (4)$$

$$\sqrt{N} \geq t_{II}/t_{III} \geq 1; \quad (5)$$

$$t_{II}/t_{III} > 1, \text{ если } N_p < N - 1. \quad (6)$$

Из этих выражений следует, что минимальным будет время t_{III} , так как привод осуществляет движение с максимальным ускорением.

Пример. Для привода «Зенит-2» [4] дадим оценки времен t_I и t_{III} для решетки с параметрами $N = 100$, $b = 10^{-3}$ м. Величина ускорения $a = 1$ м/с близка к существующей в реальном макете:

$$t_I \approx 640 \text{ с};$$

$$t_{III} \approx 70 \text{ с}.$$

Из примера виден порядок величин и возможный выигрыш по времени при увеличении скорости.

Оптимизация с пропуском точек. В реальной системе обеспечить режим движения с максимальным ускорением при заданной точности не всегда возможно, так как система управления не может удерживать в необходимой зоне «неподвижную» координату. Поэтому часто скорость движения вдоль «неподвижной» координаты снижают до такой величины, при которой нет выхода из зоны. В данной работе предлагается допустить пропуск точек, не попавших в нужную зону (запоминая их в памяти ЭВМ и обходя эти точки после обхода всей решетки), но при этом увеличить скорость движения. Интуитивно понятно, что увеличивать скорость движения нужно до тех пор, пока время обхода пропущенных точек не будет компенсировать полученный эффект от увеличения скорости [5–9].

Для достаточно простого случая покажем, что такой подход дает выигрыш во времени.

Предположим, что отклонения от заданного положения «неподвижной» координаты носят случайный характер с нулевым средним и плотность распределения имеет треугольный вид, т. е. описывается функцией

$$\begin{aligned} f(x) &= 0, & |x| &> \beta; \\ f(x) &= (N/\beta)(1 - x/\beta), & \beta &\geq x \geq 0; \\ f(x) &= (N/\beta)(1 + x/\beta), & -\beta &\leq x \leq 0. \end{aligned}$$

Число точек, не попавших в зону $(-z, z)$ при прохождении одной строки, $n_c = 2 \int_z^\beta \frac{N}{\beta} \left(1 - \frac{x}{\beta}\right) dx = N \left(1 - \frac{z}{\beta}\right)^2$. Для решетки число пропущенных точек $n = N^2(1 - z/\beta)^2$. Пропущенные точки заполняются в режиме позиционирования, поэтому для вычисления времени заполнения пропущенных точек необходимо знать оценку среднего расстояния между пропущенными точками, которое равно

$$\rho = Nb/n_c = b/(1 - z/\beta).$$

Теперь нетрудно записать время обхода всех пропущенных точек:

$$t_{np} = nt_I = n 2\sqrt{\rho/a} = 2N^2\sqrt{b/a}(1 - z/\beta).$$

В режиме II время заполнения всех точек решетки с учетом пропущенных

$$t_{II} = N \left(\frac{N-1}{N_p} + 1 \right) \sqrt{\frac{N_p b}{a}} + 2(N-1) \sqrt{\frac{b}{a}} + 2N^2 \sqrt{\frac{b}{a}} \left(1 - \frac{z}{\beta} \right).$$

Для больших N нетрудно получить оценку

$$t_{II} \simeq \frac{N^2 b}{V} + 2N^2 \sqrt{\frac{b}{a}} \left(1 - \frac{z}{\beta} \right). \quad (7)$$

Предполагая, что параметр β зависит от скорости движения V , найдем минимум времени t_{II} от скорости. Дифференцируя t_{II} по V , получаем

$$\frac{dt_{II}}{dV} = -\frac{N^2 b}{V^2} + 2N^2 \sqrt{\frac{b}{a}} \frac{z}{\beta^2} \frac{d\beta}{dV} = 0. \quad (8)$$

Зависимость параметра β от V возьмем линейной, т. е.

$$\beta = \beta_0 + \gamma V. \quad (9)$$

Тогда, решая уравнение (8) с учетом (9), получаем выражение

$$V_{\text{опт}} = \frac{\beta_0 \left(1 + \sqrt{\frac{2\gamma z}{V ab}} \right)}{\frac{2\gamma z}{V ab} - \gamma^2}, \quad (10)$$

которое справедливо для

$$\gamma < 2z/\sqrt{ab}.$$

Итак, для простейшей модели распределения отклонений и линейной зависимости параметра распределения β от скорости задача нахождения оптимальной скорости решена; тем самым показано, что такой подход к задаче построения решеток имеет смысл. Для подтверждения справедливости предлагаемого подхода приведем некоторые результаты исследования для реального привода. Анализ отклонений от заданного положения «неподвижной» координаты как случайного процесса показал, что корреляция между соседними отсчетами мала, а математическое ожидание близко к нулю.

На рис. 1, а—в представлены экспериментально снятые распределения (штриховые линии) отклонений для различных скоростей движения. Распределения построены из выборок 1000 и 2000 точек, а на рисунках они нормированы к 100 точкам.

При предварительном анализе гистограмм для получения их математического описания были сделаны два предположения.

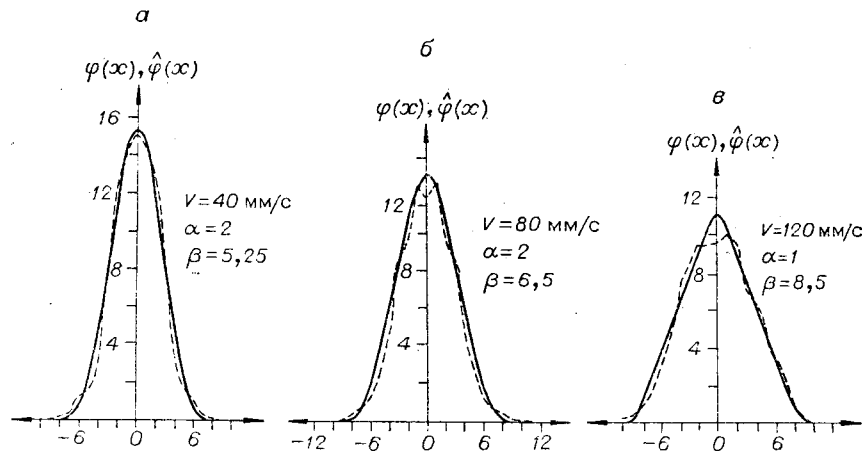


Рис. 1.

$V, \text{ мм/с}$	16,9	20	24	40	50	56	60	80	120	120	140
α	3	1,5	4	2	3	1	2	2	1	3	5
β	6	5	5,5	5,25	6	7	6,75	6,5	8,5	9	9
σ	0,676	0,856	0,805	0,653	0,751	0,669	0,618	0,675	0,558	0,688	0,687

1. Основные отклонения от заданного положения «неподвижной» координаты, которые имеют распределение, близкое к треугольному, вызваны неравномерностью сухого трения. Это предположение подтверждается видом экспериментальных распределений.

2. Кроме того, вид гистограмм указывает на то, что реальное распределение является совместным распределением треугольного и (предположительно) равномерного. Природу равномерного распределения, по-видимому, можно отнести к дискретности координаты и скорости, которые используются для формирования управляющих воздействий в режиме позиционирования.

В качестве модели, описывающей реальные распределения, возьмем композицию треугольного и равномерного распределений:

$$\begin{aligned}
 \varphi(x) &= 0, & x &> \alpha + \beta > 0; \\
 \varphi(x) &= (\beta + \alpha - x)^2 / (4\alpha\beta^2), & \beta - \alpha &\leq x \leq \alpha + \beta; \\
 \varphi(x) &= (\beta - x) / \beta^2, & \alpha &\leq x \leq \alpha + \beta; \\
 \varphi(x) &= (2\alpha\beta - \alpha^2 - x^2) / (2\alpha\beta^2), & -\alpha &\leq x \leq \alpha; \\
 \varphi(x) &= (\beta + x) / \beta^2, & -\beta + \alpha &\leq x \leq -\alpha; \\
 \varphi(x) &= (\beta + \alpha + x)^2 / (4\alpha\beta^2), & -\alpha - \beta &\leq x \leq \alpha - \beta; \\
 \varphi(x) &= 0, & x &< -\alpha - \beta,
 \end{aligned} \tag{11}$$

где α — ширина и β — полуширина треугольного распределения.

Если система управления хорошо отлажена, то величина α не должна превышать 1—2 дискретов координаты (в рассматриваемом приводе один отсчет координаты равен 0,32 мкм, что соответствует половине длины волны лазерного интерферометра).

На рис. 1 представлены также и кривые (сплошная линия), описываемые функцией (11) с параметрами, оцененными по методу наименьших квадратов. В таблице приведены значения параметров функции φ и дисперсии для различных значений скорости подвижной части привода. Из рис. 1 и таблицы видно, что функция (11) удовлетворительно описывает реальные распределения, подтверждая правильность предположений о природе возникновения отклонений.

Зависимость параметра β в первом приближении может быть описана линейной функцией скорости (9):

$$\beta = \beta_0 + \gamma V.$$

Для данных, приведенных в табл. 1, параметры функции $\beta(V)$ равны: $\beta_0 = 4,5$ и $\gamma = 0,0335$.

Теперь найдем потери времени t_{π} на заполнение пропущенных точек решетки. Рассмотрим случай, когда границы зоны $(-z, z)$ лежат внутри интервалов $(\alpha - \beta, -\alpha)$, $(\alpha, \beta - \alpha)$. Этот случай несколько проще для аналитического исследования. Число пропущенных точек в строке

Дифференцируя t_{II} по V и приравнявая производную нулю, получаем уравнение, решение которого относительно V дает оптимальную скорость построения квадратной решетки:

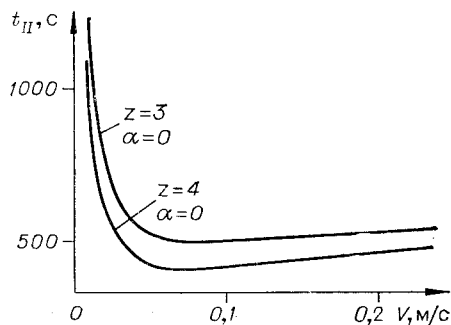


Рис. 2.

$$\frac{b}{V^2} = \gamma \sqrt{\frac{b}{a}} F(\alpha, \beta, z) \frac{1}{2} \frac{dF}{d\beta} \frac{d\beta}{dV},$$

$$\frac{dF}{d\beta} = \frac{2}{\beta} \left(z - \frac{z^2}{\beta} - \frac{\alpha^2}{3\beta} \right).$$

В частном случае ($\alpha = 0$) $V_{\text{опт}}$ определяется формулой (10). На рис. 2 представлены зависимости t_{II} для различных значений z , α и $N = 100$ (a и b такие, как и в предыдущем примере).

Таким образом, на модели и на реальном приводе показано, что наличие ЭВМ в рассматриваемой системе позволяет по-иному подойти к вопросу построения некоторых типов изображений, использующих электромеханическую развертку привода. Рассмотренный подход позволяет минимизировать время построения изображения. Кроме того, становятся очевидными требования к качеству системы управления для такого класса задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурый Л. В., Коронкевич В. П., Нестерихин Ю. Е., Нестеров А. А., Пушной Б. М., Ткач С. Е., Щербаченко А. М. Прецизионный фотограмметрический автомат.— «Автометрия», 1974, № 4.
2. Бурый Л. В., Кузнецов С. А., Луговой Л. Г., Нестеров А. А., Пушной Б. М. Электромеханическая система позиционирования фотограмметрического автомата «Зенит».— «Автометрия», 1977, № 3.
3. Понтрягин Л. С. и др. Математическая теория оптимальных процессов. М., «Наука», 1969.
4. Бурый Л. В., Иванов В. А. Математическое описание и моделирование алгоритмов управления прецизионным двухкоординатным приводом с линейными двигателями.— «Автометрия», 1977, № 3.
5. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. М., «Мир», 1973.
6. Рао С. Р. Линейные статистические методы и их применения. М., «Наука», 1968.
7. Паллю де ла Барьер Р. Курс теории автоматического управления. М., «Машиностроение», 1973.
8. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. М., «Связь», 1976.
9. Медведев Г. А., Тарасенко В. Г. Вероятностные методы исследования экстремальных систем. М., «Наука», 1967.

Поступила в редакцию 12 октября 1978 г.