

дит дважды: сначала по координате  $y$ , а затем по координате  $x$ . При этом, несмотря на различие моментов обнаружения расходимости по каждой из координат, возврат осуществляется в одну и ту же точку появления импульса дополнительных ускорений на 6 шагов по координате  $y$  и на 8 шагов по координате  $x$ .

На рис. 2 представлены результаты фильтрации для тех же условий, что и в первом случае, но полученные осреднением по 135 реализациям последовательности измерений. Кривая 1 соответствует фактической, а кривая 2 — расчетной ошибкам оценок положения объекта. Можно отметить хорошее согласие расчетной и фактической ошибок оценок положения, что свидетельствует об удовлетворительной работе фильтра.

Сравнение последовательного алгоритма для тех же исходных данных с работой фильтра, процедура обнаружения которого использует критерий Неймана — Пирсона, показало, что последний дает суммарную ошибку оценки положения по всей траектории в 2,3 раза больше.

Результаты моделирования процесса адаптивной фильтрации также показали, что при действии неучтенных в модели факторов типа ошибки в значении коэффициента лобового сопротивления объекта (до 20%), импульсных ускорений (до 100 м/с<sup>2</sup>), вариаций плотности атмосферы (до 10%), обуславливающих различный характер нестационарности смещений, оптимальные значения параметров алгоритма лежат в диапазонах  $m_x^j = 120 - 200$  м,  $\xi = 1,2 - 1,5$ .

Таким образом, предложенная адаптивная модификация фильтра Калмана может быть использована для оценивания состояния нестационарных систем в условиях неадекватности модели динамики.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Leondes C. T., Pearson J. Kalman Filtering for the System with Parameter Uncertainties.— Int. J. Contr., 1973, vol. 17, p. 785—804.
2. Mehra R. K. Approaches to Adaptive Filtering.— IEEE Trans. on Automatic Control, 1972, vol. AC-17, p. 693—698.
3. Quigly A. L. C. An Approach to the Control of Divergence in Kalman Filter Algorithms.— Int. J. Contr., 1973, vol. 17, p. 744—746.
4. Кендалл М. Дж., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. М.: Наука, 1973.

*Поступила в редакцию 21 апреля 1978 г.;  
окончательный вариант — 21 августа 1979 г.*

УДК 681.5.015.26 : 681.3

Л. Г. КОВАЛЕНКО

(Ленинград)

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА НА ЭВМ

Натурный оптический эксперимент весьма дорог и трудоемок, что связано как со сложностью реализации самой оптической системы, так и с возможностью обеспечения заданных условий опыта. Зачастую требуется сохранить неизменными одни условия эксперимента при строго дозированном, контролируемом изменении других, например при определении характеристики системы как отклика на определенное входное воздействие, оценке влияния различных конструктивных элементов системы на параметры выходного оптического сигнала в случае неизмен-

ного входного воздействия, оценке влияния различных составляющих входного воздействия на характеристики сигнала на выходе системы и т. д. В подобного рода задачах аналитические методы расчета неприемлемы, поскольку решение должно содержать не только качественные, но и количественные данные, на основе которых будут проектироваться реальные конструкции; временные и материальные затраты на постановку опыта не оправдывают себя, к тому же не все условия опыта выполнимы на практике. В этом случае натурный оптический эксперимент целесообразно заменить численным экспериментом, основанным на моделировании на ЭВМ оптической системы и среды в качестве входного воздействия системы.

В численном эксперименте используются математические модели системы и среды, на основании которых разрабатывается схема решения задачи, реализуемая в виде программы ЭВМ. Целью моделирования является восстановление на ЭВМ картины распространения излучения источника в конкретной оптической системе, работающей в среде с заданными параметрами, в результате чего фиксируется распределение облученности в приемной плоскости системы, соответствующее реальному распределению, полученному в процессе натурального эксперимента. Математические модели, как и физические, представляют собой материальные устройства, и численные значения величин, характеризующих явления в оригинале, получают путем измерения их на модели. В частности, найденное расчетным путем распределение облученности является выходным оптическим сигналом, параметры которого могут быть измерены (также с помощью ЭВМ), и на основании этих измерений в зависимости от целей эксперимента рассчитываются характеристики системы, оцениваются параметры входного воздействия, изучаются различные ситуации приема и выделения оптического сигнала и т. д. — все это в пределах одной вычислительной программы ЭВМ. Соответствие численного эксперимента натурному обуславливается тем, насколько точно математическая модель отражает свойства реального прибора и среды, и это соответствие проверяется близостью реального и расчетного выходных оптических сигналов. Выбор математических моделей определяется свойствами конкретного прибора и среды.

Зачастую в оптическом эксперименте используются приборы, в которых источником излучения служат тепловые излучатели с низкой временной и пространственной когерентностью, а объектом исследования являются процессы и среды, в которых оптические неоднородности не создают заметных когерентных эффектов. В этом случае модель оптической системы может быть создана посредством имитации работы реального прибора путем статистического описания излучения источника и переноса этого излучения в пространстве элементов оптической схемы на основе соотношений геометрической оптики. Математическое описание модели проводится с помощью метода Монте-Карло, который успешно используется при решении задач переноса оптического излучения [1]. Основанием для этого является то обстоятельство, что естественный процесс переноса излучения носит случайный характер, в то время как метод Монте-Карло позволяет для каждой случайной реализации процесса рассчитать значения случайных факторов, влияющих на распространение излучения. Перенос осуществляется потоком фотонов, причем перемещение каждого из них представляет собой однородную цепь Маркова, состояниями которой  $q_i$  являются положения фотона в фазовом пространстве координат  $\vec{r}_i$ , энергий  $P_i$  и направлений перемещения  $\vec{\omega}_i$  [2]. Расчет траектории фотона начинается с определения координат точки вылета  $\vec{r}_0(x_0, y_0, z_0)$  и направляющих косинусов траектории  $\vec{\omega}_0(a_0, b_0, c_0)$ . Конкретные случайные значения  $\vec{r}_0$ ,  $\vec{\omega}_0$ , а также значение длины волны излучения  $\lambda$  рассчитываются на основании известных из опыта законов

распределения яркости по поверхности источника, диаграммы направленности излучения, а также распределения по спектру яркости элемента источника. В расчетах используется интегральное преобразование вида

$$\int_p^{\infty} f(\eta) d\eta = \alpha, \quad (1)$$

на основании которого с помощью случайного числа  $\alpha$ , равномерно распределенного в интервале (0,1) и генерируемого датчиком псевдослучайных чисел ЭВМ, по известной плотности распределения вероятности  $f(\eta)$  моделируемой величины находится ее конкретное значение из интервала значений  $p < \eta < g$ . После вылета из источника фотон перемещается в пространстве прибора вплоть до столкновения с ближайшим оптическим элементом схемы. Столкновение фотона с входной поверхностью элемента соответствует переходу в новое состояние цепи  $q_1$ , которое характеризуется координатами точки столкновения  $\bar{r}_1$ , направлением последующего перемещения  $\bar{\omega}_1$  и новым значением «веса» фотона  $P_1$ . При моделировании переноса излучения в приборе столкновения происходят с поверхностями оптических элементов, поэтому вместо определения типа взаимодействия фотона при столкновении имеет смысл рассчитывать его статистический вес. В используемой нами модификации метода Монте-Карло предполагается, что вдоль заданного направления вместо одного фотона перемещается «пакет», состоящий из  $P_i$  фотонов. При столкновении некоторое число фотонов из этого «пакета» поглощается, а оставшиеся продолжают перемещение в новом направлении. Величина  $P_i$  называется статистическим весом, и вместо «пакета» говорят о фотоне с весом  $P_i$ . Следующее состояние цепи  $q_2$  соответствует столкновению фотона с выходной поверхностью оптического элемента. При этом определяются координаты положения фотона  $\bar{r}_2$ , новое направление перемещения  $\bar{\omega}_2$  и вес  $P_2$ . Например, при прохождении фотона в преломляющем свет оптическом элементе статистический вес рассчитывается по формуле

$$P_2 = (1 - l)^{t_2} (1 - \rho_{\text{вх}}) (1 - \rho_{\text{вых}}) P_1,$$

где  $t_2$  — расстояние, которое проходит фотон в стекле от входной к выходной поверхностям;  $l$  — коэффициент поглощения стекла;  $\rho_{\text{вх}}$ ,  $\rho_{\text{вых}}$  — коэффициенты отражения входной и выходной поверхностей.

В этих расчетах коэффициент отражения от поверхности раздела двух сред с коэффициентами преломления  $n_1$  и  $n_2$  определяется по формуле

$$\rho = \frac{1}{2} \left( \frac{n_2 B - n_1 A}{n_2 B + n_1 A} \right) \left( 1 + \left( \frac{n_1 A B - n_2 (1 - B^2)}{n_1 A B + n_2 (1 - B^2)} \right)^2 \right).$$

Здесь  $A = a_n a_n + b_n b_n + c_n c_n$ ;  $B = a_{\text{пр}} a_n + b_{\text{пр}} b_n + c_{\text{пр}} c_n$ ;  $a_n, b_n, c_n, a_{\text{пр}}, b_{\text{пр}}, c_{\text{пр}}$  — направляющие косинусы падающего и преломленного лучей;  $a_n, b_n, c_n$  — направляющие косинусы нормали к поверхности.

В каждом состоянии цепи  $q_i$  проверяется, не вышел ли фотон за пределы оптической схемы, и только после этого рассчитывается его дальнейшая траектория. Путь фотона  $t$  между двумя столкновениями определяется из совместного решения уравнения поверхности оптического элемента  $F(x, y, z) = 0$  и уравнения траектории фотона. В случае преломления луча на границе раздела двух сред направляющие косинусы определяются по формуле

$$\bar{\omega}_{i+1} = \bar{\omega}_n \mu + n_i (\bar{\omega}_i - \bar{\omega}_n \beta) / n_{i+1}, \quad (4)$$

где  $\mu = \sqrt{1 - ((n_i/n_{i+1}) \sin \Theta)^2}$ ;  $\bar{\omega}_n$  — направляющие косинусы нормали;  $n_i, n_{i+1}$  — значения коэффициентов преломления для заданной длины

волны излучения;  $\Theta$  — угол между направлением нормали и вектором  $\mathbf{r}_i$ ,  $\beta = \cos \Theta$ .

Перемещение фотона в пространстве элементов оптической схемы продолжается до тех пор, пока он не попадет в приемную плоскость (если до этого не выйдет за пределы прибора). Эта плоскость предварительно разбивается на ячейки, соответствующие элементам построчного разложения оптического сигнала. При попадании фотона в  $k$ -й траектории в  $j$ -ю ячейку площадью  $S_j$  в памяти ЭВМ фиксируется ее номер и вес фотона  $P_{jk}$  суммируется с весами фотонов, ранее попавших в эту ячейку, после чего начинается расчет новой траектории. Многократное повторение этого алгоритма соответствует «историям» отдельных фотонов, и расчет траекторий продолжается до тех пор, пока не будет исчерпан весь запас  $N$  фотонов. Таким образом, с помощью ЭВМ проводится моделирование  $N$  траекторий фотонов, причем каждая реализация переноса излучения не зависит от других, подчиняется одним вероятностным законам распределения, а результаты усредняются. По окончании расчета для каждой ячейки фиксируется число фотонов  $N_k$ , попавших в нее,

и определяется величина  $s_{jk} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_k} P_{jk}$ , которая является оценкой

потока фотонов, попадающих на элементарную площадку  $S_j$ . Совокупность значений  $S_{jk}$  при малых значениях  $S_j$  характеризует распределение облученности приемной плоскости оптической системы. Следует отметить, что поскольку в расчете участвуют конкретные значения длин волны излучения и коэффициентов преломления оптических элементов, то в пространственном распределении облученности учитывается влияние aberrаций реальной схемы. Погрешность оценки облученности  $\sigma$ , обусловленная погрешностью метода, зависит от числа фотонов  $N$ , участвующих в формировании выходного оптического сигнала (например, при  $N = 10^4$   $\sigma$  составляет величину  $\sim 0,01$ ). Модель оптического прибора была реализована в виде АЛГОЛ-программы ЭВМ БЭСМ-6, составленной из отдельных независимых блоков, соответствующих различным элементам оптической схемы. Эффективность разработанного алгоритма, определяемая произведением дисперсии оценки на машинное время расчета одной траектории, составила  $6 \cdot 10^{-4}$  с. Изменяя набор блоков, задавая различные значения их параметров, можно моделировать любые сколь угодно сложные оптические системы.

Как показал опыт применения разработанной модели, при достаточно большом числе траекторий фиксируется близкое к реальному пространственное и спектральное распределения облученности в плоскости приема. В качестве примера рассматривается моделирование автоколлимационного теневого прибора, схема которого приведена в [2]. Приборы такого рода широко используются при исследовании физических явлений, происходящих в прозрачных средах и характеризующихся малыми значениями флуктуаций коэффициента преломления. Высокая чувствительность этих приборов вызывает значительные трудности при постановке натурального эксперимента с целью определения характеристик и оценки возможностей конкретной модификации прибора, поэтому применение численного эксперимента является настоящей необходимостью. На рис. 1 приводится измеренное в лабораторных условиях распределение облученности в изображении источника. Здесь же штрихом по-

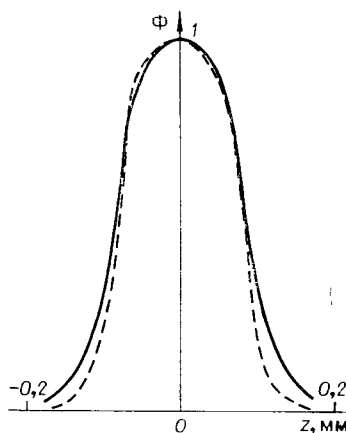


Рис. 1.

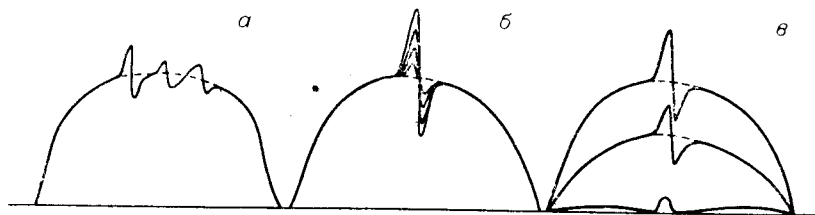


Рис. 2.

казано распределение, полученное для тех же условий расчетным путем. На основании этих данных можно отметить хорошее соответствие результатов натуральных измерений и численных расчетов на ЭВМ. Характер распределения облученности обуславливает вид характеристики преобразования, которая устанавливает зависимость между входным воздействием прибора (величиной градиента коэффициента преломления в исследуемом объеме) и выходным сигналом (приращением мощности принимаемого излучения). На основании этой характеристики определяются остальные параметры прибора: отношение сигнал/шум (С/Ш) в нагрузке фотоприемника и контраст изображения оптической неоднородности, порог чувствительности и динамический диапазон регистрируемых прибором входных воздействий и т. д. Поэтому адекватность реального и расчетного распределений облученности свидетельствует о том, что определенные расчетным путем параметры и характеристики прибора соответствуют реально измеренным. Для подтверждения этого необходимо поставить на ЭВМ простейший оптический эксперимент.

Оценка чувствительности теневого прибора в лабораторных условиях проводится при помощи эталона входного воздействия в виде стеклянного клина, введением которого в исследуемый объем задается определенный градиент коэффициента преломления вдоль выбранного направления. Такого рода тест в виде плоскопараллельной пластины с прорезанной в ней канавкой используется обычно в лабораторных измерениях, а также при настройке прибора. При этом изменением глубины канавки достигается изменение угла клина, а следовательно, и величины градиента коэффициента преломления. На рис. 2, а представлено измеренное в реальных условиях распределение облученности при введении в исследуемый объем пластины, в которой вместо одной прорезаны три канавки различной глубины. На этом рисунке видно, что увеличение глубины канавок приводит к увеличению амплитуд «светлого» и «темного» в сигнале от клина. В численном эксперименте использовалась модель клина, представляющая собой математическое описание совокупности оптических поверхностей, соответствующих поверхностям реальной канавки, прорезанной в стеклянной пластине. Модель была реализована в виде отдельного блока программ ЭВМ и рассматривалась в качестве одного из элементов модели системы прибор — среда, занимая в общей программе место, соответствующее исследуемому объему. Входными параметрами этого блока являлись ширина  $\Delta$  и глубина  $L$  моделируемой канавки. На рис. 2, б представлено, как изменяется перепад «светлого» и «темного» в расчетном распределении облученности при изменении  $L$ . Сопоставление распределений рис. 2, а и б позволяет отметить соответствие характера экспериментально измеренного и расчетного оптических сигналов от клина, что дает основание сделать вывод о соответствии расчетных характеристик экспериментально измеренным, поскольку клин служит тестом при определении этих характеристик. С помощью численного эксперимента можно оценить зависимость оптического сигнала не только от параметров входного воздействия, но и от настройки оптической схемы при неизменном входном воздействии. В данном случае под настройкой понимается взаимное положение  $\Delta$  визуализирующей и осветительных

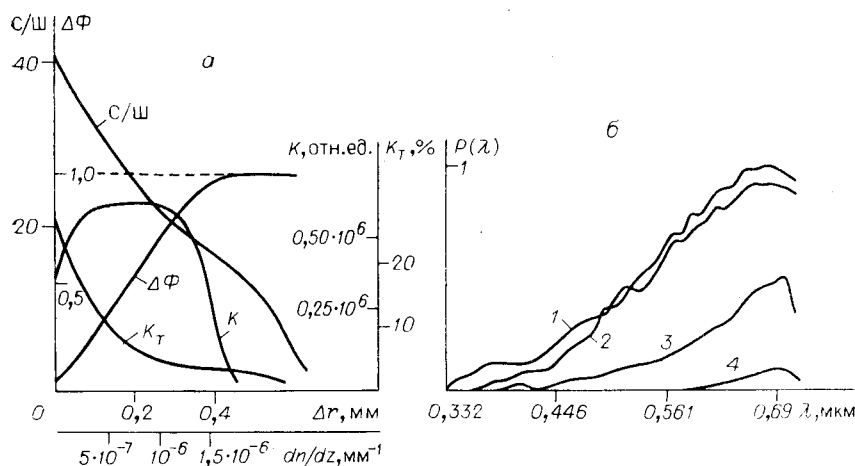


Рис. 3.

диафрагм (при  $\Delta r = 0$  визуализирующая диафрагма перекрывает изображение осветительной). В качестве иллюстрации на рис. 2, в показано, как по мере перекрытия изображения источника визуализирующей диафрагмой в виде полуплоскости («ножа») уменьшается общий уровень облученности (фон) и исчезает перепад «темного» в сигнале от клина. Эта особенность работы теневой схемы хорошо известна из практики юстировки реальных приборов. С помощью численного эксперимента при использовании теста в виде клина было проведено исследование работы прибора, в частности определен ряд параметров и выявлена зависимость их от настройки. На рис. 3, а показано, как изменяется в зависимости от  $\Delta r$  чувствительность  $K$  прибора, отношение  $(C/Ш)$  в нагрузке ФЭУ и контраст изображения  $K_T$  при появлении в исследуемом объеме эталонного значения градиента коэффициента преломления, близкого к пороговому:  $(dn/dz)_{\text{пр}} = 3,8 \cdot 10^{-8} \text{ 1/мм}$ . Здесь же приводится характеристика преобразования  $\Delta\Phi = f(dn/dz)$ . Численный эксперимент дает возможность определить и такие характеристики, измерение которых в натуральных условиях затруднительно. Например, на рис. 3, б показано пространственно-спектральное распределение принимаемого излучения (в относительных единицах) в кольцевых зонах приемной плоскости (номера кривых на рисунке даны по мере удаления от центра приемной плоскости). В этом случае суммирование статистических весов фотонов проводится как по ячейкам плоскости приема, так и по длинам волн принимаемого излучения.

Численный эксперимент позволяет не только воспроизвести цикл лабораторных исследований характеристик прибора, но и оценить его работу в натуральных условиях. Например, при изучении гидрофизических полей зачастую необходимо оценить влияние рассеивающих свойств среды на способность оптической системы фиксировать малые значения градиентов коэффициента преломления. Это представляет особый интерес в связи с тем, что параметры, определенные в лабораторных условиях, на воздухе при работе прибора в рассеивающей среде существенно изменяются, поскольку рассеяние приводит к перераспределению облученности в плоскости приема. В то же время в натуральных условиях трудно количественно оценить влияние рассеяния на параметры оптического сигнала и еще более затруднительно оценить, какая из модификаций схемы будет более предпочтительна при измерениях в рассеивающих средах. Моделирование на ЭВМ дает возможность получить ответ на эти вопросы еще до постановки натурального эксперимента. При исследовании системы при-

бор — рассеивающая среда объем среды рассматривается как один из элементов оптической схемы, характеристики которого описываются индикатрисой рассеяния  $X(\gamma)$ , показателем рассеяния  $\delta$  и вероятностью выживания кванта  $\Lambda$ , определяемыми на основе экспериментальных данных. Конкретные значения этих величин являются входными параметрами блока АЛГОЛ-программы «Рассеивающая среда», который реализуется также с помощью метода Монте-Карло [3]. Структура блока основана на определении расстояния между столкновениями фотона в среде и направления его перемещения после столкновения. Расстояние рассчитывается при помощи соотношения (1) на основании функции распределения длины «свободного пробега»:  $t = -\ln \alpha/\delta$ , где  $\alpha$  — случайное число. Направление определяется с помощью индикатрисы  $X(\gamma)$ , которая обуславливает плотность распределения вероятности рассеяния света под углом, косинус которого равен  $\gamma$ . Для нахождения по известным в узловых точках  $\gamma_m$  и  $\gamma_{m-1}$  значениям индикатрисы  $X(\gamma_m)$  и  $X(\gamma_{m-1})$  используется следующее выражение:

$$\gamma = \gamma_m - (X(\gamma_m)(\gamma_m - \gamma_{m-1}) + \sqrt{X^2(\gamma_m)(\gamma_m - \gamma_{m-1})^2 - 2\Delta XM(\gamma_m - \gamma_{m-1})})/\Delta X,$$

$$\text{где } \Delta X = X(\gamma_m) - X(\gamma_{m-1}), \quad M = \int_{\gamma_m}^{\gamma} X(\gamma_j) d\gamma.$$

Азимутальный угол рассеяния  $\varphi$  «разыгрывается» по формуле  $\varphi = 2\pi\alpha$  ( $\alpha$  — случайное число). Если для определенности положить, что этот угол отсчитывается от плоскости, проходящей через точку  $\vec{r}_i$  и оптическую ось, то при известном  $\gamma$  направляющие косинусы траектории фотона после рассеяния в точке  $\vec{r}_{i+1}$  вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} a_{i+1} &= a_i \left( \gamma - \frac{b_i \xi_1}{\sqrt{1 - b_i^2}} \right) + \frac{\xi_2 c_i}{\sqrt{1 - b_i^2}}, \\ b_{i+1} &= b_i \gamma + \xi_1 \sqrt{1 - b_i^2}, \\ c_{i+1} &= c_i \left( \gamma - \frac{b_i \xi_1}{\sqrt{1 - b_i^2}} \right) - \frac{\xi_2 a_i}{\sqrt{1 - b_i^2}}, \end{aligned}$$

где  $\xi_1 = \cos \varphi \sqrt{1 - \gamma^2}$ ;  $\xi_2 = \sin \varphi \sqrt{1 - \gamma^2}$ .

В результате моделирования  $N$  траекторий фотонов рассчитывается распределение облученности на выходе прибора, на основании которого оцениваются его характеристики. На рис. 4, а показано, как изменяются в зависимости от настройки отношение (С/Ш) (сплошные линии) и величина контраста  $K_T$  (штриховые линии) при регистрации градиента  $(dn/dz)_{gr}$  в среде, показатель рассеяния которой принимает значения  $\delta = 0; 0,1; 0,5; 1; 1,5 \text{ м}^{-1}$  (на этом рисунке — соответственно кривые 1–5). Рассматривалась модификация прибора с круглой ( $R = 0,2 \text{ мм}$ ) осветительной диафрагмой и визуализирующей в виде «ножа». На рис. 4, б представлен вид характеристик прибора с квадратной осветительной диафрагмой (сторона квадрата  $0,4 \text{ мм}$ ) и визуализирующей в виде «нити». Расчеты проводились для случая, когда рассеивающая среда имеет индикатрису, которая считается наиболее типичной для морей и океанов [4]. Из кривых, приведенных на рис. 4, следует, что рассеяние в воде приводит к значительному ухудшению характеристик прибора, особенно в исходном положении настройки ( $\Delta r = 0$ ). Независимо от сочетания диафрагм в приборе влияние рассеяния в большей степени сказывается на величине контраста при регистрации изображения, чем на отношении (С/Ш) при фотоэлектрической регистрации. Независимо от способа регистрации при  $\Delta r = 0$  схема с круглой осветительной диафрагмой более «чувствительна» к изменению  $\delta$ , чем схема с квадратной диафрагмой. Чтобы уменьшить влияние рассеяния на измерения, иногда достаточно

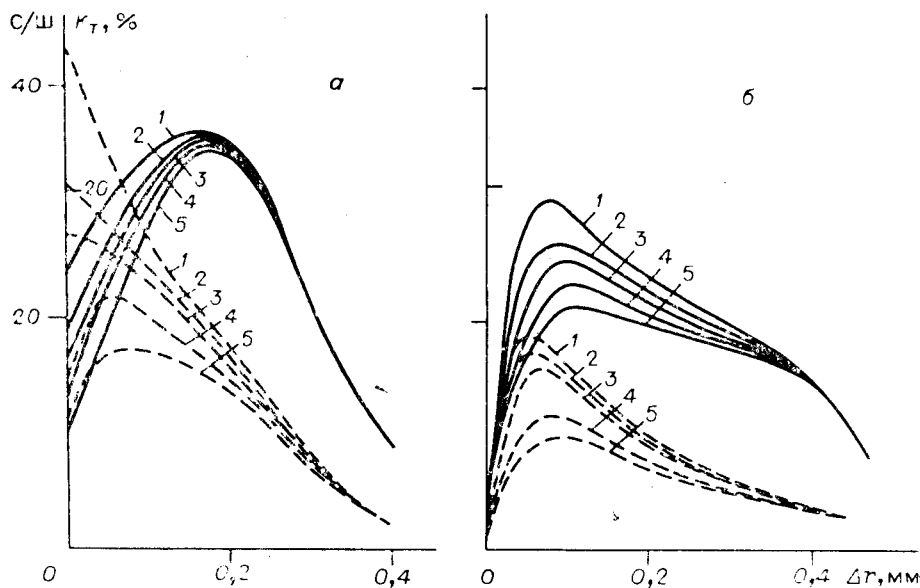


Рис. 4.

изменить положение настройки ( $\Delta r > 0$ ). При этом, как показывают данные рис. 4, помимо улучшения характеристик ослабляется влияние рассеяния, что объясняется уменьшением доли рассеянного света в регистрируемом потоке. Например, в приборе с круглой осветительной диафрагмой и «ножом» и фотоэлектрической регистрацией при  $\Delta r = 0,2$  мм влияние рассеяния практически исключается и в то же время достигается максимальное отношение (С/Ш). Таким образом, в приведенном примере показано, что с помощью численного эксперимента можно еще до проведения натуральных измерений количественно оценить выигрыш от применения той или иной схемы и режима работы прибора в среде с заданными параметрами.

Моделирование оптического эксперимента на ЭВМ, основанное на моделировании работы оптического прибора в исследуемой среде и использующее метод Монте-Карло для описания математических моделей прибора и среды, дает возможность зафиксировать выходной оптический сигнал, близкий к реальному, либо в виде гистограммы распределения облученности, либо в виде изображения (при использовании фотовывода ЭВМ); рассчитать параметры этого сигнала; определить характеристики прибора; оценить влияние среды на результаты оптических измерений. Иными словами, численный эксперимент позволяет, с одной стороны, еще до изготовления опытного образца прибора на стадии проектирования оценить его возможности для решения конкретных задач и заранее выбрать оптимальный вариант конструкции, а с другой стороны, еще до проведения натуральных измерений оценить влияние различных составляющих входного воздействия на параметры выходного сигнала. Все это свидетельствует о том, что моделирование на ЭВМ является эффективным инструментом совершенствования методики и техники натурального эксперимента.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Марчук Г. И. и др. Решение прямых и некоторых обратных задач атмосферной оптики методом Монте-Карло. Новосибирск: Наука, 1968.
2. Гончаров Э. Г., Коваленко Л. Г., Красовский Э. И. Вероятностная модель переноса излучения в трехмерном пространстве теневого прибора.— ОМП, 1977, № 2.



3. Гончаров Э. Г., Коваленко Л. Г. Оценка влияния рассеивающей среды на характеристики теневого прибора с помощью метода Монте-Карло.— Оптика и спектроскопия, 1980, т. 48, вып. 2.
4. Иванов А. П. Физические основы гидрооптики. Минск: Наука и техника, 1975.

Поступила в редакцию 15 января 1979 г.

УДК 681.34 : 537.213

М. Л. АЛЕКСАНДРОВ, А. Н. ПЯТАКИН, В. М. ТИХОНОВ

(Ленинград)

### ГИБРИДНАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА «СЕТКА — ЦВМ» ДЛЯ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ С ИСТОЧНИКАМИ

**Введение.** При расчете физических полей все более широкое применение находят гибридные вычислительные системы (ГВС). Большая эффективность использования аналоговых методов при решении краевых задач общеизвестна, а создание ГВС типа «сетка — ЦВМ» позволяет широко автоматизировать процесс расчета и задания узловых токов при решении уравнения с источниками поля и значительно ускорить процесс решения по сравнению с чисто аналоговыми или цифровыми методами. Входящая в состав ГВС цифровая машина должна быть достаточно мощной для того, чтобы не только проводить необходимые расчеты, но и обеспечивать автоматизацию решения задачи при поиске оптимальных параметров исследуемого устройства. Для создания ГВС такого класса наиболее подходящими являются машины серии ЕС ЭВМ. Вопросы сопряжения аналогового и цифрового процессоров при создании ГВС «сетка — ЦВМ» на базе ЕС ЭВМ при использовании сеток переменной структуры рассмотрены в работах [1, 2].

В настоящей работе изложены математические принципы моделирования электрических полей с источниками на фиксированной омической сетке, требования, предъявляемые к элементам токоввода в узлы сетки; приведены характеристики применяемых элементов токоввода, выполненных на аналоговом запоминающем устройстве. Описана разработанная ГВС и основные ее возможности.

**Математические принципы моделирования плоских электрических полей с источниками.** Исследование полей электронно-оптических систем при наличии в межэлектродном пространстве свободных зарядов, распределенных с плотностью  $\rho(x, y)$ , приводит к необходимости решения уравнения Пуассона для потенциала  $U(x, y)$  электрического поля:

$$\Delta U(x, y) = -\rho(x, y)/\epsilon_0 \quad (1)$$

( $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума).

Для напряжений в узлах омической сетки с шагом  $R$  (рис. 1, а, б) справедливо уравнение

$$\sum_{i=1}^4 V_i - 4V_0 = I_0 R, \quad (2)$$

аналогичное конечно-разностному уравнению поля для квадратной геометрической сетки с шагом  $h$  [3]:

$$\sum_{i=1}^4 U_i - 4U_0 = -\frac{h^2 \rho(x, y)}{\epsilon_0} + \delta, \quad (3)$$