

В. М. КОМАРОВ  
(Рыбинск Ярославской)

## ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ НА БАЗЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ФОТОПРИЕМНОЙ МАТРИЦЫ МФ-16

Получение достоверной оптической информации (ОИ) о различных объектах, расположенных в некоторой области пространства, является одним из важнейших аспектов решения многих научно-технических задач. Использование для этой цели вакуумных телевизионных трубок вследствие присущих им недостатков (большие габаритные размеры, значительные питающие напряжения, малая надежность) часто не удовлетворяет заданным требованиям. Успехи современной микроэлектроники привели к появлению интегральных матричных фотоприемных структур [1], создающих основу для микроминиатюризации оптико-электронных систем преобразования изображений. В настоящее время отечественной промышленностью серийно выпускается фотоприемная матрица МФ-16 с информационной структурой  $16 \times 16$ , которая успешно может быть использована при построении устройств восприятия оптической информации [2]. Процесс восприятия ОИ заключается в формировании с помощью объектива изображения объекта на информационном поле (ИП) матрицы и в его преобразовании в электрические сигналы, которое осуществляется при воздействии на фоточувствительное ИП энергии оптического излучения, собираемой объективом от зоны обзора и поверхности объекта, и выражается в разряде барьерных емкостей фоточувствительных ячеек.

Вследствие инерционного характера процесса накопления ОИ быстродействие фотозлектрического преобразователя (ПОИ) должно оказывать значительное влияние на временные затраты при решении поставленной задачи, особенно при последовательном считывании изображений. В связи с этим возникает задача определения условий восприятия ОИ и параметров ПОИ, обеспечивающих требуемое быстродействие.

Быстродействие ПОИ определяется длительностью интервала времени накопления ОИ, по истечении которого путем компарирования выходных сигналов ячеек фотоприемной матрицы выделяется изображение объекта на фоне зоны обзора. Для расчета быстродействия ПОИ необходимо получить соотношения, связывающие интервал времени накопления ОИ, обеспечивающий выделение изображения объекта, с параметрами, определяющими скорость этого процесса.

Очевидно, что быстродействие ПОИ в значительной степени определяется техническими характеристиками его чувствительного элемента. На рис. 1 приведена усредненная зависимость выходного напряжения  $U$  ячеек фотоприемной матрицы МФ-16 от энергии оптического излучения  $W$  при номинальном напряжении питания. Используя обработку данных измерений методом выравнивания [3], можно показать, что эта зависимость описывается функцией

$$U = U_0 e^{-W/W_0}, \quad (1)$$

где  $U_0$  — начальный уровень выходного темнового напряжения;  $W_0$  — постоянная энергии, характеризующая чувствительность ячеек матрицы. Параметры  $U_0$  и  $W_0$  могут быть найдены методом наименьших квадратов [4] и для рассматрива-

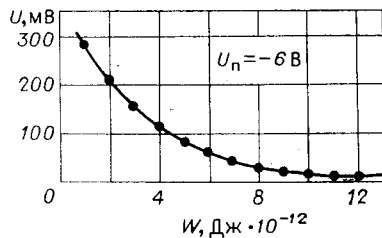


Рис. 1.

емой зависимости составляют  $U_0 = 380$  мВ,  $W_0 = 3,6 \cdot 10^{-12}$  Дж.

Для реальной фотоприемной матрицы в зависимости (1) учитывается как информативная энергия  $W_{\text{и}}$  оптического излучения, так и паразитная энергия  $W_{\text{п}}$ , обусловленная наличием темновых токов, т. е.  $W = W_{\text{и}} + W_{\text{п}}$ . Следовательно, выражение (1) можно записать в виде

$$U = U_0 e^{-W_{\text{и}}/W_0} e^{-W_{\text{п}}/W_0}. \quad (2)$$

Информативная энергия оптического излучения является потоком лучистой энергии, падающим на ИП фотоприемной матрицы. Поток создается некоторыми источниками излучения, практически всегда являющимися немонахроматическими. При непрерывном потоке немонахроматического излучения энергию, воздействующую на ячейку фотоприемной матрицы, запишем в виде

$$W_{\text{и}}(I, J) = R_{\text{и}}(I, J)St, \quad (3)$$

где  $I, J$  — координаты ячейки ИП;  $R_{\text{и}}(I, J)$  — интегральная плотность излучения, воздействующая на ячейку ИП с координатами  $(I, J)$ ;  $S$  — площадь фотоприемной области ячейки;  $t$  — текущее время.

Однако в [5] показано, что приемник излучения реагирует не на энергетический поток излучения, а на поток энергии, редуцированный к его спектральной характеристике. При этом значение плотности редуцированного потока определяется выражением

$$R_{\text{и,ред}} = R_{\text{max}} \int_0^{\infty} r_{\lambda} V_{\lambda\text{м}} d\lambda. \quad (4)$$

Здесь  $R_{\text{max}}$  — максимальная плотность потока излучения, соответствующего длине волны  $\lambda$ , при которой для получения определенной реакции необходим наименьший монохроматический поток;  $r_{\lambda}$  — относительная спектральная эффективность источника излучения;  $V_{\lambda\text{м}}$  — относительная спектральная чувствительность ячейки фотоприемной матрицы.

Ввиду известных трудностей измерения энергетических характеристик источников излучений, определяемых отсутствием необходимых для этого приборов, и широкого распространения приборов для измерения их световых характеристик целесообразно от энергетических величин перейти к световым. Зависимость освещенности  $E_{\text{м}}$  ИП фотоприемной матрицы от интегральной плотности потока излучения, падающего на него, устанавливается соотношением

$$E_{\text{м}} = R_{\text{max}} V_{\text{max}} \int_0^{\infty} r_{\lambda} V_{\lambda} d\lambda, \quad (5)$$

где  $V_{\text{max}}$  — максимальная спектральная световая эффективность;  $V_{\lambda}$  — относительная спектральная световая эффективность.

С помощью формул (4) и (5) можно вычислить редуцированный поток, воспринимаемый ячейкой, через освещенность ИП фотоприемной матрицы:

$$R_{\text{и,ред}} = \left( \int_0^{\infty} r_{\lambda} V_{\lambda\text{м}} d\lambda / V_{\text{max}} \int_0^{\infty} r_{\lambda} V_{\lambda} d\lambda \right) E_{\text{м}}. \quad (6)$$

Освещенность ИП фотоприемной матрицы создается потоком энергии, отражаемой от поверхности зоны обзора. Учитывая, что именно освещенность зоны обзора измеряется простейшим образом, необходимо перейти от освещенности  $E_{\text{м}}$  ИП матрицы к освещенности  $E_0$  зоны обзора. В [6] показано, что соотношение между этими величинами имеет вид

$$E_{\text{м}} = (1/(4K^2)) \gamma \rho E_0. \quad (7)$$

Здесь  $\gamma$  — коэффициент пропускания объектива ПОИ;  $K$  — диафрагменное число ( $1:K$  — относительное отверстие) объектива;  $\rho$  — коэффициент отражения зоны обзора.

Подставляя (7) в (6), а (6) в (3), находим

$$W_{II}(I, J) = (1/(4K^2)) \gamma \rho(I, J) S \left( \int_0^\infty r_\lambda V_{\lambda M} d\lambda / V_{\max} \int_0^\infty r_\lambda V_\lambda d\lambda \right) E_0 t. \quad (8)$$

приближенно дискретными матрицами с текущим временем накопления ОИ и с параметрами, определяющими скорость этого процесса:

$$U(I, J) = U_0 e^{-(1/(4K^2 V_{\max} W_0)) \gamma \rho(I, J) S I_\lambda E_0 t} e^{-W_{II}/W_0}. \quad (10)$$

Обозначив

$$\tau_{II} = 4K^2 V_{\max} W_0 / \gamma S I_\lambda E_0, \quad (11)$$

с учетом  $W_{II} = W_{II}(t)$  выражение (10) запишем в виде

$$U(I, J) = U_0 e^{-\rho(I, J)t/\tau_{II}} e^{-t/\tau_{II}},$$

где  $\tau_{II}$  — постоянная времени процесса паразитного накопления ОИ за счет темновых токов.

Формирование матрицы видеосигналов изображения зоны обзора  $B_{16 \times 16}$  осуществляется с помощью компаратора путем сравнения выходного напряжения  $U(I, J)$  ячеек с некоторым выбранным уровнем компарирования  $U_k^*$ :

$$B_{16 \times 16} = \|b(I, J)\|, \quad b(I, J) = \sigma_0^1 [U_k - U(I, J)].$$

Считая, что коэффициенты отражения объекта и фона составляют  $\rho_{об}$  и  $\rho_\phi$  соответственно, можно записать

$$U_{об}(t) = U_0 e^{-(\rho_{об}t/\tau_{II})} e^{-t/\tau_{II}},$$

$$U_\phi(t) = U_0 e^{-(\rho_\phi t/\tau_{II})} e^{-t/\tau_{II}}$$

( $\tau_{II}$  — постоянная времени процесса накопления оптической информации для поверхности с  $\rho = 1$ ).

Очевидно, что для выделения изображения объекта на фоне зоны обзора уровень компарирования должен выбираться в пределах зоны различимости

$$\Delta U(t) = |U_{об}(t) - U_\phi(t)|.$$

В реальных фотоприемных матрицах формирование достоверного изображения зоны обзора существенно усложняется технологическим разбросом параметров фоточувствительных ячеек. Это обуславливает различие их выходных напряжений при одинаковых значениях ОИ на входе. Обозначим относительный разброс начальных уровней выходного темнового напряжения через  $\Delta_U$ , а относительный разброс чувствительности и темновых токов, которые для простоты можно считать равными, через  $\Delta_W$ , после чего запишем

$$U_{об}(t) = U_0 (1 \pm \Delta_U) e^{-(\rho_{об}t/\tau_{II}(1 \pm \Delta_W))} e^{-t/\tau_{II}(1 \pm \Delta_W)}, \quad (12)$$

$$U_\phi(t) = U_0 (1 \pm \Delta_U) e^{-(\rho_\phi t/\tau_{II}(1 \pm \Delta_W))} e^{-t/\tau_{II}(1 \pm \Delta_W)}. \quad (13)$$

Зависимости (12) и (13) для случая  $\rho_{об} < \rho_\phi$  приведены на рис. 2, где штриховкой выделены зоны выходных напряжений  $U_{об}(t)$  и  $U_\phi(t)$ , обусловленные технологическим разбросом параметров ячеек.

\* Здесь использовано обозначение из [7].

Влияние технологического разброса параметров можно интерпретировать как влияние помехи, искажающей выходной сигнал фотоприемной матрицы. В [8] показано, что минимизация вероятности ошибки при приеме сигнала в условиях помех обеспечивается при выборе уровня оценки, равного половине разности амплитуд передаваемых сигналов. Следовательно, для получения минимальной вероятности ошибки при выделении изображения объекта на фоне зоны обзора уровень компарирования (оценки)  $U_K$  необходимо выбирать посередине зоны различимости  $\Delta U(t)$ , а ее величина в момент оценки значения ОИ должна быть максимальной.

Для исследования условий формирования изображения объекта в худшем случае обозначим через  $\rho_{\max}$  больший, а через  $\rho_{\min}$  меньший из коэффициентов отражения объекта  $\rho_{об}$  и фона  $\rho_{ф}$ , т. е.  $\rho_{\max} = \max\{\rho_{об}, \rho_{ф}\}$ ,  $\rho_{\min} = \min\{\rho_{об}, \rho_{ф}\}$ . Тогда величину зоны различимости  $\Delta U(t)$  можно записать в виде

$$\Delta U(t) = \left| U_0 \left[ (1 + \Delta_U) e^{-(\rho_{\max} t / \tau_n (1 + \Delta_W))} e^{-(t / \tau_n (1 + \Delta_W))} - (1 - \Delta_U) e^{-(\rho_{\min} t / \tau_n (1 - \Delta_W))} e^{-(t / \tau_n (1 - \Delta_W))} \right] \right|. \quad (14)$$

Оптимальный интервал времени накопления, соответствующий максимальному значению  $\Delta U(t)$ , легко найти из условия

$$\frac{\partial \Delta U(t)}{\partial t} \Big|_{t=t_{H_{opt}}} = 0.$$

После очевидных преобразований выражения (14) получим общую формулу для вычисления оптимального интервала времени накопления

$$t_{H_{opt1}} = \tau_n \frac{1 - \Delta_W^2}{(1 - \Delta_W) \rho_{\max} - (1 + \Delta_W) \rho_{\min} - 2\Delta_W (\tau_n / \tau_n)} \times \ln \frac{(1 + \Delta_U) (1 - \Delta_W) (1 + (\tau_n / \tau_n) \rho_{\max})}{(1 - \Delta_U) (1 + \Delta_W) (1 + (\tau_n / \tau_n) \rho_{\min})}. \quad (15)$$

Из выражения (15) следует, что выделение изображения объекта возможно лишь при выполнении условия

$$(1 - \Delta_W) \rho_{\max} > (1 + \Delta_W) \rho_{\min} + 2\Delta_W (\tau_n / \tau_n). \quad (16)$$

Однако при  $0 < \tau_n < \tau_n$  и изменении фона зоны обзора для простых сцен почти всегда удается подобрать значения коэффициента ее отражения  $\rho_{ф}$  относительно коэффициента отражения объекта  $\rho_{об}$  таким образом, чтобы условие (16) выполнялось, что обеспечивает выделение изображения объекта на фоне зоны обзора.

Кроме того, из анализа (15) следует, что при  $\rho_{\max} \gg \rho_{\min}$   $t_{H_{opt1}} \gg \tau_n / \rho_{\max}$ . Однако в фотоприемной матрице МФ-16 процесс преобразования оптической информации осуществляется за счет разряда барьерных емкостей фоточувствительных диодов. Принято считать, что экспоненциальный процесс разряда емкости практически заканчивается через интервал времени, равный трем постоянным времени. Поэтому, если в результате вычислений по формуле (15) получается  $t_{H_{opt1}} > 3(\tau_n / \rho_{\max})$ , интервал времени накопления следует брать равным (см. рис. 2):

$$t_{H_{opt2}} = 3(\tau_n / \rho_{\max}). \quad (17)$$

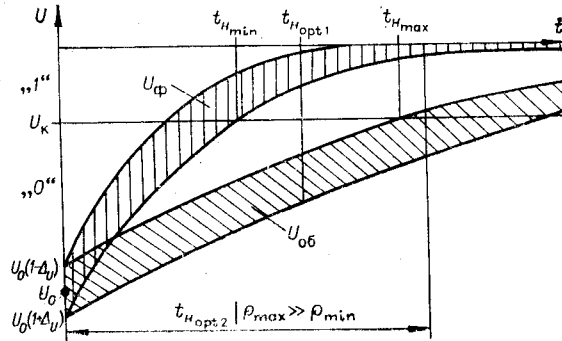


Рис. 2.

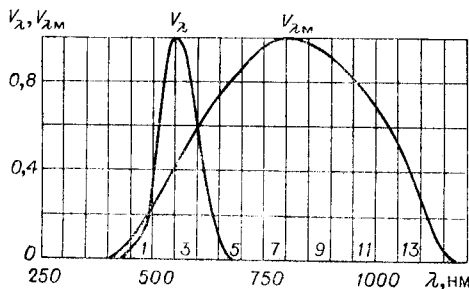


Рис. 3.

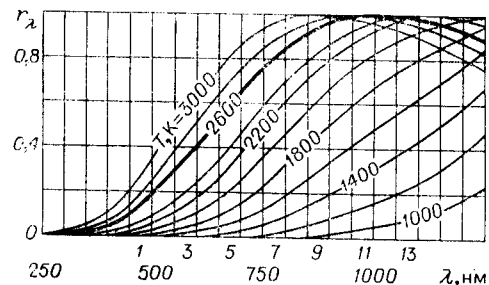


Рис. 4.

Необходимость использования формулы (15) или (17) для расчета интервала времени накопления определяется коэффициентами отражения объекта и фона зоны обзора в каждом конкретном случае.

После определения оптимального интервала времени накопления ОИ находится значение уровня компарирования  $U_k$ , обеспечивающего минимальную вероятность ошибки при формировании изображения зоны обзора:

$$U_k = |U_{\rho_{\max}}(t_{H_{\text{opt}}})| + \frac{1}{2} \Delta U(t_{H_{\text{opt}}}),$$

где  $U_{\rho_{\max}}(t_{H_{\text{opt}}})$  — значение выходного напряжения ячеек матрицы, соответствующих точкам зоны обзора с  $\rho = \rho_{\max}$ , в момент  $t = t_{H_{\text{opt}}}$ .

Таким образом, получены выражения (11), (15)–(17), связывающие интервал времени накопления ОИ с параметрами, определяющими скорость этого процесса, и позволяющие выбирать значения уровня компарирования, обеспечивающего выделение изображения объекта на фоне зоны обзора. Очевидно, что для уменьшения интервала времени накопления ОИ с целью увеличения быстродействия ПОИ наиболее эффективно увеличение относительного отверстия (уменьшение диафрагменного числа) объектива, а при постоянных конструктивных параметрах время накопления определяется в основном освещенностью зоны обзора.

При вычислении числовых значений интервала времени накопления наибольшую трудность представляет вычисление значения  $I_\lambda$  по формуле (9), что обуславливается сложностью аналитической записи функций  $V_\lambda$ ,  $V_{\lambda_m}$  и  $r_\lambda$ . Экспериментальные зависимости относительной спектральной эффективности  $V_\lambda$  и чувствительности  $V_{\lambda_m}$ , приведенные в [9], показаны на рис. 3.

Из анализа выражений (11), (15) следует, что для увеличения быстродействия ПОИ значение  $I_\lambda$  должно быть максимальным. Для этого необходимо, чтобы функции  $V_{\lambda_m}$  и  $r_\lambda$  были отличны от нуля в одном и том же интервале длин волн  $\lambda$ . Из сравнения относительной спектральной чувствительности  $V_{\lambda_m}$  ячеек фотоприемной матрицы с относительными спектральными эффективностями излучения  $r_\lambda$  различных источников освещения следует вывод о том, что этому требованию наиболее полно отвечают лампы накаливания. Относительные спектральные эффективности излучения  $r_\lambda$  ламп накаливания, экспериментально полученные в [5], приведены на рис. 4.

Аналитическая сложность рассмотренных функций определяет сложность интегрирования числителя и знаменателя формулы (9). Поэтому на практике операция интегрирования заменяется операцией суммирования. Для этого область видимого спектра разбивают на  $n_\lambda$  интервалов  $\Delta\lambda$  и вычисляют значение  $I_\lambda$  по приближенной формуле

$$I_\lambda \approx \sum_{i=1}^{n_\lambda} r_{\lambda_i} V_{\lambda_m i} / \sum_{i=1}^{n_\lambda} r_{\lambda_i} V_{\lambda_i}, \quad (18)$$

где  $r_{\lambda_i}$ ,  $V_{\lambda_i}$ ,  $V_{\lambda_m i}$  — средние значения относительных спектральной эффективности источника освещения, световой эффективности и спектраль-

ной чувствительности ячеек фотоприемной матрицы соответственно в интервалах длин волн от  $\lambda_i$  до  $\lambda_{i+1}$ .

Из анализа рис. 4 следует, что вид функции  $r_\lambda$  обуславливается температурой нити ламп накаливания, используемых для освещения зоны обзора. Зависимость температуры нити накала  $T$  от напряжения питания  $U \sim$  лампы накаливания определяется выражением [10]

$$T/T_0 = (U \sim / U_{H \sim})^{1/3}. \quad (19)$$

Здесь  $U_{H \sim}$  — номинальное напряжение питания лампы накаливания;  $T_0 = 2800$  К — температура нити накала при номинальном напряжении питания.

Таким образом, зная напряжение питания  $U \sim$  ламп накаливания в каждом конкретном случае, можно определить вид функции  $r_\lambda$  и рассчитать значение  $I_\lambda$ .

Подставляя в выражения (11), (15)–(17) конкретные параметры фотоприемной матрицы МФ-16:  $\Delta_w = 0,1$ ,  $\Delta_\sigma = 0,2$ ,  $\tau_n = 0,6$  с,  $S = 0,1 \times 0,1$  мм<sup>2</sup>,  $W_0 = 3,6 \cdot 10^{-12}$  Дж и значение максимальной спектральной световой эффективности  $V_{\max} = 683$  лм/Вт [9], получаем искомые зависимости для расчета быстродействия ПОИ и условие, определяющее возможность выделения изображения объекта на фоне зоны обзора:

$$t_{H_{opt1}} \approx \tau_n \frac{1}{0,9\rho_{\max} - 1,1\rho_{\min} - 0,2\tau_n/\tau_n} \ln 1,2 \frac{1 + (\tau_n/\tau_n) \rho_{\max}}{1 + (\tau_n/\tau_n) \rho_{\min}}, \quad (20)$$

$$t_{H_{opt2}} = 3 (\tau_n/\rho_{\max}), \quad (21)$$

$$0,9\rho_{\max} > 1,1\rho_{\min} + 0,2(\tau_n/\tau_n), \quad (22)$$

где

$$\tau_n = K^2/(\gamma I_\lambda E_0). \quad (23)$$

При вычислении  $\tau_n$  по формуле (23) значение освещенности  $E_0$  выражается в люксах, а результат вычислений получается в секундах. Из двух значений интервала времени накопления, рассчитанных по формулам (20) и (21), выбирается меньшее.

Таким образом, по заданным значениям параметров оптико-электронного преобразователя и условиям восприятия оптической информации, используя полученные в работе зависимости, можно рассчитать оптимальную длительность интервала накопления. (Пример расчета ПОИ приведен в приложении.) Аналогичным образом по заданной длительности интервала накопления  $t_n$ , т. е. по заданному быстродействию преобразователя оптической информации, могут быть рассчитаны основные параметры преобразователя: относительное отверстие объектива, условия освещения и коэффициент отражения зоны обзора, необходимые для обеспечения требуемого быстродействия.

Рассмотренная фотоприемная матрица МФ-16 или аналогичные приборы (МФ-14, МФ-6, МФ-6А) могут быть с успехом использованы в качестве чувствительных элементов преобразователей различных систем восприятия изображений. В частности, при непосредственном участии автора на базе этой матрицы была успешно решена задача создания визуального сенсора для адаптивного промышленного робота [2, 11], где двухградационное изображение зоны обзора форматом  $16 \times 16$  точек обеспечивало, например, вычисление координат центра тяжести и угла ориентации деталей, находящихся в произвольном положении, с точностью, достаточной для их захвата манипулятором промышленного робота. При исследовании визуального сенсора робота была осуществлена экспериментальная проверка предложенной выше методики расчета быстродействия преобразователя оптической информации. Она показала, что расчетные и опытные данные отличаются во всем допустимом диапазоне изменения определяющих параметров не более чем на 10%.

Хорошее совпадение теоретических и экспериментальных результатов дает основание предполагать, что полученные в работе соотношения

могут с успехом использоваться для расчета преобразователей оптической информации, а также условий восприятия изображений при решении других конкретных научно-технических задач.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

**Расчет быстродействия преобразователя оптической информации.** Исходные данные:  $\gamma = 0,9$ ;  $1:K = 1:2,8$ ;  $\rho_{\max} = 0,8$  (белый фон);  $\rho_{\min} = 0,2$  (черный объект); освещенность  $E_0 = 10\,000$  лк создается лампами накаливания с номинальным напряжением питания  $U_{H\sim} = 220$  В при их питании  $U_{\sim} = 180$  В.

1. По формуле (18) определяем температуру нити накала осветительных ламп и выбираем на рис. 4 соответствующую зависимость  $r_\lambda$ :

$$T = T_0(U_{\sim}/U_{H\sim})^{1/3} = 2800(180/220)^{1/3} = 2618 \text{ К.}$$

Функция  $r_\lambda$ , соответствующая  $T = 2600 \approx 2618^\circ$ , выделена на рис. 4 утолщенной линией (для удобства вычислений ее можно перенести на рис. 3).

2. По формуле (18) вычисляем значение  $I_\lambda$ . Для этого разбиваем интервал длин волн  $\lambda$ , на котором  $V_\lambda \neq 0$ ,  $V_{\lambda m} \neq 0$ , на  $n_\lambda = 14$  участков (см. рис. 3, 4) и находим

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{14} r_{\lambda_i} V_{\lambda m_i} &= 0,13 \cdot 0,15 + 0,25 \cdot 0,35 + 0,35 \cdot 0,5 + 0,45 \cdot 0,65 + 0,58 \times \\ &\times 0,8 + 0,7 \cdot 0,93 + 0,8 \cdot 0,98 + 0,87 \cdot 0,98 + 0,94 \cdot 0,95 + 0,97 \cdot 0,87 + 1,0 \times \\ &\times 0,75 + 1,0 \cdot 0,6 + 1,0 \cdot 0,4 + 0,97 \cdot 0,15 = 6,95; \\ \sum_{i=1}^{14} r_{\lambda_i} V_{\lambda_i} &= 0,13 \cdot 0,12 + 0,25 \cdot 0,8 + 0,35 \cdot 0,9 + 0,45 \cdot 0,28 = 0,65. \text{ Отсюда} \\ I_\lambda &= 6,95/0,65 = 10,6. \end{aligned}$$

3. По формуле (23) получим величину

$$\tau_n = 2,8^2 / (0,9 \cdot 10,6 \cdot 10\,000) = 82 \cdot 10^{-6} \text{ с,}$$

а по формулам (20) и (24) — значение оптимальных интервалов времени накопления:

$$\begin{aligned} t_{H_{opt1}} &= 82 \cdot 10^{-6} \frac{1}{0,9 \cdot 0,8 - 1,1 \cdot 0,2 - 0,2(82 \cdot 10^{-6})/0,6} \ln 1,2 \frac{1 + (0,6/(82 \cdot 10^{-6})) \cdot 0,8}{1 + (0,6/(82 \cdot 10^{-6})) \cdot 0,2} = \\ &= 257 \cdot 10^{-6} \text{ с;} \\ t_{H_{opt2}} &= 3 \frac{82 \cdot 10^{-6}}{0,9} = 307 \cdot 10^{-6} \text{ с.} \end{aligned}$$

Таким образом, искомый интервал накопления ОИ для рассматриваемого случая составляет 257 мкс.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Weimar P. K. Image sensors for solid state cameras.— Advances in Electron. and Electron Phys., 1975, vol. 37, p. 181—262.
2. Гладштейн М. А., Комаров В. М. Использование фотоприемной матрицы МФ-6 в качестве преобразователя оптической информации.— Измерит. техника, 1980, № 8.
3. Березин И. С., Жидков Н. П. Методы вычислений.— М.: Физматгиз, 1962, т. 2.
4. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий.— М.: Наука, 1971.
5. Елисеев В. К. Светотехнический расчет фотозлектрических преобразователей изображения.— В кн.: Распознавание образов и конструирование читающих автоматов. Киев: Ин-т кибернетики АН УССР, 1966, вып. 1.
6. Гуревич С. Б. Теория и расчет не вещательных систем телевидения.— Л.: Энергия, 1970.
7. Каляев А. В. Теория цифровых интегрирующих машин и структур.— М.: Сов. радио, 1970.
8. Харкевич А. А. Борьба с помехами.— М.: Наука, 1965.
9. Тиходеев П. М. Световые измерения в светотехнике (фотометрия).— М.— Л.: Госэнергоиздат, 1962.

10. Вознесенская З. С., Скобелев В. М. Электрические источники света.— М.: Госэнергоиздат, 1957.  
 11. Гладштейн М. А., Комаров В. М. Оптоэлектронный преобразователь изображения на базе интегральной фотоприемной матрицы МФ-6.— ПТЭ, 1982, № 1.

Поступила в редакцию 5 марта 1981 г.;  
 окончательный вариант — 17 января 1983 г.

УДК 535.317.2 : 531.715.2

Р. М. БЫЧКОВ, Б. Е. КРИВЕНКОВ, Ю. В. ЧУГУЙ  
 (Новосибирск)

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ДИФРАКЦИОННЫХ МЕТОДОВ РАЗМЕРНОГО КОНТРОЛЯ

**Введение.** Дифракционные методы контроля, как известно [1—4], основаны на измерении геометрических параметров дифракционной картины Фраунгофера — спектра мощности Фурье тепевого изображения контролируемого изделия. Инвариантность спектра к смещению изделия открывает возможность организации высокопроизводительного контроля изделий в процессе их движения по конвейерной линии. Если исходное изделие непрозрачно (валики, винты и т. д.), то упомянутое свойство спектра справедливо в случае неограниченной апертуры Фурье-объектива. При конечных ее размерах в формировании спектра участвуют волны, дифрагированные на изделии и апертуре. Это приводит к искажениям спектра мощности изображения изделия. При контроле непрозрачных изделий отмеченный фактор является одним из основных источников погрешностей измерений.

Наиболее простой и доступный способ уменьшения воздействия апертуры на спектр изображения изделия — ее аподизация [5]. В работе [6] показано, что при использовании в качестве аподизаторов гауссовых лазерных пучков размеры контролируемых изделий должны быть в десятки раз меньше размеров этих пучков, что ведет к значительным энергетическим потерям и резкому сокращению верхнего диапазона измерений (на практике до 1 мм). Для его расширения до величины, сопоставимой с размером апертуры (10 и более миллиметров), нами в [4] предложено использовать аподизирующие апертуры на основе бинарных диафрагм и двойную фильтрацию спектров. Заметим, что идея фильтрации позже применена для обнаружения малых слабоконтрастных объектов [7].

В настоящей работе исследуется эффективность методов аподиза-

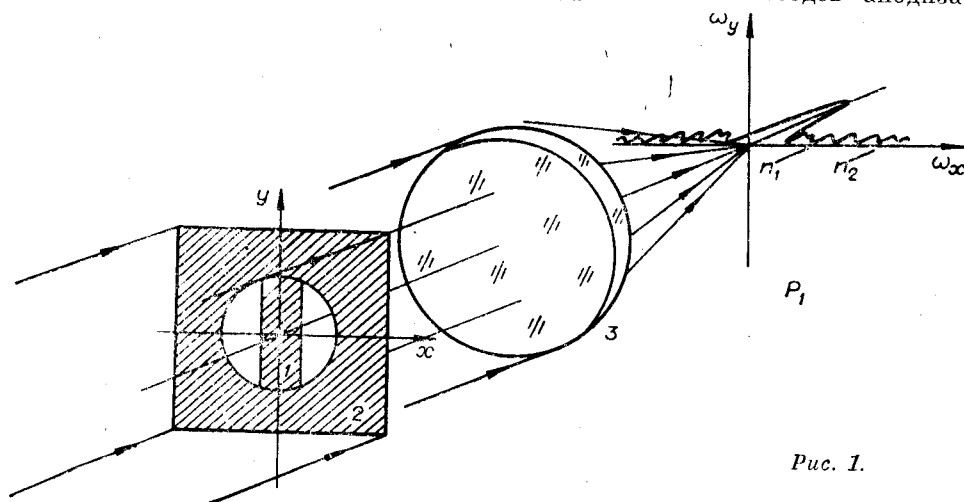


Рис. 1.