

## ОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

УДК 621.378; 681.327

И. С. ГИБИН  
(Новосибирск)

### РАСЧЕТ И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ГОЛОГРАММНЫХ ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Известны оценки предельной плотности записи информации голографическим методом, которые дают  $10^7$  дв. зн./мм<sup>2</sup> для плоских голограмм [1] и  $10^{10}$  дв. зн./мм<sup>3</sup> — для объемных [2].

В реальных случаях плотность записи информации ниже предельной, так как она ограничивается уровнем фона в оптических системах голограммных запоминающих устройств (ГЗУ). Основными составляющими фона являются: 1) фон, обусловленный дифракционным «размытием» восстановленного изображения; 2) межмодуляционный фон, вызванный нелинейной регистрацией голограмм; 3) фон рассеяния.

Для повышения плотности записи информации необходимо уменьшать расстояние между разрядными ячейками в изображении массива цифровой информации и размер голограммы. Однако при этом в восстановленном изображении происходит увеличение дифракционного фона. Влияние дифракционного фона может быть снижено путем уменьшения площади чувствительных элементов фотоматрицы, но вместе с этим происходит падение мощности принимаемого сигнала, что при слабой интенсивности восстановленного изображения является нежелательным.

Стремление повысить уровень световой мощности, приходящейся на разрядную ячейку, путем повышения дифракционной эффективности голограммы приводит к увеличению межмодуляционного фона и в конечном счете к снижению достоверности считывания информации.

Возникает, таким образом, задача оптимального выбора параметров оптической системы ГЗУ для того, чтобы обеспечить максимальную плотность записи информации при допустимых отношении сигнал/фон и уровне мощности принимаемого сигнала, исходя из реальных ограничений, накладываемых элементами этой системы.

Решение подобных задач проводилось в [3, 4, 5]. Так, в [3] произведена оценка уровня дифракционного фона в восстановленном изображении и оптимизация геометрии транспаранта и фотоприемной матрицы. Рассмотрен случай, когда распределение амплитуды света в восстановленном изображении разрядной ячейки описывается гауссовой. В [4] анализировалась ситуация, когда голограмма записывается и восстанавливается с помощью опорного светового пучка с гауссовым распределением интенсивности. При этом размеры разрядной ячейки на транспаранте и элемента фотоматрицы предполагались фиксированными и определялись эффективным диаметром опорного пучка. Эксперимен-

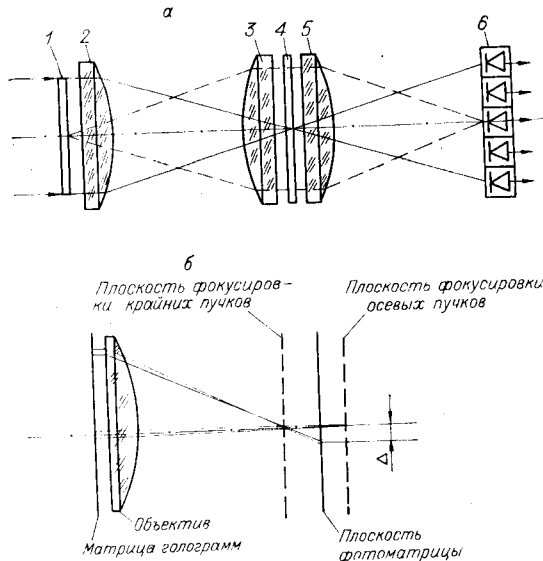


Рис. 1.

объективов, чувствительность и уровень собственных шумов фотоприемников, применяемых для считывания информации. Рассмотрены случаи восстановления голограмм световыми волнами с равномерным и гауссовым распределениями интенсивности по сечению. Первый из них характерен, к примеру, для ГЗУ с ассоциативной выборкой информации [6] и когерентно-оптических анализаторов спектра [7], второй — для ГЗУ с адресной выборкой.

**Плотность записи и объем памяти.** Схема сигнального канала оптической системы ГЗУ приведена на рис. 1, а. Здесь 1 — транспарант с регистрируемым изображением; 2, 3 — объективы преобразования Фурье; 3, 5 — объективы переноса изображения из плоскости транспаранта в плоскость фотоматрицы 6; 4 — матрица голограмм. Предполагается, что объективы 2, 3 и 5 имеют одинаковые фокусные расстояния.

На транспаранте представлено изображение матрицы разрядных ячеек с коэффициентами пропускания 1 или 0 в зависимости от состояния двоичного разряда, которому соответствует эта ячейка. Количество ячеек на транспаранте  $N = (l/t)^2$ , где  $l$  — размер стороны транспаранта,  $t$  — расстояние между ячейками.

Плотность записи информации определяется из выражения

$$C = (l/th)^2, \quad (1)$$

где  $h$  — размер стороны голограммы. Если размер стороны транспаранта выразить через световой диаметр объектива 2, т. е. принять  $l = Ak/\sqrt{2}$ , то

$$C = \left( \frac{Ak}{\sqrt{2}th} \right)^2, \quad (2)$$

где  $k$  — коэффициент использования апертуры (определяется из конструктивных соображений),  $A$  — световой диаметр объектива 2.

Формула (2) может быть записана в более удобном для анализа виде:

$$C = \left( \frac{A_{\text{отн}} \pi k}{\sqrt{2} T \lambda} \right)^2, \quad (3)$$

где  $T = \frac{\pi th}{\lambda f}$  — расстояние между центрами разрядных ячеек в радианах,  $A_{\text{отн}} = A/l$  — относительное отверстие объектива 2.

тальная оценка уровней отдельных составляющих фона для некоторых частных случаев проведена в [5].

Настоящая работа посвящена вопросам расчета и выбора основных параметров оптической системы ГЗУ с точки зрения обеспечения максимальной плотности записи информации при допустимых отношении сигнал/фон и уровне световой мощности в восстановленном изображении. Расчеты произведены в предположении, что размер голограммы не определяется размерами разрядных ячеек и фотоприемников и является фиксированным. Учтены такие ограничения, как aberrации

Количество голограмм памяти определим по формуле

$$m = \left( \frac{A_2 k}{\sqrt{2} h \gamma} \right)^2. \quad (4)$$

Здесь  $A_2$  — световой диаметр объективов 3 и 5,  $\gamma$  — скважность расположения голограмм.

Из (3) и (4) следует вывод о том, что для повышения плотности записи и емкости памяти ГЗУ необходимо применять объективы с возможно большими относительными отверстиями и световыми диаметрами.

Однако с увеличением относительных отверстий объективов существенно возрастают aberrации, проявляющиеся в оптических системах ГЗУ в том, что изображения, восстановленные из разных голограмм, будут в плоскости фотоматрицы искажены и сдвинуты друг относительно друга. Это объясняется тем, что пучки лучей, формирующие изображения, проходят через разные участки объектива и при наличии aberrаций фокусируются в различных плоскостях. Так как изображения проектируются под произвольными углами, то в плоскости фотоматрицы будет наблюдаться смещение точек изображений на величину  $\Delta$ , как показано на рис. 1, б, причем крайние точки будут иметь больший сдвиг, чем центральные. Максимальный сдвиг будет тогда, когда изображения восстанавливаются из крайних голограмм. Поэтому допустимый сдвиг точек изображения будет определять разрешающую способность объективов и ограничивать их относительные отверстия.

**Форма и относительная мощность сигнала.** Оценим вид изображения разрядной ячейки в выходной плоскости, предполагая, что распределение амплитуды по сечению восстанавливающего пучка (с точностью до коэффициента) описывается выражением

$$A(p, q) = \exp[-R(p^2 + q^2)],$$

где  $p = 2\xi/h$ ,  $q = 2\mu/h$  — нормированные координаты в плоскости голограммы;  $R$  — коэффициент затухания амплитуды восстанавливающей волны, а  $\xi$  и  $\mu$  — линейные координаты в плоскости голограммы.

Если разрядная ячейка представляет собой прямоугольник с размерами  $b \times b$ , то амплитудное распределение света в плоскости голограммы с точностью до коэффициентов и слагаемых, не имеющих отношения к дальнейшему изложению, имеет вид

$$F(p, q) = F(p) F(q) = \frac{\sin(Bp/2)}{p} \frac{\sin(Bq/2)}{q} \exp[-R(p^2 + q^2)], \quad (5)$$

где  $B = \frac{\pi b h}{\lambda f}$  — размер разрядной ячейки в радианах.

Поле в выходной плоскости найдем, выполнив над выражением (5) операцию преобразования Фурье:

$$f(u, v) = 4 \int_0^1 \int_0^1 F(p, q) \cos(up) \cos(vq) dp dq, \quad (6)$$

где  $u = \frac{\pi x' h}{\lambda f}$ ,  $v = \frac{\pi y' h}{\lambda f}$  — угловые координаты выходной плоскости в радианах,  $x'$ ,  $y'$  — линейные координаты выходной плоскости.

Рассмотрим теперь случай, когда пропускание ячейки с координатами  $(x=0, y=0)$  равно нулю, а состояния соседних ячеек с координатами  $(x = \pm ti; y = \pm ti, i = 1, 2, \dots, N)$  являются независимыми и с вероятностью  $P_i$  принимают значения либо 0, либо 1. Тогда среднее значение распределения амплитуды световой волны в окрестности

«нулевой» разрядной ячейки имеет вид

$$f_0(u, v) = 4 \sum_{i=1}^N P_i \int_0^1 \int_0^1 F(p, q) \{ (\cos[(u + iT)p] + \cos[(u - iT)p] \cos(vq) + \\ + (\cos[(v + iT)q] + \cos[(v - iT)q] \cos(up)) \} dpdq. \quad (7)$$

Если при записи голограммы перед транспарантом находилась маска со случайно расположенными фазосдвигающими ячейками, то в среднем по изображению сложение дифракционных картин в выходной плоскости происходит на уровне интенсивностей [8].

В этом случае поле интенсивности

$$f_0(u, v) = \langle f_0^2(u, v) \rangle = 16 \sum_{i=1}^N P_i \left\{ \left[ \int_0^1 \int_0^1 F(p, q) \cos[(u + iT)p] \times \right. \right. \\ \times \left. \left. \cos(vq) dpdq \right]^2 + \left[ \int_0^1 \int_0^1 F(p, q) \cos[(u - iT)p] \cos(vq) dpdq \right]^2 + \right. \\ \left. + \left[ \int_0^1 \int_0^1 F(p, q) \cos[(v + iT)q] \cos(up) dpdq \right]^2 + \right. \\ \left. + \left[ \int_0^1 \int_0^1 F(p, q) \cos[(v - iT)q] \cos(up) dpdq \right]^2 \right\}, \quad (8)$$

где угловые скобки означают усреднение по изображению.

На рис. 2 приведены графики распределения интенсивности света в окрестности «нулевой» разрядной ячейки для случаев восстановления голограммы плоской (см. рис. 2, а) и гауссовой (см. рис. 2, б) опорными волнами. В первом случае коэффициент затухания  $R=0$ , во

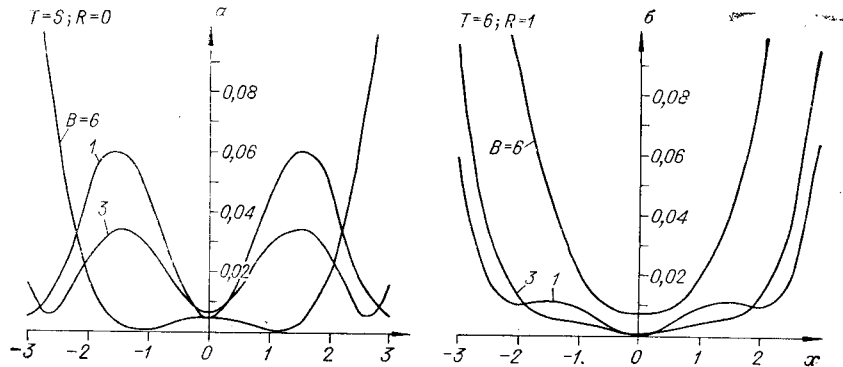


Рис. 2.

втором —  $R=1$ , что соответствует падению интенсивности восстанавливающей волны на краю голограммы в  $1/e^2$  раз. Графики получены при  $T=6$  и  $B=1, 3, 6$ . При расчете предполагалось, что «нулевая» ячейка окружена четырьмя единичными ячейками.

Из сопоставления рис. 2, а и 2, б можно сделать вывод о том, что при восстановлении голограммы волной с гауссовым распределением интенсивности происходит эффект сглаживания изображений разрядных ячеек, вследствие чего уровень дифракционного фона в рассматриваемой области выходной плоскости уменьшается и появляется возможность более плотного размещения информации на транспаранте.

Если в точке  $(x'=0, y'=0)$  выходной плоскости разместить фотоприемник с размерами светочувствительной поверхности  $d \times d$ , то вы-

ходной сигнал будет пропорционален мощности дифракционного фона

$$\Phi_{\text{д}} = \int_{-D/2}^{D/2} \int_{-D/2}^{D/2} I_0(u, v) dudv = 64 \sum_{i=1}^N P_i \int_{-D/2}^{D/2} \int_0^1 \left[ \int_0^1 F(p) \cos[(u + iT)p] dp \int_0^1 F(q) \cos(vq) dq \right]^2 dudv.$$

Здесь  $D = \frac{\pi dh}{\lambda f}$ .

Можно показать, что в первом приближении мощность дифракционного фона обратно пропорциональна квадрату номера ячейки, т. е.

$$\Phi_{\text{д}} = 64 \sum_{i=1}^N \frac{P_i}{i^2} \int_{-D/2}^{D/2} \int_0^1 \left[ \int_0^1 F(p) \cos[(u + T)p] dp \int_0^1 F(q) \cos(vq) dq \right]^2 dudv.$$

Если считать, что пропускание ячеек равно либо 0, либо 1 с равной вероятностью  $P_i = 0,5$ , то с учетом того, что сумма ряда  $\sum_i \frac{1}{i^2} = \frac{\pi^2}{6}$ , среднее значение дифракционного фона

$$\Phi_{\text{д}} = 6\pi^2 \int_{-D/2}^{D/2} \int_0^1 \left[ \int_0^1 F(p) \cos[(u + T)p] dp \int_0^1 F(q) \cos(vq) dq \right]^2 dudv. \quad (9)$$

Мощность полезного сигнала находим из выражения

$$S = 32 \left\{ \int_0^{D/2} \left[ \int_0^1 F(p) \cos(up) dp \right]^2 du \right\}. \quad (10)$$

Графики изменения относительной мощности считываемого сигнала в зависимости от размера фотоприемника приведены на рис. 3, а ( $R=0$ ) и рис. 3, б ( $R=1$ ). Можно видеть, что при  $D > 6$  увеличение

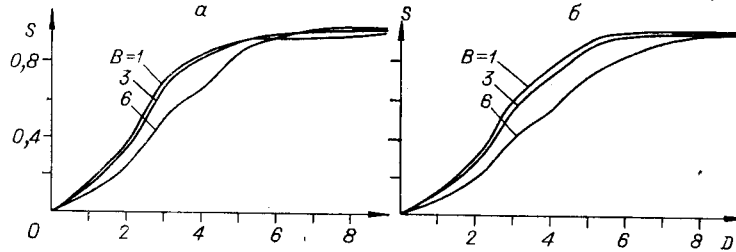


Рис. 3.

относительной мощности сигнала практически не происходит, а при  $D < 3$  относительный уровень сигнала падает ниже 0,6. Очевидно, что при дальнейшем анализе значение параметра  $D$  целесообразно выбирать в диапазоне  $3 \leq D \leq 6$ .

**Отношение сигнал/дифракционный фон.** Принимая во внимание (9) и (10), получим выражение для оценки отношения сигнал/дифракционный фон:

$$\frac{S}{\Phi_{\text{д}}} = \frac{\int_0^{D/2} \left[ \int_0^1 F(p) \cos(up) dp \right]^2 du}{2 \int_{-D/2}^{D/2} \left[ \int_0^1 F(p) \cos[(u + T)p] dp \right]^2 du}. \quad (11)$$

Определение параметров  $D$ ,  $B$  и  $T$  (при заданном отношении  $S/\Phi_{\text{д}}$ ) аналитическим путем из уравнения (11) представляется затруднительным. Поэтому воспользуемся данными численных расчетов на ЭВМ.

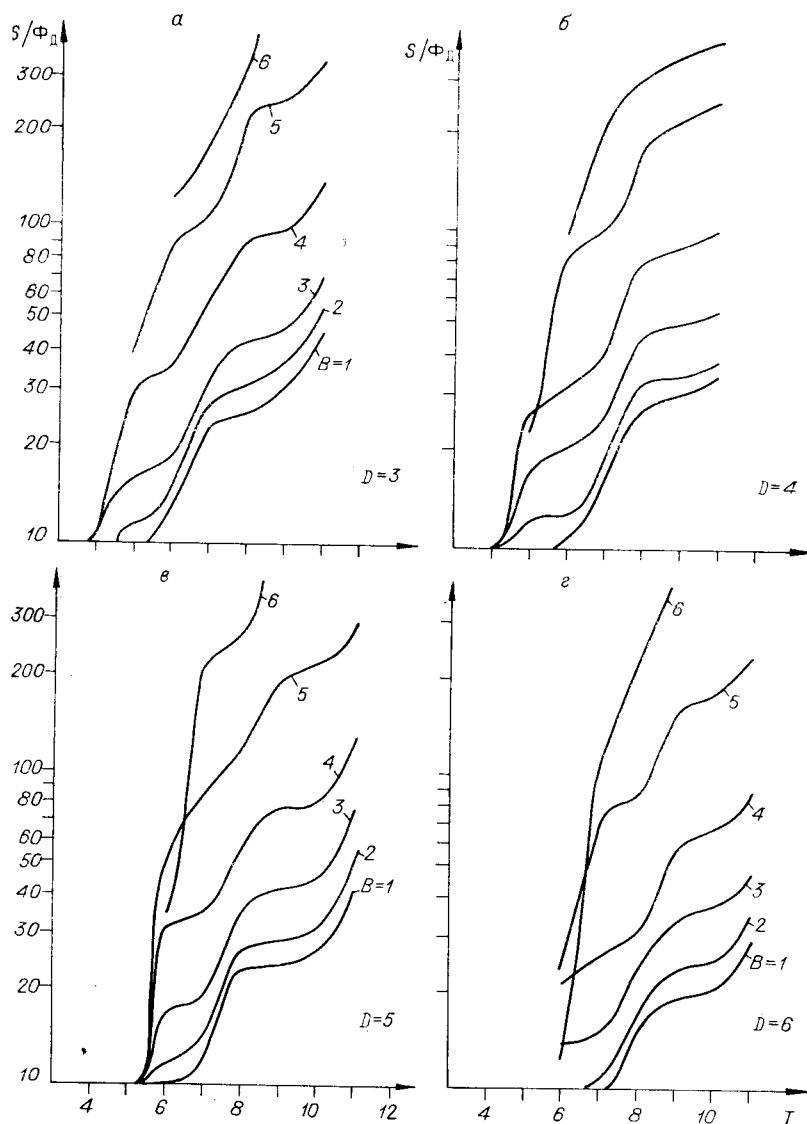


Рис. 4.

На рис. 4 ( $R=0$ ) и рис. 5 ( $R=1$ ) приведены семейства кривых, характеризующих зависимость  $S/\Phi_d$  от расстояния между разрядными ячейками  $T$  при  $D=3$  (см. рис. 4, *a*; 5, *a*);  $D=4$  (см. рис. 4, *б*; 5, *б*);  $D=5$  (см. рис. 4, *в*; 5, *в*);  $D=6$  (см. рис. 4, *г*; 5, *г*) и  $B=1, 2, \dots, 6$ . Эти зависимости подтверждают ранее сделанное утверждение о том, что при уменьшении  $T$  и увеличении  $D$  происходит падение отношения  $S/\Phi_d$ , однако при  $R=1$  (гауссова волна) значение отношения  $S/\Phi_d$  в целом выше, чем при  $R=0$  (плоская волна). Отсюда следует, что при восстановлении голограмм гауссовой световой волной возможно более плотное расположение разрядных ячеек. Кроме того, при  $R=0$  с увеличением размера разрядной ячейки  $B$  отношение  $S/\Phi_d$  возрастает практически для всех  $D$  и  $T$ , тогда как при  $R=1$  рост  $S/\Phi_d$  наблюдается только для больших  $T$ . Это означает, что в случаях  $R=0$  и  $R=1$  требования к размеру  $B$  разрядной ячейки будут различны.

Графики рис. 4 и 5 указывают не только на качественную, но и на количественную взаимосвязь параметров  $D$ ,  $B$  и  $T$ . Поэтому ими мож-

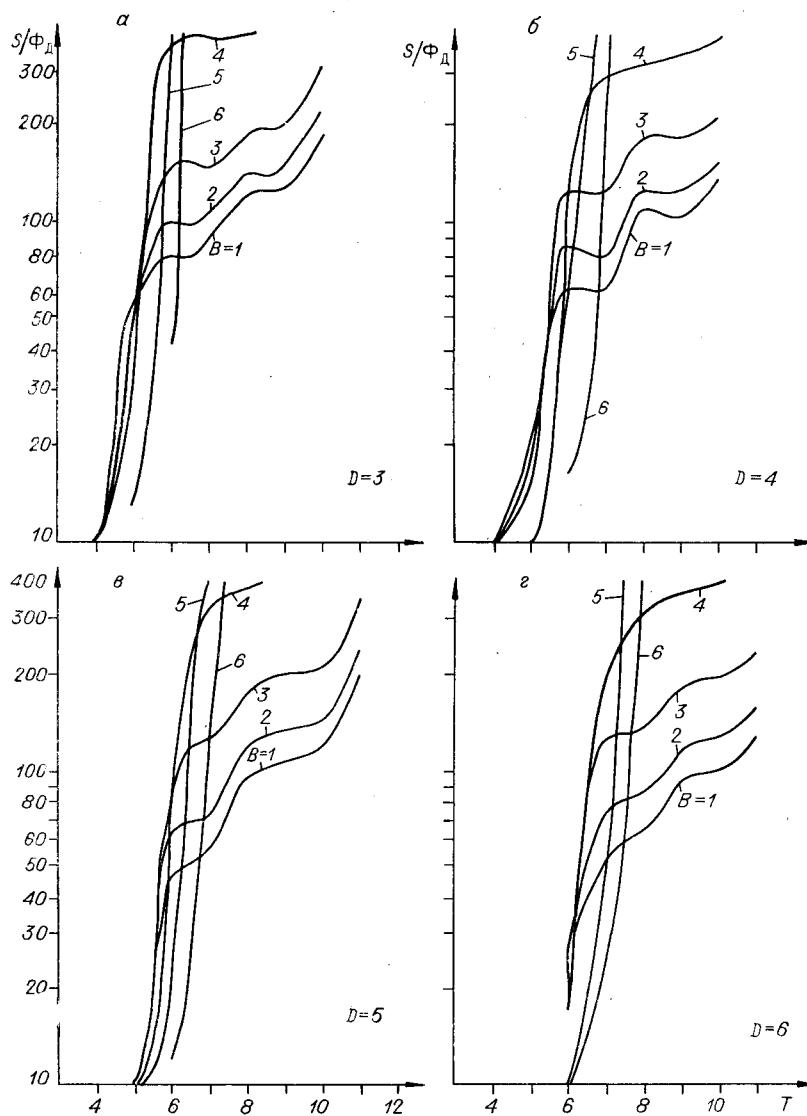


Рис. 5.

но воспользоваться при выборе геометрии элементов оптической системы ГЗУ. Предположим, что  $S/\Phi_d=100$ . Тогда по данным рис. 4 и 5 можно получить семейства кривых, характеризующих зависимость расстояния  $T$  между ячейками от размера  $B$  при принятом отношении  $S/\Phi_d$ . Это семейство кривых показано на рис. 6, а. Штриховыми линиями показаны кривые для случая  $R=0$ , сплошными —  $R=1$ . Видно, что минимальное расстояние между ячейками, а следовательно, и максимальная плотность записи достигается при  $B=6$  ( $R=0$ ) и  $B \approx 3,5$  ( $R=1$ ).

Для выбора размера фотоприемника  $D$  воспользуемся критерием оптимальности, введенным в [3] и равным произведению плотности записи информации на мощность принимаемого сигнала  $K_{\text{опт}}=SC$ . Из (3) следует, что плотность записи информации обратно пропорциональна квадрату расстояния между разрядными ячейками, т. е.  $C \sim 1/T^2$ . Тогда  $K_{\text{опт}}=S/T^2$ . Зависимость нормированного критерия  $K_{\text{опт}}$

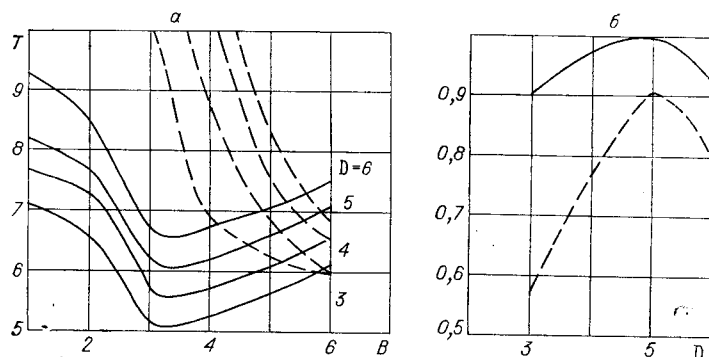


Рис. 6.

от размера фотоприемника  $D$  для  $R=0$  и  $R=1$  показана на рис. 6, б. Графики получены с помощью данных, приведенных на рис. 3, а, б и 6, а. Оптимальный размер фотоприемника, при котором обеспечивается максимальная плотность записи информации и  $S/\Phi_d=100$ , в обоих случаях составляет  $D=5$ . При этом расстояние между разрядными ячейками для плоской восстанавливающей волны  $T_n=6,5$ , для гауссовой —  $T_n=6$  (см. рис. 6, а).

Для определения геометрии матрицы голограмм оценим уровень перекрестных помех в восстановленном изображении, появляющихся вследствие восстановления опорным пучком соседних голограмм. Такого рода помехи имеют место только в случае восстановления голограмм гауссовым световым пучком. В случае восстановления плоской волной света всех голограмм [6, 7] изображения из соседних голограмм не являются помехой.

Определим отношение сигнал/фон от перекрестного наложения голограмм:

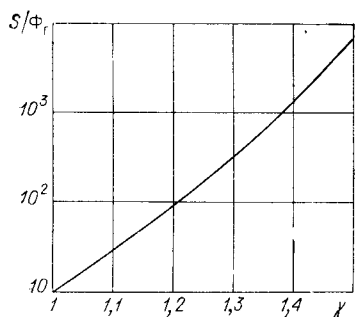


Рис. 7.

$$\frac{S}{\Phi_r} = \frac{\int_0^1 [\exp(-Rp^2)]^2 dp}{2 \int_{-1}^1 \{\exp[-R(p+2\gamma)]\}^2 dp}$$

График изменения  $S/\Phi_r$  от скважности расположения голограмм  $\gamma$  приведен на рис. 7, откуда видно, что уже при  $\gamma=1,4$  отношение  $S/\Phi_r$  становится порядка  $10^3$ . (Расчет проводился для случая  $R=1$ ). Поэтому примем  $\gamma=1,4$  и в дальнейшем учитывать влияние этой составляющей фона не будем.

Данные проведенных расчетов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Вид восстанавливающей волны	Отношение $S/\Phi_d$	Размер разрядной ячейки $B$ (рад)	Размер фотоприемника $D$ (рад)	Расстояние между ячейками $T$ (рад)	Скважность учаска $T/B$	Скважность фотоприемников $T/D$	Скважность голограмм $\gamma$
Плоская	100	6	5	6,5	1,1	1,3	1
Гауссова	100	3,5	5	6	1,7	1,2	1,4



Определим теперь влияние сдвигов восстановленного изображения относительно фотоматрицы на мощность считываемого сигнала и отношение сигнал/дифракционный фон, пользуясь выражениями

$$S(u + \Delta, v) = \int_0^{D/2} \left\{ \int_0^1 F(p) \cos[(u + \Delta)p] dp \right\}^2 du \int_0^{D/2} \left\{ \int_0^1 F(q) \cos(vq) dq \right\}^2 dv$$

(12)

и

$$\frac{S}{\Phi_d} = \frac{S(u + \Delta, v)}{S(u + T + \Delta, v) + S(u - T + \Delta, v) + 2S(u + \Delta, v + T)},$$

(13)

где  $\Delta$  — сдвиг восстановленного изображения в радианах.

Измерение мощности сигнала и отношения  $S/\Phi_d$  в зависимости от сдвига показано на рис. 8. Сплошными линиями проведены кривые для случая восстановления голограммы гауссовой волной ( $R=1$ ), штриховыми — плоской волной ( $R=0$ ). Пологие кривые соответствуют изменению относительной мощности сигнала, крутые — изменению отношения сигнал/фон. Если известны значения минимально допустимых отношения  $S/\Phi_d$  или относительной мощности сигнала  $S_{\text{доп}}$ , то из графиков рис. 8 можно определить допустимое смещение изображения в выходной плоскости и сформулировать требования к разрешающей способности системы объективов 3 и 5. Значение разрешающей способности можно определить по формуле  $P = 1/\delta = \frac{\pi h}{\lambda f \Delta}$ , где  $\delta$  — допустимый сдвиг изображения в миллиметрах.

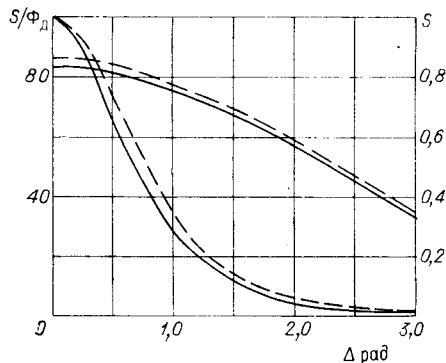


Рис. 8.

Для оценки минимально допустимых мощности сигнала и отношения  $S/\Phi_d$  необходимо учесть влияние других составляющих фона.

**Межмодуляционный фон и фон рассеяния.** При нелинейной регистрации амплитудное распределение света первого дифракционного порядка в плоскости голограммы описывается выражением

$$\Phi_1(u) = \sum_{n=1}^N k_n |F(p)|^{2n-1} \exp[j\varphi(p)],$$

(14)

где  $n=1, 2, \dots, N$ ;  $k_n$  — коэффициенты, зависящие от параметров аппроксимации характеристической кривой фотоматериала и режима записи, а  $|F(p)| \exp[j\varphi(p)] = \hat{F}(p)$  — регистрируемое распределение комплексной амплитуды света в плоскости голограммы [9]. В случае записи Фурье-голограммы распределение  $\hat{F}(p)$  — пространственно-частотный спектр изображения  $f(x)$ , представленного на транспаранте.

Поле в плоскости фотоматрицы

$$\hat{f}_{\text{восст}}(x') = k_1 \hat{f}(x') + n(x'),$$

(15)

где  $n(x') = k_2 \hat{f}(x') \oplus \hat{f}(x') \oplus \hat{f}(x') + \dots$ , а знак  $\oplus$  обозначает операцию свертки.

Из (15) следует, что в восстановленном изображении присутствуют составляющая  $k_1 \hat{f}(x')$  и искажающая составляющая  $n(x')$ , которую называют межмодуляционным фоном. Она приводит к появлению лож-

ных единичных разрядов в восстановленном изображении [10]. Так как изображения ложных разрядов в три и более раз шире истинных, то будем считать, что уровень междюляционного фона постоянен в пределах площади фотоприемника, поэтому отношение сигнал/междюляционный фон не зависит от его размеров и может быть определено из соотношения  $\frac{S}{\Phi_m} = \left( \frac{k_1}{\sum_{n=1}^N k_{n+1} \sigma_n} \right)^2$ , где  $\alpha_n$  — коэффициенты, опре-

деляемые условием регистрации и характером изображения.

Фон рассеяния обусловлен в основном гранулярной структурой регистрирующего фотоматериала. Средний уровень этой составляющей фона можно оценить по формуле [5]

$$\Phi_p = \frac{P_v F(\nu) h^2}{\lambda^2 f^2}, \quad (16)$$

где  $P_v$  — мощность восстанавливающего пучка;  $F(\nu)$  — нормированная функция рассеяния фотоматериала, определяющая относительный уровень фона рассеяния в зависимости от пространственной частоты  $\nu$ .

Отношение сигнал/фон рассеяния определим из выражения

$$\frac{S}{\Phi_p} = \frac{\eta S d^2 \lambda^2 f^2}{N F(\nu) h^2}, \quad (17)$$

где  $\eta$  — дифракционная эффективность голограммы, или

$$\frac{S}{\Phi_p} = \frac{\eta S (\pi D)^2}{N F(\nu)}. \quad (18)$$

Если известен вид функции  $F(\nu)$ , то при заданном  $S/\Phi_p$  можно определить необходимую частоту интерференционных полос на голограмме, а соответственно и угол между сигнальным и опорным пучками, при котором уровень фона рассеяния будет не выше заданного. При фиксированной  $\nu$  из (18) можно определить отношение  $S/\Phi_p$ .

**Результирующий фон.** Согласно [5], отношение сигнал/фон, учитывая действие рассмотренных составляющих, можно определить по формуле

$$\frac{S}{\Phi} = \frac{1}{\left( \frac{1}{S/\Phi_d} \right) + \left( \frac{1}{S/\Phi_m} \right) + \left( \frac{1}{S/\Phi_p} \right)}.$$

В случае, когда значения  $S/\Phi_m$  и  $S/\Phi_p$  определяются условиями голографической записи, отношение  $S/\Phi_d$ , при котором обеспечивается заданное  $S/\Phi$ , можно найти из соотношения

$$\frac{S}{\Phi_d} = \frac{(S/\Phi)}{1 - (S/\Phi) \left[ \left( \frac{1}{S/\Phi_p} \right) + \left( \frac{1}{S/\Phi_m} \right) \right]}. \quad (19)$$

Минимально допустимое значение отношения  $S/\Phi_d$  может быть установлено при учете чувствительности и уровня собственных шумов применяемых фотоприемников. Если известна световая мощность, приходящаяся на одну разрядную ячейку восстановленного изображения и определяемая по формуле

$$P_y = \frac{P_v \eta S}{N}, \quad (20)$$

то при условии, что уровень собственных шумов фотоприемника не зависит от уровня сигнала, отношение сигнал/фон на выходе фотоматрицы может быть записано как

$$(S/\Phi)_{\text{вых}} = \frac{\beta P_{\text{я}} + \beta P_{\text{ф}} + W}{\beta P_{\text{ф}} + W},$$

где  $W$  — уровень собственных шумов фотоприемника;  $\beta$  — его чувствительность;  $P_{\text{ф}}$  — результирующая мощность фона на входе фотоприемника. Или

$$(S/\Phi)_{\text{вых}} = \frac{(S/\Phi) G}{(S/\Phi) + G} + 1, \quad (21)$$

где  $G = \beta P_{\text{я}}/W$  — отношение сигнал/шум на выходе элемента фотоматрицы. Из (21) следует, что необходимо соблюдать условие  $G > (S/\Phi)_{\text{вых}} - 1$ . Если принять  $G = (S/\Phi)_{\text{вых}}$ , то

$$S/\Phi = G(G-1). \quad (22)$$

Подставив (22) в (19), получим

$$\frac{S}{\Phi_{\text{д}}} = \frac{G(G-1)}{1 - G(G-1) \left[ \left( \frac{1}{S/\Phi_{\text{р}}} \right) + \left( \frac{1}{S/\Phi_{\text{м}}} \right) \right]}. \quad (23)$$

Рассмотрим теперь примеры расчета и выбора параметров оптических систем ГЗУ в предположении, что мощность восстанавливающего пучка и уровень собственных шумов фотоприемников являются известными.

**Примеры расчета.** Определим из (20) мощность светового сигнала, приходящегося на одну разрядную ячейку восстановленного изображения при условии, что мощность восстанавливающего пучка  $P_{\text{в}} = 10^{-2}$  Вт. Тогда при дифракционной эффективности голограммы  $\eta = 4\%$  (см. [10]) и количестве разрядных ячеек  $N = 10^4$  получаем  $P_{\text{я}} = 4 \cdot 10^{-8} S$ .

Средняя чувствительность элементов матрицы кремниевых фотодиодов и уровень собственных шумов соответственно составляют  $\beta = 0,2$  А/Вт и  $W = 10^{-9}$  А. В этом случае отношение сигнал/шум на выходе элемента фотоматрицы  $G = 8S$ . Если считать, что для надежного считывания параметр  $G$  должен быть не менее 4 [11], то  $S \geq 0,5$ . Воспользовавшись рис. 3, находим минимальный размер фотоприемника  $D \approx 3$ .

Определим из (23) допустимое значение  $S/\Phi_{\text{д}}$ . По данным [10] значение  $S/\Phi_{\text{м}}$ , близкое к оптимальному, составляет величину порядка 30:1. В свою очередь, значение  $S/\Phi_{\text{р}}$  можно принять равным 100:1 [5].

При принятых значениях параметров  $G$ ,  $S/\Phi_{\text{р}}$ ,  $S/\Phi_{\text{м}}$  минимально допустимое отношение сигнал/дифракционный фон будет равно  $S/\Phi_{\text{д}} \approx 20$ .

С учетом данных рис. 7 получаем величину допустимого сдвига изображения относительно фотоматрицы  $\Delta = 1,25$ , что составляет 25% от размера фотоприемника ( $D = 5$ ). При таком сдвиге относительная мощность сигнала уменьшается до 0,7, что не противоречит введенному выше условию  $S \geq 0,5$ .

Если в оптической системе применяются одинаковые объективы с относительным отверстием  $A_{\text{отн}} = 1:4$ , а длина волны излучения лазера  $\lambda = 0,63 \cdot 10^{-3}$  мм, то при коэффициенте использования апертуры  $k = 0,9$  плотность голографической записи в случае восстановления

Таблица 2

Вид восстанавливающей волны	Емкость памяти $V$ (дв. зн.)	Емкость голограммы $V_h$ (дв. зн.)	Относительное отверстие объективов $A_{\text{отн}}$	Размер голограммы $h$ (мм)	Фокусное расстояние объективов $f$ (мм)	Размер разрядной ячейки $b$ (мм)	Размер фотоприемника $d$ (мм)	Расстояние между центрами ячеек (фотоприемников) $t$ (мм)	Допустимый сдвиг изображения $\delta$ (мм)	Разрешающая способность объективов $R$ (мин/мм)
Плоская ( $R=0$ )	$1,6 \cdot 10^8$	$1,6 \cdot 10^7$	1:4	1	640	0,78	0,64	0,83	0,16	6
	$1,6 \cdot 10^7$					0,25	0,21	0,27	0,053	20
Гауссова ( $R=1$ )	$1,6 \cdot 10^8$	$1,6 \cdot 10^4$	1:4	1	900	0,63	0,9	1,08	0,22	5
	$1,6 \cdot 10^7$					0,2	0,3	0,35	0,075	14

плоской волной составит  $C_n=1,48 \cdot 10^4$  дв. зн./мм<sup>2</sup>, а в случае восстановления гауссовой волной  $C_r=1,7 \cdot 10^4$  дв. зн./мм<sup>2</sup> [расчет проводился по формуле (3)].

Примем емкость голограммы  $V_h=128 \times 128=1,6 \times 10^4$  дв. зн. Тогда размер  $h$  ее стороны, определяемый по формуле  $h = \sqrt{\frac{V_h}{C}}$ , в обоих случаях равен  $\approx 1$  мм.

Из (4) определим фокусное расстояние объективов

$$f = \frac{V \sqrt{2m} h \gamma}{A_{\text{отн}} k},$$

где  $m=V/V_h$  — количество голограмм, а  $V$  — объем памяти ГЗУ.

Если  $m=10^4$ , то емкость памяти ГЗУ  $V=1,6 \cdot 10^8$  дв. зн. Фокусные расстояния объективов в случае восстановления голограмм гауссовой волной ( $\gamma=1,4$ )  $f_r=900$  мм, в случае восстановления плоской волной ( $\gamma=1$ )  $f_n=640$  мм. Если же  $m=10^3$ , то  $V=1,6 \cdot 10^7$  дв. зн. и соответственно  $f_r=290$  мм,  $f_n=200$  мм.

При известных  $f$ ,  $h$  и  $\lambda$  можем определить линейные размеры фотоприемников  $d$ , разрядных ячеек  $b$ , расстояние между их центрами  $t$  и другие параметры, используя соотношение  $x = \frac{\lambda f u}{\pi h}$ , где  $x$  — линейная координата, а  $u$  — угловая координата.

Значения основных параметров оптической системы приведены в табл. 2.

**Заключение.** Анализ отношения сигнал/фон в восстановленном из голограммы изображении позволяет произвести оценку плотности записи информации и сформулировать требования к основным структурным элементам оптической системы ГЗУ (фокусные расстояния объективов, размеры и шаг фоточувствительных элементов и разрядных ячеек на TRANSPARANTE и т. п.).

Исходными данными при этом являются чувствительность и уровень собственных шумов применяемых фотоприемников, а также допустимые мощности сигнала и уровень фона в восстановленном изображении.

Примеры расчета, проведенные для частных, но практически важных случаев, дают представление о параметрах оптических систем ГЗУ емкостью  $10^7$ — $10^8$  дв. зн. Полученные данные могут быть приняты за основу при разработке и создании ГЗУ.

Автор выражает благодарность Е. Ф. Пелу за полезное обсуждение работы, О. М. Карповой за проведение работы по уточнению расчетных данных, а также канд. техн. наук П. Е. Твердохлебу за ценные советы и замечания, сделанные им при чтении рукописи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. А. Л. Микаэлян, В. И. Бобринев, С. М. Наумов, Л. З. Соколова. Возможность применения методов голографии для создания новых типов запоминающих устройств.— Радиотехника и электроника, 1969, № 1.
2. Ван Хирден. Теория запоминающего устройства на твердом теле.— Зарубежная радиоэлектроника, 1964, № 2.
3. В. А. Вуль, М. С. Шмуйлович. Некоторые вопросы оптимизации голографических запоминающих устройств.— Квантовая электроника, 1973, № 4.
4. В. Хилл. Исследование голографической памяти большой емкости.— Зарубежная радиоэлектроника, 1972, № 10.
5. G. Goldman. Records of Digital Data Masks in Quasi Fourier Holograms.— Optik, 1971, v. 34, N 3.
6. И. С. Гибин, М. А. Гофман, Е. Ф. Пен, П. Е. Твердохлеб. Ассоциативная выборка информации в голограммных запоминающих устройствах.— Автометрия, 1973, № 5.
7. И. С. Гибин, Е. С. Нежевенко, О. И. Потатуркин, П. Е. Твердохлеб. Когерентно-оптические устройства для обобщенного спектрального анализа изображений.— Автометрия, 1972, № 5.
8. W. C. Stewart, A. H. Firester, E. C. Fox. Random Phase Data Masks: Fabrication Tolerances and Advantages of Four Phase Level Masks.— Applied Optics, 1972, v. 11, N 3.
9. И. С. Гибин, П. Е. Твердохлеб. Влияние нелинейной характеристики фотоматериала при голографической регистрации Фурье-изображения щели.— Радиотехника и электроника, 1971, № 1.
10. И. С. Гибин, Е. Ф. Пен. Влияние нелинейности фотоматериала на качество голографической записи массива двоичной информации.— В кн.: Оптические устройства для хранения и обработки информации. Новосибирск, 1974.
11. А. Л. Микаэлян, В. И. Бобринев, А. А. Аксельрод, С. М. Наумов, М. М. Коблова, Э. А. Засовин, К. И. Куштанин, В. В. Харитонов. Голографические запоминающие устройства с записью информации массивами.— Квантовая электроника, 1971, № 1.

*Поступила в редакцию 21 января 1974 г.,  
окончательный вариант — 28 марта 1974 г.*

УДК 621.378+681.332.5

**Ю. В. ЧУГУИ**  
(Новосибирск)

### **АНАЛИЗ СПЕКТРОВ СИГНАЛОВ С МНОГОДОРОЖЕЧНОЙ СИЛУЭТНОЙ ЗАПИСЬЮ**

В настоящее время получают распространение анализаторы спектров с двухградационной силуэтной записью сигналов на транспаранте [1—4]. Основными элементами таких устройств являются когерентный источник света—лазер, транспарант, полуволновая фазовая пластинка, используемая при анализе знакопеременных сигналов, сферический объектив и сканирующий фотоприемник.

Возможность анализа сигналов с большим динамическим диапазоном [1, 5], низкий уровень шума от зернистости [6] и отсутствие постоянной составляющей при записи знакопеременных сигналов, ухудшающей разрешение анализатора в области низких частот [7], выгодно отличают такие анализаторы от аналогичных устройств с полутонной записью сигнала [8].

Однако общим недостатком таких устройств является то, что искомое световое распределение в плоскости сканирующего фотоприемника