

2. Грицкий З. Д., Зеляновский Ю. Е. Выбор разрядности управляющих кодов при интерполяционно-узловом методе коррекции фокусировки пучка в электронно-лучевых трубках.— Автометрия, 1978, № 3, с. 80—84.
3. Маркович М. Г. Коррекция координатных искажений при отклонении пучка в электронно-лучевых приборах.— Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения, 1972, вып. 1, с. 56—61.
4. Горелик С. Л., Кац Б. М. Электронно-лучевые трубки в системах обработки информации.— М.: Энергия, 1977.
5. Kaashoek I. A study of magnetic-deflection errors.— Philips Research Reports. Suppl., 1968, N 11, p. 1—114.
6. Грицкий З. Д., Сницарук Л. А. О дисторсии магнитного отклонения электронных пучков в приемных ЭЛТ.— Электрон. техника, сер. 4, 1974, вып. 8, с. 26—34.

Поступила в редакцию
6 июля 1983 г.

УДК 772.99 : 681.327.5

В. А. ДОМБРОВСКИЙ, С. А. ДОМБРОВСКИЙ, Е. Ф. ПЕН

(Новосибирск)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ГОЛОГРАММ В ГЗУ *

Введение. Одним из главных достоинств ГЗУ является высокая помехоустойчивость к дефектам носителя информации. Качественное объяснение этого свойства заключается в том, что при голографической регистрации каждый бит информации распределен по всей поверхности голограммы. Поэтому наличие микродефектов на поверхности голограммы не приводит к полной потере информации, а только снижает качество восстановленного изображения.

В работе [1] показано, что микродефекты и загрязненность носителя оказывают заметное влияние на достоверность считывания. В [2] для одномерной модели ГЗУ исследовано влияние локальных повреждений голограммы на контрастность изображений.

Однако для более полной оценки помехоустойчивости голограмм необходимо знать влияние микродефектов на статистические характеристики изображения [3]: среднюю мощность оптической «1» $\bar{P}^{(1)}$, средний контраст $K_n = \bar{P}^{(1)}/\bar{P}^{(0)}$, отношение сигнал/шум «1» и «0» — $(S/\Pi)_{1,0} = \bar{P}^{(1,0)}/\sqrt{D[P^{(1,0)}]}$ ($D[P^{(1,0)}]$ — дисперсия $P^{(1,0)}$).

Цель данной работы — исследование зависимости статистических характеристик восстановленного изображения от размера, положения и количества амплитудных микродефектов на голограмме, а также оценка помехоустойчивости голограмм в экспериментальных образцах ГЗУ. За меру помехоустойчивости принято изменение достоверности считывания.

Теория. Анализ проводится для случая записи фурье-голограмм с двухуровневой случайной фазовой маской в приближении гауссовых сигнального, опорного и восстанавливающего пучков. Амплитуда восстановленной волны при отсутствии дефектов на голограмме для ν , μ -й разрядной ячейки запишется в виде

$$f(\xi, \eta) = A_{\nu, \mu} \exp[-(\xi^2 + \eta^2)/W^2] \exp[ik(a/f)(\xi\nu + \eta\mu)] \exp(i\varphi_{\nu, \mu}),$$

где ξ, η — координаты в плоскости голограммы; $1/W^2 = 1/\omega_b^2 + 1/\omega_o^2 + 1/\omega_c^2$; W — эффективный радиус голограммы; $\omega_b, \omega_o, \omega_c$ — радиусы восстанавливающего, опорного и сигнального пучков на уровне $1/e^2$ по интенсивности; a — расстояние между разрядными ячейками в транспаранте

* Основные результаты данной статьи доложены на IV Всесоюзной конференции по голографии. Ереван, май 1982 г.

данных; f — фокусное расстояние объектива записи; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число; λ — длина волны света; $A_{v,\mu}$ — функция, зависящая от информации на входной странице ($A_{v,\mu} = 1$, если в v, μ -й ячейке записана оптическая «1», и $A_{v,\mu} = 1/\sqrt{K_r}$, если — «0»); K_r — контраст в транспаранте данных; $\varphi_{v,\mu}$ — функция, характеризующая распределение фазы на входной странице.

Предположим, что на голограмме имеется дефект с гауссовой функцией амплитудного пропускания:

$$g = (\xi - \xi_0, \eta - \eta_0) = \exp \left[-\frac{(\xi - \xi_0)^2}{(2/3)\omega_{g\xi}^2} \right] \exp \left[-\frac{(\eta - \eta_0)^2}{(2/3)\omega_{g\eta}^2} \right],$$

где $2\omega_{g\xi}$ и $2\omega_{g\eta}$ — размер дефекта по координатам ξ и η соответственно на уровне $1/e^2$; ξ_0 и η_0 — сдвиг дефекта относительно центра голограммы. Амплитуда восстановленной из голограммы волны с учетом дефекта на ее поверхности примет вид

$$u(\xi, \eta) = f(\xi, \eta)[1 - g(\xi - \xi_0, \eta - \eta_0)].$$

Так как плоскости голограммы и фотоматрицы связаны фурье-преобразованием, то распределение амплитуды волны для v, μ -й разрядной ячейки в плоскости фотоматрицы

$$u(x - va, y - \mu a) = F(x, y) \otimes G(x, y), \quad (1)$$

где x, y — координаты в плоскости фотоматрицы; \otimes — символ операции свертки;

$$F(x, y) = i \frac{W}{\omega_D} A_{v,\mu} \exp \left[-\frac{(x - va)^2 + (y - \mu a)^2}{\omega_D^2} \right] \exp(i\varphi_{v,\mu}); \quad (2)$$

$$G(x, y) = i \frac{2}{3} \frac{\omega_{g\xi}\omega_{g\eta}}{\lambda f/\pi} \exp \left(-\frac{x^2}{\omega_{g\xi}^2} \right) \exp \left(-\frac{y^2}{\omega_{g\eta}^2} \right) \exp \left[-ik \frac{\xi_0 x + \eta_0 y}{f} \right]; \quad (3)$$

$\omega_D = \lambda f/\pi W$ — радиус изображения разрядной ячейки на уровне $1/e^2$ по интенсивности; $\omega_{g\xi} = \lambda f/\sqrt{2/3}\pi\omega_{g\xi}$; $\omega_{g\eta} = \lambda f/\sqrt{2/3}\pi\omega_{g\eta}$. Подставляя выражения (3) и (2) в (1), после свертки и некоторых преобразований получим

$$\begin{aligned} u(x - va, y - \mu a) = & A_{v,\mu} \exp \left[-\frac{(x - va)^2 + (y - \mu a)^2}{\omega_D^2} \right] \exp(i\varphi_{v,\mu}) - \\ & - \frac{2A_{v,\mu}}{\sqrt{\Delta_\xi \Delta_\eta}} \exp \left[-4 \left(\frac{\sigma_\xi^2}{\Delta_{0\xi}} + \frac{\sigma_\eta^2}{\Delta_{0\eta}} \right) \right] \exp \left[-\frac{1}{\omega_D^2} \left(\frac{(x - va)^2}{\Delta_\xi} + \frac{(y - \mu a)^2}{\Delta_\eta} \right) \right] \times \\ & \times \exp \left\{ -ikD_f \left[(x - va) \frac{\sigma_\xi}{\Delta_{0\xi}} + (y - \mu a) \frac{\sigma_\eta}{\Delta_{0\eta}} \right] \right\} \exp(i\varphi_{v,\mu}), \quad (4) \end{aligned}$$

где $\Delta_\xi = 1 + (3/2)\delta_\xi^2$; $\Delta_\eta = 1 + (3/2)\delta_\eta^2$; $\delta_\xi = \frac{\omega_{g\xi}}{W}$; $\delta_\eta = \frac{\omega_{g\eta}}{W}$

— относительный размер дефекта вдоль координат ξ и η соответственно; $\Delta_{0\xi} = 1 + 2\delta_\xi^2/3$; $\Delta_{0\eta} = 1 + 2\delta_\eta^2/3$; $\sigma_\xi = \xi_0/2W$; $\sigma_\eta = \eta_0/2W$ — сдвиг дефекта относительно центра голограммы по координатам ξ и η ; $D_f = 2W/f$ — угловой размер голограммы.

Первый член в выражении (4) описывает неискаженный v, μ -й информационный пучок с амплитудой $A_{v,\mu}$, фазой $\varphi_{v,\mu}$ и радиусом ω_D на уровне $1/e^2$ по интенсивности. Второй член представляет собой v, μ -й искажающий пучок. Амплитуда этого пучка

$$\frac{2A_{v,\mu}}{\sqrt{\Delta_\xi \Delta_\eta}} \exp \left[-4 \left(\frac{\sigma_\xi^2}{\Delta_{0\xi}} + \frac{\sigma_\eta^2}{\Delta_{0\eta}} \right) \right]$$

зависит от относительного размера дефекта $\delta_\xi = \omega_{g\xi}/W$; $\delta_\eta = \omega_{g\eta}/W$ и

Интенсивность в восстановленном изображении

$$I(x, y) = \left| \sum_{\nu, \mu} u(x - \nu a, y - \mu a) \right|^2. \quad (5)$$

Рассмотрим распределение интенсивности в окрестности центральной разрядной ячейки с учетом взаимодействия ν, μ -х искажающих добавок с исходным пучком. Влияние соседних информационных пучков на центральный (дифракционный фон) здесь не будем учитывать. В этом случае

$$I(x, y) = \left| A_{0,0} \exp \left[-\frac{x^2 + y^2}{\omega_D^2} \right] \exp(i\varphi_{0,0}) - \frac{2A_D}{\sqrt{\Delta_\xi \Delta_\eta}} \sum_{\nu, \mu} A_{\nu, \mu} \exp \left[-\frac{1}{\omega_D^2} \left(\frac{(x - \nu a)^2}{\Delta_\xi} + \frac{(y - \mu a)^2}{\Delta_\eta} \right) \right] \times \right. \\ \left. \times \exp \left[-ikD_f \left[(x - \nu a) \sigma'_\xi + (y - \mu a) \sigma'_\eta \right] \right] \exp(i\varphi_{\nu, \mu}) \right|^2, \quad (6)$$

где $A_D = \exp \left[-4 \left(\frac{\sigma_\xi^2}{\Delta_{0\xi}} + \frac{\sigma_\eta^2}{\Delta_{0\eta}} \right) \right]; \quad \sigma'_\xi = \frac{\sigma_\xi}{\Delta_{0\xi}}; \quad \sigma'_\eta = \frac{\sigma_\eta}{\Delta_{0\eta}}.$

Мощность восстановленного изображения, падающая на центральный фотоприемник размером $b \times b$, равна

$$P = \int_{-b/2}^{b/2} \int_{-b/2}^{b/2} I(x, y) dx dy. \quad (7)$$

Подставляя выражение (6) в (7) и выполняя интегрирование и нормировку на величину $\frac{\pi \omega_D^2}{2}$, после преобразований для мощности оптической «1», «0» получим

$$P^{1,0} = \sum_{j=0}^6 P_j \quad (8)$$

где $P_0 = A_{0,0}^2 B^{(0)}; \quad P_1 = \frac{A_{0,0}^2 A_D^2}{\sqrt{\Delta_\xi \Delta_\eta}} B_{0,0,0,0};$

$$P_2 = \frac{A_D^2}{\sqrt{\Delta_\xi \Delta_\eta}} \sum_{\substack{\nu, \mu \\ \nu, \mu \neq 0}} A_{\nu, \mu}^2 B_{\nu, \mu, \mu}; \quad P_3 = -\frac{A_D A_{0,0}^2}{\sqrt{(\Delta_\xi + 1)(\Delta_\eta + 1)}} B_{0,0}^{(1)};$$

$$P_4 = -\frac{A_D A_{0,0}}{\sqrt{(\Delta_\xi + 1)(\Delta_\eta + 1)}} \sum_{\substack{\nu, \mu \\ \nu, \mu \neq 0}} A_{\nu, \mu} C_{\nu, \mu}^0 q_{\nu, 0, \mu, 0} B_{\nu, \mu}^{(1)} \cos(\varphi_{\nu, \mu} - \varphi_{0,0});$$

$$P_5 = \frac{2A_{0,0} A_D^2}{\sqrt{\Delta_\xi \Delta_\eta}} \sum_{\substack{\nu, \mu \\ \nu, \mu \neq 0}} A_{\nu, \mu} C_{\nu, 0, \mu, 0} q_{\nu, 0, \mu, 0} B_{\nu, 0, \mu, 0} \cos(\varphi_{\nu, \mu} - \varphi_{0,0});$$

$$P_6 = \frac{2A_D^2}{\sqrt{\Delta_\xi \Delta_\eta}} \sum_{\substack{\nu, \mu; \nu', \mu' \\ \nu - \nu', \mu - \mu' \neq 0}} \sum_{\nu', \mu'} A_{\nu, \mu} A_{\nu', \mu'} C_{\nu, \nu', \mu, \mu'} q_{\nu, \nu', \mu, \mu'} \times \\ \times B_{\nu, \nu', \mu, \mu'} \cos(\varphi_{\nu, \mu} - \varphi_{\nu', \mu'});$$

$$\begin{aligned}
B^{(0)} &= \left\{ \Phi \left[\frac{\sqrt{2}}{\beta} \right] \right\}^2; \quad B_{\nu, \mu}^{(1)} = \left\{ \Phi \left[\frac{1 + \frac{2\nu\gamma}{\Delta_\xi + 1}}{\beta (\Delta_\xi / (\Delta_\xi + 1))^{1/2}} \right] + \Phi \left[\frac{1 - \frac{2\nu\gamma}{\Delta_\xi + 1}}{\beta (\Delta_\xi / (\Delta_\xi + 1))^{1/2}} \right] \right\} \times \\
&\quad \times \left\{ \Phi \left[\frac{1 + \frac{2\mu\gamma}{\Delta_\eta + 1}}{\beta (\Delta_\eta / (\Delta_\eta + 1))^{1/2}} \right] + \Phi \left[\frac{1 - \frac{2\mu\gamma}{\Delta_\eta + 1}}{\beta (\Delta_\eta / (\Delta_\eta + 1))^{1/2}} \right] \right\}; \\
B_{\nu, \nu', \mu, \mu'} &= \left\{ \Phi \left[\frac{1 + (\nu + \nu')\gamma}{\beta \sqrt{\Delta_\xi}} \sqrt{2} \right] + \Phi \left[\frac{1 - (\nu + \nu')\gamma}{\beta \sqrt{\Delta_\xi}} \sqrt{2} \right] \right\} \times \\
&\quad \times \left\{ \Phi \left[\frac{1 + (\mu + \mu')\gamma}{\beta \sqrt{\Delta_\eta}} \sqrt{2} \right] + \Phi \left[\frac{1 - (\mu + \mu')\gamma}{\beta \sqrt{\Delta_\eta}} \sqrt{2} \right] \right\}; \\
C_{\nu, \mu}^{(0)} &= \exp \left[-\frac{4\gamma^2}{\beta^2} \left(\frac{\nu^2}{\Delta_\xi + 1} + \frac{\mu^2}{\Delta_\eta + 1} \right) \right]; \\
C_{\nu, \nu', \mu, \mu'} &= \exp \left[-2 \frac{\gamma^2}{\beta^2} \left(\frac{(\nu - \nu')^2}{\Delta_\xi} + \frac{(\mu - \mu')^2}{\Delta_\eta} \right) \right]; \\
q_{\nu, \nu', \mu, \mu'} &= \cos \{ kD/a [\sigma'_\xi (\nu - \nu') + \sigma'_\eta (\mu - \mu')] \};
\end{aligned}$$

$\Phi[z] = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt$ — интеграл ошибок; $\beta = 2\omega_D/b$ — относительный раз-

мер восстановленного изображения разрядной ячейки; $\gamma = a/b$ — скважность фотоприемников в фотоматрице.

Первый член в выражении (8) представляет собой мощность неискаженного сигнала. Составляющие P_1 и P_2 обусловлены некогерентным сложением искажающих пучков на апертуре центрального фотодиода. Составляющие P_3 и P_4 возникают за счет когерентного взаимодействия центрального неискаженного пучка со всеми искажающими пучками. P_5 и P_6 обусловлены когерентным взаимодействием искажающих пучков друг с другом.

Из выражения (8) видно, что мощность $P^{(1,0)}$ зависит от величины $A_{\nu, \mu}$, которая может принимать случайным образом значение 1 или $1/\sqrt{K_T}$ (в зависимости от того, «1» или «0» записаны в ν, μ -й ячейке транспаранта), и случайной величины $\varphi_{\nu, \mu}$, определяемой фазовой маской. Используя теоремы о сложении и умножении числовых характеристик независимых случайных величин, получим математическое ожидание и дисперсию для мощностей оптических «1» и «0» в виде

$$\begin{aligned}
M[P^{(1,0)}] &= A_{0,0}^2 B^{(0)} + \frac{A_{0,0}^2 A_D^2}{\sqrt{\Delta_\xi \Delta_\eta}} B_{0,0,0,0} + \left(N + \frac{1-N}{K_T} \right) \frac{A_D^2}{\sqrt{\Delta_\xi \Delta_\eta}} \times \\
&\quad \times \sum_{\substack{\nu, \mu \\ \nu, \mu \neq 0}} B_{\nu, \nu, \mu, \mu} - \frac{A_{0,0}^2 A_D}{\sqrt{(\Delta_\xi + 1)(\Delta_\eta + 1)}} B_{0,0}^{(1)}; \quad (9) \\
D[P^{(1,0)}] &= N(1-N) \left(1 - \frac{1}{K_T} \right)^2 \frac{A_D^4}{\Delta_\xi \Delta_\eta} \sum_{\substack{\nu, \mu \\ \nu, \mu \neq 0}} B_{\nu, \nu, \mu, \mu}^2 + \frac{A_{0,0}^2 A_D^2 \left(N + \frac{1-N}{K_T} \right)}{(\Delta_\xi + 1)(\Delta_\eta + 1)} \times \\
&\quad \times \sum_{\substack{\nu, \mu \\ \nu, \mu \neq 0}} (C_{\nu, \mu}^{(0)} q_{\nu, 0, \mu, 0} B_{\nu, \mu}^{(1)})^2 + \frac{4 \left(N + \frac{1-N}{K_T} \right) A_{0,0}^2 A_D^4}{\Delta_\xi \Delta_\eta} \sum_{\substack{\nu, \mu \\ \nu, \mu \neq 0}} (C_{\nu, 0, \mu, 0} q_{\nu, 0, \mu, 0} B_{\nu, 0, \mu, 0})^2 + \\
&\quad + \frac{4A_D^4 \left(N + \frac{1-N}{K_T} \right)^2}{\Delta_\xi \Delta_\eta} \sum_{\substack{\nu, \mu, \nu', \mu' \\ \nu, \mu; \nu', \mu'; \nu - \nu', \mu - \mu' \neq 0}} (C_{\nu, \nu', \mu, \mu'} q_{\nu, \nu', \mu, \mu'} B_{\nu, \nu', \mu, \mu'})^2;
\end{aligned}$$

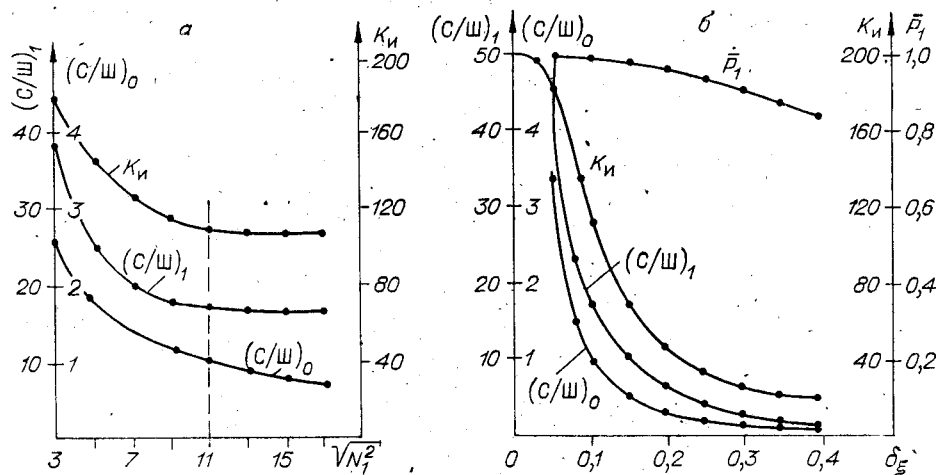


Рис. 1. Зависимость характеристик качества от числа разрядных ячеек в транспаранте ($\delta_\epsilon = \delta_\eta = 0,1$) (а); величины дефекта типа пылинки в центре голограммы ($\sigma_\epsilon = \sigma_\eta = 0$) (б); смещения дефекта типа пылинки относительно центра голограммы ($D_f = 0,004$, $\delta_\epsilon = \delta_\eta = 0,2$) (в).

где N — вероятность найти в ν , μ -й ячейке «1». Параметры восстановленного изображения выражаются через найденные числовые характеристики следующим образом: $K_{и} = M[P^{(1)}]/M[P^{(0)}]$ — контраст в восстановленном изображении;

$(C/Ш)_{1,0} = M[P^{(1,0)}]/\sqrt{D[P^{(1,0)}]}$ — отношение сигнал/шум «1» и «0»; $\bar{P}^{(1)} = M[P^{(1)}]$ — средняя мощность оптической «1».

Анализ численных расчетов. При расчетах были приняты следующие значения параметров оптических элементов ГЗУ [4]: размер и скважность фотоприемников в фотоматрице $b = 0,1$ мм, $\gamma = 2,5$; исходный контраст в транспаранте данных $K_r = 200$; $N = 0,5$; угловой размер голограммы $D_f = 0,004$; относительный размер восстановленного пучка в плоскости фотоматрицы $\beta = 2$; $\lambda = 0,63 \cdot 10^{-3}$ мм.

С целью определения количества взаимодействующих искажающих пучков, дающих основной вклад, были рассчитаны зависимости характеристик качества ($K_{и}$, $(C/Ш)_{1,0}$) (рис. 1, а) от количества разрядных ячеек в восстановленном изображении $\sqrt{N_1^2}$ при наличии на голограмме дефекта с относительным размером $\delta_\epsilon = \delta_\eta = 0,1$.

Из рисунка видно, что при $N_1 > 11$ характеристик качества практически не изменяются. Поэтому последующие расчеты проводились для $N_1 = 11$, т. е. учитывалось взаимодействие 120 искажающих пучков с центральным.

На рис. 1, б показаны зависимости характеристик качества от относительного размера $\delta_\epsilon = \omega_{\epsilon}/W$ дефекта типа пылинки в центре голограммы. Полагалось, что $\delta_\epsilon = \delta_\eta$. Из рисунка видно, что средняя мощность единиц $\bar{P}^{(1)}$ меняется слабо, в то время как $K_{и}$ и $(C/Ш)_{1,0}$ имеют резкую зависимость от размера микродефекта. Падение контраста $K_{и}$ обусловлено ростом средней мощности нулей $\bar{P}^{(0)}$ за счет некогерентного сложения «хвостов» помех на апертуре центрального фотоприемника. Резкое падение соотношения $(C/Ш)_{1,0}$ вызвано ростом дисперсии мощности «1» и «0» из-за когерентного взаимодействия центрального информационного пучка с «хвостами» ν , μ -х искажающих лучков в области малых микродефектов ($\delta_\epsilon < 0,1$) и когерентным взаимодействием

искажающих пучков друг с другом в области больших микродефектов ($\delta_s > 0,1$).

В предположении нормального закона распределения плотности вероятности мощности оптических «1» и «0» и при условии, что оптимальный порог P_7 выбирается из равенства появления ошибок 1- и 2-го рода (ошибки 1-го рода — переход «1» в «0», 2-го — переход «0» в «1»), нетрудно получить достоверность считывания информации при оптимальном пороге

$$S = -\lg \left\{ \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\frac{K'_n - 1}{\sqrt{2}(\sigma_0'' + K'_n \sigma_1'')} \right) \right] \right\}, \quad (10)$$

где $P_7 = \bar{P}_1(\sigma_0'' + \sigma_1'') / (\sigma_0'' + \sigma_1'' K'_n)$ — оптимальный порог; $\Phi[z]$ — интеграл ошибок; $(K'_n; \sigma_0'' = 1/(C/\Pi)_0''; \sigma_1'' = 1/(C/\Pi)_1''; \bar{P}_1)$ — характеристики качества изображения для реальной голограммы.

При выводе выражений для характеристик качества предполагалось, что мощности оптических «1» и «0» искажаются только наличием дефектов. В реальных условиях эти мощности являются случайными величинами, зависящими как от различных шумов, например, дифракционного, нелинейности и т. д., так и от несовершенства оптических элементов (неравномерности пропускания ячеек транспаранта, фазовой маски и т. д.). Пусть голограмма в отсутствие дефекта имеет характеристики качества $K_{иг} = 100$; $\sigma_{1г} = 0,15$; $\sigma_{0г} = 0,3$ (данные получены при измерении реальной голограммы на фотоматричной измерительной системе (ФМИС) [5]). Тогда характеристики качества с учетом дефекта на голограмме запишутся таким образом:

$$K'_n = \frac{K_{иг} K_d}{K_{иг} + K_d}; \quad \sigma_1'' = \sqrt{\sigma_{1г}^2 + \sigma_1'^2}; \quad \sigma_0'' = K'_n \sqrt{\left(\frac{\sigma_{0г}'}{K_{иг}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{0д}'}{K_d}\right)^2}$$

$$\text{где } K_d = \frac{K_n K_T}{K_T - K_n}; \quad \sigma_1' = 1/(C/\Pi)_1; \quad \sigma_{0д}' = \sigma_0' \left(\frac{K_d}{K_n}\right) = \left(\frac{K_d}{K_n}\right) / (C/\Pi)_0.$$

Рис. 2, а иллюстрирует графики зависимостей достоверности считывания и оптимального порога от относительного размера микродефекта δ_s , полученные из рис. 1, б и выражений (10). Видно, что вплоть до размера дефекта 0,05 ($\omega_{сз} = \omega_{сн} = 12$ мкм для $D_f = 0,004$; $2W = 240$ мкм; $f = 58$ мкм), достоверность считывания и оптимальный порог не изменяются и соответствуют вероятности ошибки 10^{-10} и порогу 0,025 $\bar{P}^{(1)}$ бездефектной голограммы. Интересно отметить, что если в голограмме размером 240×240 мкм² записано 10^3 бит, то на один бит информации приходится площадь 8×8 мкм² и при этом дефект 12×12 мкм² практически не приводит к снижению достоверности считывания. Здесь наглядно проявляется свойство высокой помехоустойчивости голографического способа записи к дефектам регистрирующей среды, тогда как для побитовой записи [6] дефект таких размеров привел бы к полной потере нескольких бит информации.

Как видно из рис. 2, а, при дальнейшем увеличении относительного размера дефекта достоверность считывания резко падает, а оптимальный порог растет. Так, для относительного размера дефекта $\delta_s = 0,19$ (46 мкм) вероятность ошибки возрастает до 10^{-3} . Необходимо отметить, что падение достоверности считывания и рост оптимального порога происходят в основном из-за увеличения ошибок 2-го рода (переход «0» в «1»). Это объясняется быстрым падением контраста K_n (ростом мощности оптических «0»).

На рис. 1, в представлены зависимости характеристик качества от смещения дефекта типа пылинки (размером $\delta_s = \delta_n = 0,2$) относительно центра голограммы. Видно, что контраст K_n плавно возрастает за счет падения амплитуды искажающей добавки и стремится к исход-

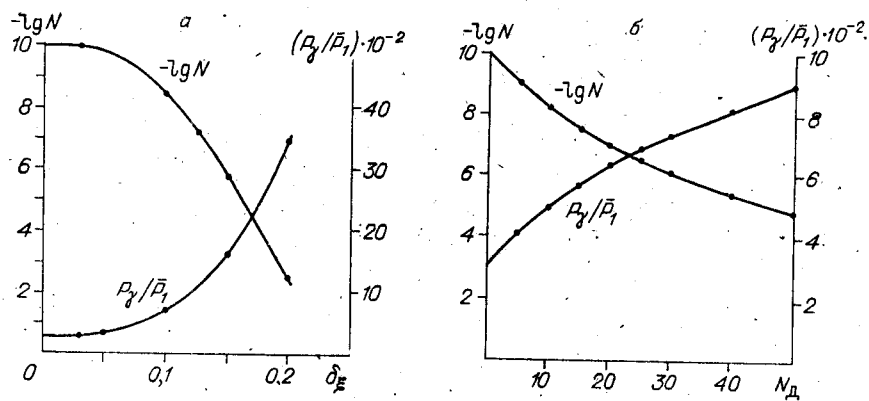


Рис. 2. Зависимость достоверности считывания и оптимального порога от величины микродефекта в центре голограммы (а); количества микродефектов (б).

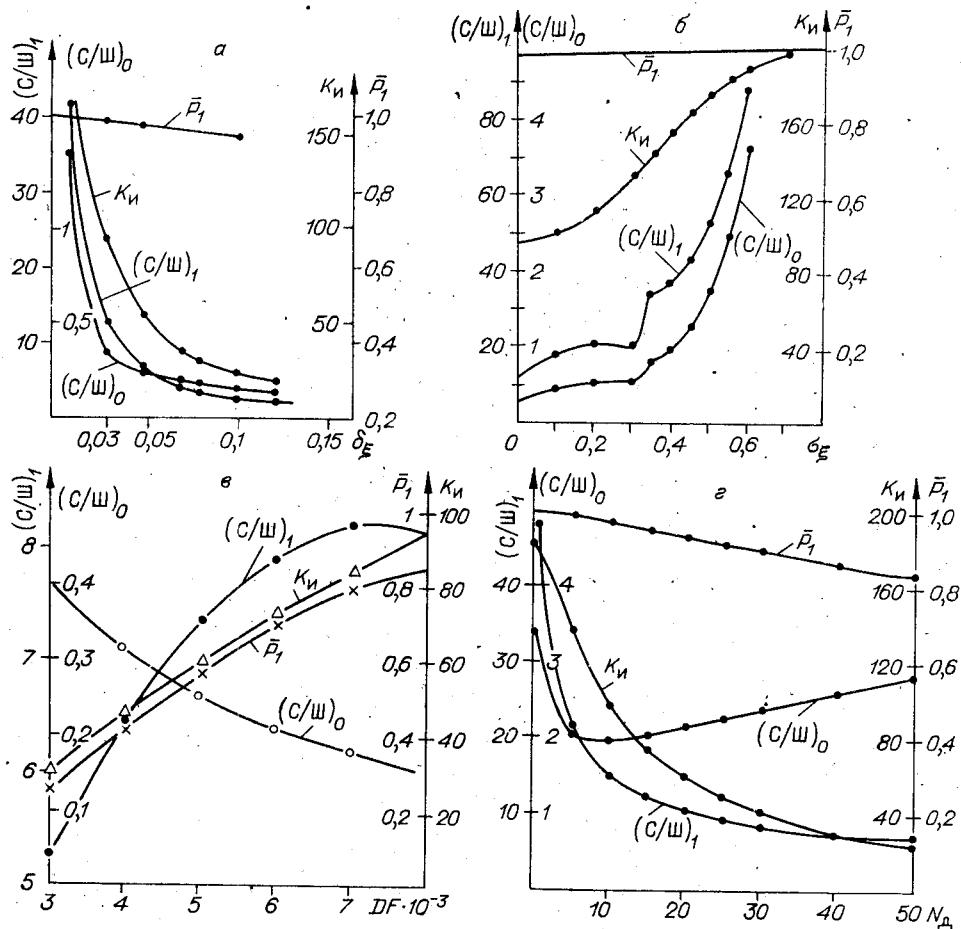


Рис. 3. Зависимость характеристик качества от толщины паразиты ($\delta_n = 1$) (а); смещения дефекта типа паразиты относительно центра голограммы (б); плотности записи (углового размера голограммы $D_f = (2W/f)$ ($\delta_E = \delta_n = 0,2$) (в); количества пылинок на голограмме ($\delta_E = \delta_n = 0,05$) (г).

ному контрасту в прозрачных данных. На отношение $(C/\Psi)_{1,0}$ наиболее сильно влияют когерентные составляющие: взаимодействие неискаженного сигнала с ν, μ -ми искажающими пучками и взаимодействие ν, μ -х искажающих пучков друг с другом (8). В обе эти составляющие входит $\cos(\cdot)$, значения которого зависят от углового размера голограммы D_f , расстояния между фотоприемниками a и относительного

смещения дефекта (σ_x, σ_y) от центра голограммы. Таким образом, при смещении дефекта в искажающей добавке изменяется как амплитуда (это приводит к экспоненциальному изменению отношения $(C/Ш)_{1,0}$), так и фаза. Изменение фазы приводит к косинусоидальному изменению когерентных составляющих $(C/Ш)_{1,0}$. Необходимо заметить, что при малых смещениях ($\sigma_x < 0,2$) изменение $(C/Ш)_{1,0}$ происходит значительно быстрее, чем изменение контраста K_n . Так, при относительном смещении дефекта $\sigma_x = 0$; $\sigma_y = 0,1$ (что соответствует 24 мкм при размере голограммы $2W = 240$ мкм) контраст K_n не меняется: $K_n \cong 50$, а $(C/Ш)_1$ изменяется от 6 до 10.

Полученные выражения позволяют проанализировать влияние амплитудных дефектов не только типа пылинки, но и типа царапины. В расчетах принималось, что продольный размер царапины равен эффективному размеру голограммы $2W$.

На рис. 3, а, б представлены графики зависимостей характеристик качества от поперечного размера царапины δ_x и положения царапины на голограмме σ_x соответственно. Характер этих кривых аналогичен зависимостям, приведенным на рис. 1, б, в для дефектов типа пылинки. Эти графики позволяют определить требования на допустимые дефекты типа царапины на поверхности голограммы. Так, для вероятности ошибочного считывания 10^{-6} поперечный относительный размер царапины $\delta_x < 0,03$ (8 мкм для $2W = 240$ мкм). До сих пор нами рассматривались царапины, ориентация которых на голограмме совпадала с направлением координатных осей в плоскости транспаранта данных (фотоматрицы). Однако понятно, что при повороте царапины относительно координатных осей в плоскости транспаранта происходит улучшение характеристик качества из-за увеличения эффективной скважности разрядных ячеек транспаранта. Так, если для дефекта $\delta_x = 0,03$, $\delta_y = 1$ и ориентации, совпадающей с координатными осями транспаранта, характеристики качества равны $K_n = 96$, $(C/Ш)_1 = 12$, $(C/Ш)_0 = 0,34$, то для царапины, составляющей угол 45° с координатными осями, $K_n = 130$, $(C/Ш)_1 = 20$, $(C/Ш)_0 = 0,35$. При этом эффективная скважность разрядных ячеек транспаранта увеличивается с 2,5 до 3,5.

Зависимости характеристик качества изображения от плотности записи, которая однозначно определяется размером голограммы $D_f = 2W/f$ при фиксированной размерности страницы и фокусном расстоянии фурье-объектива, приведены на рис. 3, в. Кривые получены для относительного размера дефекта $\delta_x = \delta_y = 0,2$. Увеличение углового размера голограммы приводит к уменьшению ширины восстановленного пучка и искажающей добавки. Из рисунка видно, что средняя мощность единицы $\bar{P}^{(1)}$ плавно растет за счет уменьшения ширины информационного пучка и концентрации его на апертуре фотоприемника. Средний контраст в изображении увеличивается пропорционально средней мощности $\bar{P}^{(1)}$, так как $\bar{P}^{(0)}$ — мощность «0» — меняется незначительно. Экстремальный характер зависимости $(C/Ш)_1$ объясняется тем, что вначале рост мощности опережает рост дисперсии мощности «1», затем мощность остается постоянной, а дисперсия продолжает увеличиваться в основном за счет когерентного взаимодействия ν, μ -х искажающих пучков друг с другом. В результате величина $(C/Ш)_1$, достигнув максимума, спадает. Отношение сигнал/шум $(C/Ш)_0$ падает из-за роста дисперсии «0» (взаимодействие ν, μ -х искажающих пучков друг с другом).

Наконец, рассмотрим влияние многих дефектов на поверхности голограммы на качество изображения и достоверность считывания. Будем исходить из наихудшего случая: пусть пылинки сконцентрированы вблизи центра голограммы, так что можно пренебречь увеличением контраста и $(C/Ш)_{1,0}$ за счет смещения микродефектов относительно центра голограммы. Предположим также, что пылинки случайным образом расположены на поверхности голограммы. В этом случае можно не учитывать составляющие, возникающие из-за когерентного сложения

где Λ_{ii} , $(C/\Pi)_{i,oi}$ — контраст и сигнал/шум, обусловленные i -м микродефектом.

На рис. 3, г, 2, б приведены расчетные зависимости характеристик качества и достоверности считывания при оптимальном пороге как функции количества микродефектов размером $\delta_x \times \delta_y = 0,05 \times 0,05$ (12×12 мкм² для эффективного размера голограммы $2W = 240$ мкм). При расчете достоверности использовались выражение (10) и рис. 3, г. Характеристики бездефектной голограммы принимались такими же, как и для расчета зависимости достоверности считывания от размера одиночного дефекта, т. е. $K_{gr} = 100$; $\sigma'_{gr} = 0,15$; $\sigma'_{ог} = 0,3$. С помощью графика, представленного на рис. 2, б, можно сформулировать ограничения на допустимое количество пылинок данного размера, обеспечивающее заданную вероятность ошибки считывания информации. Например, для обеспечения вероятности ошибки 10^{-6} количество дефектов размером $0,05 \times 0,05$ не должно превышать 30, что соответствует суммарной площади, занятой микродефектами, 7,5% от площади голограммы. Отметим, что для обеспечения такой надежности в случае одиночного дефекта его площадь не должна превышать 2,3% (см. рис. 2, а). Такая разница объясняется когерентным характером взаимодействия в последнем случае.

Небезынтересно здесь снова сравнить голографический и побитовый способы записи. Если при голографическом способе 30 микродефектов на голограмме с относительным размером 0,05 приводят к вероятности ошибки меньше 10^{-6} , то при побитовой записи вероятность ошибки будет больше $6 \cdot 10^{-2}$:

$$\frac{\text{суммарная площадь дефектов}}{\text{площадь бита}} = 30 \frac{12 \times 12 \text{ мкм}^2}{8 \times 8 \text{ мкм}^2}$$

Заключение. Таким образом, в данной работе в приближении гауссовых пучков при записи фурье-голограмм с двухуровневой случайной фазовой маской получены выражения и расчетные графики зависимостей характеристик качества от размера амплитудных дефектов типа царапины, пыли и от сдвига дефекта относительно центра голограммы, а также от количества дефектов на голограмме и углового размера голограммы.

В предположении нормального закона распределения плотности вероятности мощности оптических «1» и «0» для обеспечения вероятности ошибки фотосчитывания $P < 10^{-6}$ найдено, что

относительный размер одиночного дефекта не должен превышать $0,15 \times 0,15$ (36×36 мкм² при эффективном диаметре голограммы 240×240 мкм²) для дефекта типа пылинки и 0,03 (8 мкм) для царапины;

допустимое количество дефектов на голограмме типа пылинки размером $0,05 \times 0,05$ (12×12 мкм²) меньше 30.

Влияние микродефектов на качество восстановленного изображения исследовано экспериментально и в целом согласуется с расчетами. Более подробные результаты этих исследований будут даны в следующей статье.

Авторы выражают благодарность И. С. Гибину и П. Е. Твердохлебу за полезные обсуждения и замечания, сделанные при чтении рукописи, а также В. И. Кулибабе и А. А. Блоку за помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Печ Е. Ф. Исследование качества записи и воспроизведения изображений страниц двоичной информации в голографических ЗУ (ГЗУ). — В кн.: Тезисы докл. I Всесоюз. конф. по радиооптике. Фрунзе: ФПИ, 1981, с. 121.

2. Варга П., Киш Г. Перекрестные шумы и потери информации в голографии.— Квант. электроника, 1983, т. 10, № 1, с. 111.
3. Lee Wai — *Non. Effect of film-grain noise on the perfomance of holographic memo-ry.*— JOSA, 1972, v. 62, N 6, p. 797.
4. Выдрин Л. В. и др. Устройство автоматической записи матриц голограмм.— Автометрия, 1980, № 2, с. 8.
5. Бутт В. Е., Вьюхина Н. Н., Мантуш Т. Н., Панков Б. Н. Фотоматричная система для исследования изображений страниц информации в голограммных ЗУ.— В кн.: Тезисы докл. I Всесоюз. конф. по радиооптике.— Фрунзе: ФПИ, 1981.
6. Lou David Y. Characterization of optical disks.— Appl. Opt., 1982, v. 21, N 9.

*Поступила в редакцию
6 апреля 1984 г.*

УДК 681.327.68

В. И. ЛОМАКИН, О. Н. МОТРУК

(Киев)

НЕКОТОРЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПОДЛОЖКЕ НОСИТЕЛЯ ИНФОРМАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО ЗАПОМИНАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА С ПОВИТОВЫМ ПРЕДСТАВЛЕНИЕМ ДАННЫХ

Эффективным средством защиты информации от механических повреждений и пыли в оптических запоминающих устройствах (ОЗУ) с повитовым представлением данных является прозрачная подложка носителя информации (НИ); через которую производится запись и считывание [1—3]. Вместе с тем возможные отклонения параметров материала подложки НИ ухудшают фокусировку лазерного излучения, уменьшают плотность записи и достоверность процесса записи-считывания информации. Поэтому при проектировании ОЗУ необходимо знать допуски на материал, из которого изготовлена подложка.

Определим допуски на изменения толщины и показателя преломления материала подложки НИ при условии, что для записи используется монохроматическое излучение и остаточная aberrация фокусирующего объектива в осевой точке при номинальных значениях толщины и показателя преломления равна нулю.

При отступлении толщины материала подложки от заданного значения d на величину x и наличии компенсирующей дефокусировки ε возникает поперечная сферическая aberrация δg :

$$\delta g = (\varepsilon' \operatorname{tg} \alpha - x \operatorname{tg} \alpha'),$$

где $\sin \alpha = n \sin \alpha'$; $\varepsilon' = d - \varepsilon$; n — показатель преломления материала подложки; α — угол падения луча на подложку НИ; α' — угол преломления луча.

Связь поперечной и волновой aberrаций для точки на оси задается выражением [4]

$$N = \int_0^{\sin \alpha} \delta g d \sin \alpha.$$

Отсюда следует:

$$N = \varepsilon' (1 - \cos \alpha) + x n (\cos \alpha' - 1).$$

Аналогичные выражения можно получить для поперечной сферической и волновой aberrаций, возникающих при отступлении показателя