

УДК 681.327.68 : 778.38

В. А. Домбровский, С. А. Домбровский, Е. Ф. Пен
(Новосибирск)

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ДИФРАКЦИОННЫХ ПОМЕХ
В ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ

Теоретически исследовано влияние дифракционных помех на статистические характеристики восстановленного изображения в зависимости от геометрических и информационных параметров голографической памяти, типа фазовой маски при записи голограмм, aberrаций восстанавливающего пучка в плоскости голограммы и изображения в плоскости фотоматрицы.

Плотность записи в голографической памяти ограничивается линейными [1, 7—10, 17] и нелинейными [5, 6, 18] перекрестными помехами, несовершенством регистрирующей среды [2, 3, 16, 19] и aberrациями оптической системы [11—13, 14]. Для оценки максимальной плотности записи при заданной достоверности чтения необходимо знать статистические характеристики восстановленного изображения [20, 21]: контраст $K = \overline{P^1} / \overline{P^0}$, отношение сигнал/шум $(\overline{C} / \overline{\Delta})^{2,0} = \overline{P^{1,0}} / \sqrt{D[P^{1,0}]}$ ($\overline{P^{1,0}}$, $D[P^{1,0}]$ — среднее значение и дисперсия мощности оптических «единиц» P^1 и «нулей» P^0).

В работах [2, 18, 19] получены статистические характеристики восстановленных изображений и даны оценки достоверности считывания информации с учетом нелинейности [18] и шума рассеяния [2] регистрирующей среды, микродефектов на фурье-голограмме [19] и помех от соседних голограмм [22]. Однако практически не изучены статистические свойства дифракционных помех.

Целью данной работы является теоретическое исследование влияния дифракционных помех на статистические характеристики восстановленного изображения в зависимости от геометрических и информационных параметров голографической памяти, типа фазовой маски при записи голограмм, aberrаций восстанавливающего пучка в плоскости голограммы и изображения в плоскости фотоматрицы.

Анализ проведен для схемы записи/восстановления фурье-голограмм с мнимым изображением [7] в приближении линейной записи тонкой амплитудной голограммы и гауссовых сигнального, опорного, восстанавливающего пучков для трех случаев записи голограмм: с двухуровневой случайной фазовой маской (ДСФМ), имеющей значения фазы 0, π ; с четырехуровневой случайной фазовой маской (ЧСФМ), имеющей значения фазы 0, $\frac{\pi}{2}$, π , $\frac{3}{2}\pi$ [15]; с некогерентным восстановлением (НВ), когда все пучки, соответствующие оптическим «1» и «0», некогерентны между собой (теоретический случай).

Распределение амплитуд сигнальной U_c , опорной U_o и восстанавливающей U_r волн в плоскости голограммы с точностью до несущественных коэффициентов имеет вид

$$U_c(\xi, \eta) = \exp\left[-\frac{\xi^2 + \eta^2}{\omega_c^2}\right] \sum_{r,\mu} A_{r,\mu} \exp\left[\pm i \frac{kd}{f} (\nu\xi + \mu\eta) + i\varphi_{r,\mu}\right],$$

$$U_o(\xi, \eta) = \exp\left[-\frac{\xi^2 + \eta^2}{\omega_o^2}\right] \exp[-ik\xi \sin\Theta],$$

$$U_s(\xi, \eta) = \exp\left[-\frac{(\xi - \xi_0)^2 + (\eta - \eta_0)^2}{\omega_s^2}\right] \exp[-ik(\xi - \xi_0) \sin\Theta],$$

где ξ, η — координаты в плоскости голограммы; $\omega_o, \omega_s, \omega_n$ — радиусы сигнального, опорного и восстанавливающего пучков на уровне $1/e^2$ по интенсивности; f — фокусное расстояние фурье-объективов; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число; λ — длина волны света; d — расстояние между разрядными ячейками в транспаранте; $A_{\nu, \mu}$ — функция, зависящая от информации на входной странице ($A_{\nu, \mu} = A(1)$, если в ν, μ -й ячейке записана «1», и $A_{\nu, \mu} = A(0)$, если «0»); $A(1)$ и $A(0)$ — амплитуды пучков соответствующих оптических «1» и «0»; $\varphi_{\nu, \mu}$ — функция, характеризующая распределение фазы на входной странице (зависит от типа используемой фазовой маски); Θ — угол падения опорного и восстанавливающего пучков на голограмму; ξ_0 и η_0 — возможные смещения восстанавливающего пучка с голограммы по координатам ξ и η .

Распределение амплитуды восстановленной волны в плоскости фотоматрицы в нашем случае

$$U_D(x, y) = \hat{F}\left[\bar{U}_s(\xi, \eta) U_o^*(\xi, \eta) U_n(\xi, \eta)\right],$$

или

$$U_D(x, y) = \exp\left[-\frac{\xi_0^2 + \eta_0^2}{\omega_n^2} (1 - 1/L^2)\right] \times$$

$$\times \sum_{\nu, \mu} A_{\nu, \mu} \exp(i\varphi_{\nu, \mu}) \exp\left[-\frac{(x + \nu d)^2 + (y + \mu d)^2}{\omega_D^2}\right], \quad (1)$$

где \hat{F} — оператор фурье-преобразования; $\varphi_{\nu, \mu} = \varphi_{\nu, \mu} + \alpha_{\nu, \mu}$;

$$\alpha_{\nu, \mu} = -\frac{k}{L^2} [(x + \nu d)\xi_0 + (y + \mu d)\eta_0];$$

$L = \frac{\omega_n}{W}$; $W\left(\frac{1}{W^2} = \frac{1}{\omega_o^2} + \frac{1}{\omega_s^2} + \frac{1}{\omega_n^2}\right)$ — эффективный радиус голограммы; $\omega_D = \frac{\lambda f}{\pi W}$ — радиус восстановленного изображения разрядной ячейки транспаранта; x, y — координаты в плоскости фотоматрицы.

Обратим внимание на то, что при смещении восстанавливающего пучка относительно центра голограммы разность фаз между информационными пучками (например, ν, μ и ν', μ') меняется по закону

$$\Delta\alpha = \alpha_{\nu, \mu} - \alpha_{\nu', \mu'} = -\frac{k}{fL^2} d[(\nu - \nu')\xi_0 + (\mu - \mu')\eta_0]. \quad (2)$$

Изменение разности фаз от смещения восстанавливающего пучка приводит к тому, что можно выбрать такой сдвиг, когда разность фаз между соседними пучками в изображении будет $\pm \frac{\pi}{2}$ (квазинеккогерентное восстановление) или, например, $\pm\pi$ (соответствует наилучшему разрешению информационных пучков в изображении).

Найдем из (1) распределение интенсивности в плоскости фотоматрицы

$$I_D(x, y) \approx T \sum_{\nu, \mu} \sum_{\nu', \mu'} A_{\nu, \mu} A_{\nu', \mu'} \cos(\varphi_{\nu, \mu} - \varphi_{\nu', \mu'}) \times \\ \times \exp \left[-\frac{d^2}{2\omega_D^2} ((\nu - \nu')^2 + (\mu - \mu')^2) \right] \times \\ \times \exp \left[-2 \frac{(x + (\nu + \nu')(d/2))^2 + (y + (\mu + \mu')(d/2))^2}{\omega_D^2} \right], \quad (3)$$

где $T = \exp[-8(\Delta_\xi^2 + \Delta_\eta^2)(1 - 1/L^2)]$; $\Delta_\xi = \frac{\xi_0}{2\omega_D}$ и $\Delta_\eta = \frac{\eta_0}{2\omega_D}$ — относительные сдвиги восстанавливающего пучка с голограммы по координатам ξ и η . Мощность восстановленного изображения P , приходящаяся на центральный фотоприемник размером $b \times b$, с учетом возможного сдвига Δx , Δy изображения относительно фотоматрицы равна

$$P \approx \int_{-b/2}^{b/2} \int_{-b/2}^{b/2} I_D(x + \Delta x, y + \Delta y) dx dy. \quad (4)$$

Подставляя (3) в (4) и выполняя интегрирование и нормирование на величину $(\pi\omega_D^2)/2$, для мощности P получим

$$P = T \sum_{\nu, \mu} \sum_{\nu', \mu'} B_{\nu, \mu, \nu', \mu'} C_{\nu, \mu, \nu', \mu'}, \quad (5)$$

где

$$B_{\nu, \mu, \nu', \mu'} = \frac{1}{4} \exp[-2\beta_D^2((\nu - \nu')^2 + (\mu - \mu')^2)] \times \\ \times \left(\Phi \left[\sqrt{2} \frac{1 + 2\beta_F \Delta_x + \beta_F(\nu + \nu')}{\beta_F/\beta_D} \right] + \Phi \left[\sqrt{2} \frac{1 - 2\beta_F \Delta_x - \beta_F(\nu + \nu')}{\beta_F/\beta_D} \right] \right) \times \\ \times \left(\Phi \left[\sqrt{2} \frac{1 + 2\beta_F \Delta_y + \beta_F(\mu + \mu')}{\beta_F/\beta_D} \right] + \Phi \left[\sqrt{2} \frac{1 - 2\beta_F \Delta_y - \beta_F(\mu + \mu')}{\beta_F/\beta_D} \right] \right); \\ C_{\nu, \mu, \nu', \mu'} = A_{\nu, \mu} A_{\nu', \mu'} \cos \left[\varphi_{\nu, \mu} - \varphi_{\nu', \mu'} - 8 \frac{\beta_D}{L} ((\nu - \nu')\Delta_\xi + (\mu - \mu')\Delta_\eta) \right];$$

$\Phi[z] = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt$ — интеграл ошибок; $\Delta_x = \frac{\Delta x}{d}$ и $\Delta_y = \frac{\Delta y}{d}$ — относительные смещения восстановленного изображения с фотоматрицы по координатам x и y ; $\beta_F = d/b$ — скважность фотоприемников в фотоматрице; $\beta_D = d/2\omega_D$ — скважность информационных пучков в плоскости фотоматрицы. Коэффициенты $B_{\nu, \mu, \nu', \mu'}$ являются функциями геометрических параметров (β_F, β_D) голографической памяти (ГП) и aberrаций в плоскости фотоматрицы $\Delta x, \Delta y$. Коэффициенты $C_{\nu, \mu, \nu', \mu'}$ зависят от вида записываемой информации ($A_{\nu, \mu}$) и типа случайной фазовой маски, используемой при записи голограмм и aberrаций в плоскости голограммы Δ_ξ, Δ_η . Перепишем (5) в виде

$$P^{1,0} = \sum_{i=0}^3 P_i^{1,0}, \quad (6)$$

где

$$P_0^{1,0} = TB_{0,0,0,0}C_{0,0,0,0}, \quad P_1^{1,0} = T \sum_{\substack{\nu, \mu \\ \nu, \mu \neq 0}} B_{\nu, \mu, \nu, \mu} C_{\nu, \mu, \nu, \mu},$$

$$P_2^{1,0} = 2T \sum_{\substack{\nu, \mu \\ \nu, \mu \neq 0}} B_{\nu, \mu, 0, 0} C_{\nu, \mu, 0, 0},$$

$$P_3^{1,0} = T \sum_{\nu, \mu} \sum_{\nu', \mu'} B_{\nu, \mu, \nu', \mu'} C_{\nu, \mu, \nu', \mu'}$$

$$\nu, \mu \neq 0, \quad \nu', \mu' \neq 0, \quad \nu \neq \nu', \quad \mu = \mu'.$$

Верхние индексы 1 и 0 в (6) соответственно относятся к случаям, когда в центральной ячейке записывается оптическая «1» ($A_{0,0}^1 = A(1)$) и оптический «0» ($A_{0,0}^0 = A(0)$). Первый член в (6) представляет собой мощность неискаженной оптической «1» (P_0^1) или «0» (P_0^0). Остальные три члена определяют мощность дифракционной помехи. Составляющая помехи P_1 связана с частичным наложением «хвостов» соседних информационных пучков на центральный фотоприемник. Составляющая P_2 возникает из-за когерентного взаимодействия центрального пучка с соседними (дает основной вклад), а P_3 определяется взаимодействием соседних пучков друг с другом.

Предположим, что $A_{\nu, \mu}$ и $\varphi_{\nu, \mu}$ являются независимыми случайными величинами, причем вероятность найти в ν, μ -й ячейке «1» равна N , а «0» — $(1 - N)$ (здесь $\nu, \mu \neq 0$). Тогда, применяя к выражению (6) теоремы о числовых характеристиках случайных величин и учитывая независимость слагаемых, для математического ожидания $M[P^{1,0}]$ и дисперсии $D[P^{1,0}]$ получим

$$M[P^{1,0}] = T \left(M[(A_{0,0}^{1,0})^2] B_{0,0,0,0} + N_1 \sum_{\substack{\nu, \mu \\ \nu, \mu \neq 0}} B_{\nu, \mu, \nu, \mu} \right), \quad (7)$$

$$D[P^{1,0}] = \sum_{i=0}^3 D[P_i^{1,0}], \quad (8)$$

где

$$D[P_0^{1,0}] = T^2 B_{0,0,0,0}^2 D[(A_{0,0}^{1,0})^2],$$

$$D[P_1^{1,0}] = T^2 N(1 - N)(1 - 1/K_T)^2 \sum_{\substack{\nu, \mu \\ \nu, \mu \neq 0}} B_{\nu, \mu, \nu, \mu}^2,$$

$$D[P_2^{1,0}] = 4M^2 [(A_{0,0}^{1,0})^2] T^2 N_1 \sum_{\nu, \mu} B_{\nu, \mu, 0, 0}^2 \{ \cos^2 [q(\nu \Delta \xi + \mu \Delta \eta)] \times$$

$$\times D[\cos \varphi_{\nu, \mu}] + \sin^2 [q(\nu \Delta \xi + \mu \Delta \eta)] D[\sin \varphi_{\nu, \mu}] \},$$

$$D[P_3^{1,0}] = T^2 N_1 \sum_{\nu, \mu} \sum_{\nu', \mu'} B_{\nu, \mu, \nu', \mu'}^2 \{ \cos^2 [q((\nu - \nu') \Delta \xi + (\mu - \mu') \Delta \eta)] \times$$

$$\times D[\cos(\varphi_{\nu, \mu} - \varphi_{\nu', \mu'})] + \sin^2 [q((\nu - \nu') \Delta \xi + (\mu - \mu') \Delta \eta)] \times$$

$$\times D[\sin(\varphi_{\nu, \mu} - \varphi_{\nu', \mu'})] \},$$

$$\nu, \mu \neq 0, \quad \nu', \mu' \neq 0, \quad \nu \neq \nu', \quad \mu \neq \mu';$$

$q = 8 \frac{\beta_D}{L}$; $N_1 = N - \frac{1-N}{K_T}$; $K_T = \frac{M[A^2(1)]}{M[A^2(0)]}$ — контраст в записываемой странице данных. Выражения (7), (8) получены при следующих допущениях: средняя интенсивность оптических «1» $M[(A_{\nu,\mu}^1)^2] = 1$; фаза центральной ячейки равна нулю ($\varphi_{0,0} = 0$). Заметим, что в случае применения для записи голограмм четырехуровневой случайной фазовой маски [15] при

$$\left\{ \begin{array}{l} \nu - \nu' = 2n, \pm \frac{1}{2} \nu, \mu \\ \nu', \mu', \nu'' = 2n. \end{array} \right.$$

Если используется двухуровневая случайная фазовая маска, то

$$\left\{ \begin{array}{l} D[\cos(\varphi_{\nu,\mu} - \varphi_{\nu',\mu'})] = 1, \\ D[\sin(\varphi_{\nu,\mu} - \varphi_{\nu',\mu'})] = 0. \end{array} \right.$$

Так как интенсивность восстановленного гауссова пучка быстро падает на краю, то в (7), (8) можно учитывать влияние только восьми ближайших пучков [7]. В этом случае выражения для математического ожидания и дисперсии преобразуются к виду

$$M[P^{1,0}] = M[P_c^{1,0}] + M[P_{дп}], \quad (9)$$

где

$$M[P_c^{1,0}] = 1/4 \cdot T\Phi_0^2 M[(A_{0,0}^{1,0})^2] \quad (10)$$

— средняя мощность оптической «1» («0») без учета помех;

$$M[P_{дп}] = 1/2 \cdot TN_1 \Phi(\Phi_1 + \Phi_2) \quad (11)$$

— средняя мощность дифракционной помехи;

$$\begin{aligned} \Phi_0 &= \Phi \left[\sqrt{2} \frac{\beta_D}{\beta_F} (1 + 2\Delta_2 \beta_F) \right] + \Phi \left[\sqrt{2} \frac{\beta_D}{\beta_F} (1 - 2\Delta_2 \beta_F) \right], \\ \Phi_1 &= \Phi \left[\sqrt{2} \frac{\beta_D}{\beta_F} (1 + 2\Delta_2 \beta_F + 2\beta_F) \right] + \Phi \left[\sqrt{2} \frac{\beta_D}{\beta_F} (1 - 2\Delta_2 \beta_F - 2\beta_F) \right], \\ \Phi_2 &= \Phi \left[\sqrt{2} \frac{\beta_D}{\beta_F} (1 - 2\Delta_2 \beta_F + 2\beta_F) \right] + \Phi \left[\sqrt{2} \frac{\beta_D}{\beta_F} (1 + 2\Delta_2 \beta_F - 2\beta_F) \right], \\ D[P^{1,0}] &= D[P_c^{1,0}] + D[P_{дп}], \end{aligned} \quad (12)$$

где

$$D[P_c^{1,0}] = (1/4(T\Phi_0^2))^2 D[(A_{0,0}^{1,0})^2] \quad (13)$$

— дисперсия мощностей оптической «1» («0») без дифракционной помехи;

$$D[P_{дп}] = T^2 \sum_{i=1}^5 B_i^2 C_i^{1,0} \quad (14)$$

— дисперсия дифракционной помехи. Здесь

$$B_1 = \frac{1}{4\sqrt{2}} \Phi_0 \sqrt{\Phi_1^2 + \Phi_2^2},$$

$$B_2 = \frac{1}{2\sqrt{2}} \exp(-2\beta_D^2) \Phi_0 \sqrt{\Phi_3^2 + \Phi_4^2},$$

$$B_3 = B_5 = \frac{1}{2\sqrt{2}} \exp(-4\beta_D^2) \sqrt{(\Phi_3^4 + \Phi_4^4) \cos^2(2q\Delta_1) + 2\Phi_3^2 \Phi_4^2 / (\cos^2(2q\Delta_1) + 1)},$$

$$B_4 = \frac{1}{2} \exp(-8\beta_D^2) \Phi_0^2,$$

$$\Phi_3 = \Phi \left[\sqrt{2} \frac{\beta_D}{\beta_F} (1 + 2\Delta_2 \beta_F + \beta_F) \right] + \Phi \left[\sqrt{2} \frac{\beta_D}{\beta_F} (1 - 2\Delta_2 \beta_F - \beta_F) \right],$$

$$\Phi_4 = \Phi \left[\sqrt{2} \frac{\beta_D}{\beta_F} (1 - 2\Delta_2 \beta_F + \beta_F) \right] + \Phi \left[\sqrt{2} \frac{\beta_D}{\beta_F} (1 + 2\Delta_2 \beta_F - \beta_F) \right].$$

Выражения для $C_i^{1,0}$ принимают вид:

а) в случае двухуровневой случайной фазовой маски:

$$C_1 = 4N(1-N)(1-1/K_T)^2,$$

$$C_2^{1,0} = 4N_1 M^2 [A_{0,0}^{1,0}] \cos^2(q\Delta_1),$$

$$C_3^{1,0} = 2N_1 M^2 [A_{0,0}^{1,0}] (\cos^2(2q\Delta_1) + 1),$$

$$C_4 = 2N_1^2 \cos^2(2q\Delta_1),$$

$$C_5 = 2N_1^2 (\cos^2(2q\Delta_1) + 1);$$

б) в случае четырехуровневой случайной фазовой маски изменяется вид только второго коэффициента:

$$C_2^{1,0} = 4N_1 M^2 [A_{0,0}^{1,0}] \sin^2(q\Delta_1);$$

в) в случае некогерентного восстановления:

$$C_1 = 4N(1-N)(1-1/K_T)^2,$$

$$C_2^{1,0} = C_3^{1,0} = C_4 = C_5 = 0.$$

При выводе (9), (12) предполагалось, что $\Delta_x = \Delta_y = \Delta_2$, $\Delta_\eta = \Delta_\xi = \Delta_1$.

Используя (9)–(14), получим следующие выражения для статистических характеристик восстановленного изображения:

средняя мощность оптической «1»

$$\bar{P}^1 = 1/4 (T\Phi_0^2) (1 + 1/K_{дп});$$

контраст

$$K = \frac{\bar{P}^1}{P_0} = \left(1 + \frac{1}{K_{дп}} \right) / \left(\frac{1}{K_T} + \frac{1}{K_{дп}} \right);$$

отношение сигнал/шум оптических «1» и «0»

$$(C/\Pi)^1 = \frac{\bar{P}^1}{\sqrt{D[P^1]}} = \left(\frac{1}{1 + 1/K_{дп}} \sqrt{\frac{1}{(C_T^1)^2} + \frac{1}{C_{дп}^1 / K_{дп}^2}} \right)^{-1},$$

$$(C/Ш)^0 = \frac{\bar{P}^0}{\sqrt{D[P^0]}} = \left(\frac{K}{1 + 1/K_{дп}} \sqrt{((\sigma_T^0)^2/K_T^2) + (\sigma_{дп}^0)^2/K_{дп}^2} \right)^{-1}$$

Здесь

$$K_{дп} = \frac{M[P_c^1]}{M[P_{дп}^1]} = \frac{1}{2N_1} \frac{\Phi_0}{\Phi_1 + \Phi_2}$$

— контраст, обусловленный дифракционными помехами;

$$\sigma_T^{1,0} = \sqrt{D[P_c^{1,0}]} / M[P_c^{1,0}]$$

— коэффициент вариации мощности оптических «1» и «0» в записываемом изображении;

$$\sigma_{дп}^{1,0} = \sqrt{D[P_{дп}^{1,0}]} / M[P_{дп}^{1,0}]$$

— коэффициент вариации мощности дифракционной помехи.

На рис. 1 и 2 приведены графики зависимостей $(C/Ш)^{1,0}$, K и \bar{P}^1 от скважности информационных пучков в изображении β_D (при $\beta_F = 2,5$, $K_T = \infty$, $\sigma_T = 0$, $N = 0,5$) и скважности фотоприемников в фотоматрице β_F (при $\beta_D = 1$). Здесь кривая 1 соответствует случаю записи голограммы с ДСФМ, 2 — ЧСФМ, 3 — некогерентного восстановления. Кривые $(C/Ш)^1$ — сплошные линии, $(C/Ш)^0$ — штриховые. Из рис. 1 и 2 видно, что наименьшее значение $(C/Ш)^{1,0}$ соответствует случаю записи голограммы с ДСФМ,

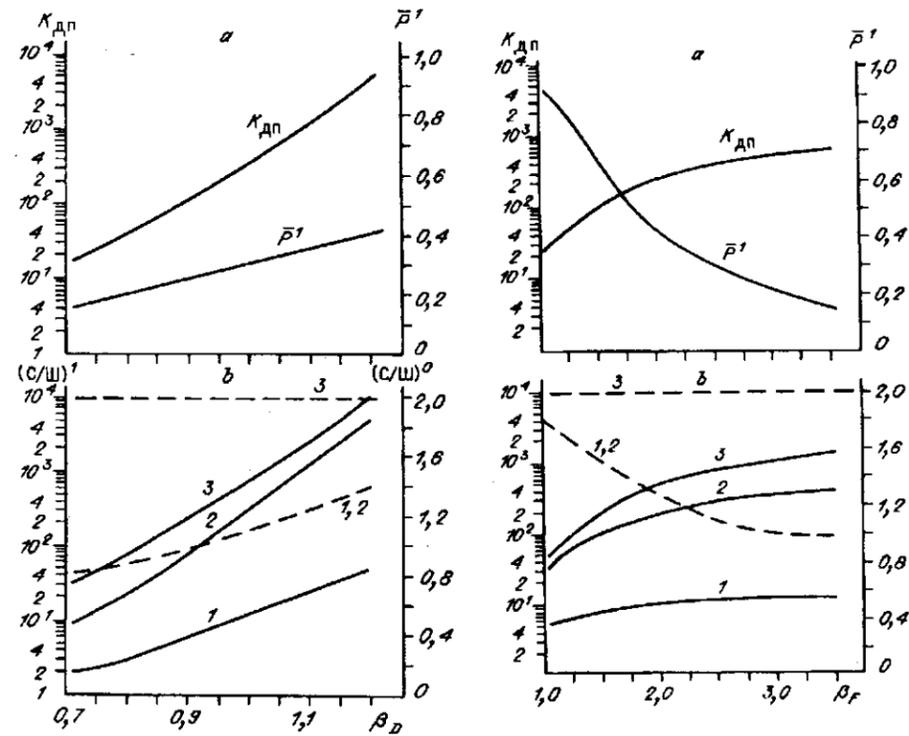


Рис. 1. Зависимости $K_{дп}$, \bar{P}^1 (а) и $(C/Ш)^1$, $(C/Ш)^0$ (б) от скважности информационных пучков в изображении β_D

Рис. 2. Зависимости $K_{дп}$, \bar{P}^1 (а) и $(C/Ш)^1$, $(C/Ш)^0$ (б) от скважности фотоприемников в фотоматрице β_F

наибольшее — НВ. При записи голограммы с ЧСФМ $(C/Ш)^1$ приблизительно в 40 раз больше, чем с ДСФМ, и в 2 раза меньше по сравнению с НВ. Такое положение объясняется тем, что при некогерентном восстановлении все когерентные составляющие дифракционных помех равны нулю. Для случая записи голограммы с ЧСФМ отсутствуют только составляющие дифракционных помех, обусловленные когерентным взаимодействием центрального информационного пучка с недиагональными соседними пучками, которые дают основной вклад в флуктуации оптических «1» и «0». Отметим, что здесь рассматривается четырехуровневая квазислучайная фазовая маска с уровнями фазы $0, \pi/2, \pi, 3/2\pi$, причем разность фаз между данной ячейкой и четырьмя ближайшими соседними составляет $\pi/2$ или $3/2\pi$ [15]. С уменьшением скважности информационных пучков β_D (эквивалентно увеличению плотности записи, $\langle n \rangle \sim 1/\beta_D^2$) уровень дифракционной помехи растет и как следствие падает $(C/Ш)^{1,0}$, K и \bar{P}^1 . Естественно, контраст K и средняя мощность \bar{P}^1 не зависят от типа используемой фазовой маски. Увеличение скважности фотоприемников β_F приводит к падению полезной мощности сигнала, однако K и $(C/Ш)^{1,0}$ в изображении увеличиваются (см. рис. 2).

Статистические свойства шума рассеяния регистрирующей среды и его влияние на флуктуации интенсивности в изображении хорошо изучены. В частности, показано [4], что отношение сигнал/шум рассеяния $(C/Ш)_{\text{рас}}$ связано с контрастом формулой $(C/Ш)_{\text{рас}} = \sqrt{K_{\text{рас}}/2}$.

Аналогичные соотношения можно получить для дифракционных помех. Так, из графиков на рис. 1, 2 вытекают следующие приближенные выражения для отношения сигнал/шум дифракционных помех:

ДСФМ

$$(C/Ш)_{\text{дп}}^1 = \frac{P_c'}{\sqrt{D|P_{\text{дп}}'|}} \approx \frac{1}{2} \sqrt{K_{\text{дп}}},$$

ЧСФМ

$$(C/Ш)_{\text{дп}}^1 \approx K_{\text{дп}},$$

НВ

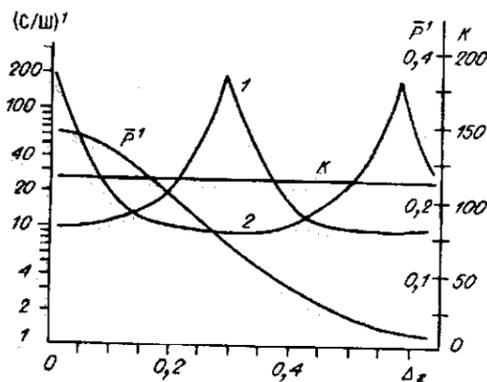
$$(C/Ш)_{\text{дп}}^1 \approx 2K_{\text{дп}}.$$

Приведенные отношения справедливы при отсутствии aberrаций. Если пучки, формирующие голограмму, смещены относительно оптической оси, то отношение $(C/Ш)_{\text{дп}}^1$ падает, особенно сильно в случае НВ и ЧСФМ.

На рис. 3 показаны зависимости $(C/Ш)^1$, K , \bar{P}^1 от сдвига восстанавливающего пучка с голограммы $\Delta\xi$ ($\Delta_1 = \Delta_\xi = \Delta_n$) при $\beta_D = 0,96$, $\beta_F = 2,5$, $K_T = 200$, $\sigma_T^{1,0} = 0$, $N = 0,5$. Кривые 1 и 2 соответствуют записи голограммы с ДСФМ и ЧСФМ.

Из рис. 3 видно, что $(C/Ш)^1$ для случая записи голограммы с ДСФМ (кривая 1) минимален, когда восстанавливающий пучок попадает точно на голограмму

Рис. 3. Зависимости $(C/Ш)^1$, K , \bar{P}^1 от сдвига восстанавливающего пучка с голограммы $\Delta\xi$



$\Delta_1 = 0$. Со сдвигом пучка $(C/Ш)^1$ растет и при $\Delta_1 = 0,28$ принимает максимальное значение (в 40 раз больше, чем для $\Delta_1 = 0$). Дальнейшее увеличение Δ_1 приводит к падению $(C/Ш)^1$. Такой характер кривой $(C/Ш)^1$ связан с изменением разности фаз в когерентных составляющих дифракционного фона при сдвиге восстанавливающего пучка с голограммы. Кривая 2 (зависимость $(C/Ш)^1$ от Δ_1 для случая записи голограммы с ЧСФМ) получается сдвигом кривой 1 на полпериода. Это объясняется тем, что при записи голограммы с ДСФМ между центральными и ближайшими четырьмя соседними пучками (которые дают основной вклад в дифракционную помеху) разность фаз 0 или π , $\cos(\varphi_{r,\mu} - \varphi_{0,0}) = \pm 1$, а при ЧСФМ $-\pi/2$ или $3/2\pi$, $\cos(\varphi_{r,\mu} - \varphi_{0,0}) = 0$. Из графиков на рис. 3 следует, что при реальной точности адресации восстанавливающего пучка на голограмму ($\Delta_1 = 0,05 + 0,1$) ЧСФМ дает для $(C/Ш)^1$ выигрыш в 3—7 раз по сравнению с ДСФМ.

Расчеты также показывают, что при смещении восстановленного изображения относительно фотоматрицы значения $(C/Ш)^{1,0}$, K и \bar{P}^1 монотонно падают. Например, при относительном смещении, равном 10%, K уменьшается в 2 раза, а $(C/Ш)^1$ — примерно в 1,5 раза для случая ЧСФМ.

Таким образом, исследование влияния дифракционных помех на статистические характеристики восстановленных с голограмм изображений позволило получить следующие результаты:

— наилучшее качество восстановленного изображения достигается тогда, когда информационные пучки, соответствующие «1» и «0», некогерентны между собой; в этом случае отношение $(C/Ш)_{\text{дп}}^1 = 2K_{\text{дп}}$;

— при записи голограмм с четырехуровневой случайной фазовой маской отношение $(C/Ш)_{\text{дп}}^1$ в 2 раза меньше, чем в случае некогерентного восстановления $(C/Ш)_{\text{дп}}^1 = K_{\text{дп}}$;

— наиболее сильное искажение восстановленного изображения происходит в случае использования двухуровневой случайной фазовой маски из-за когерентного взаимодействия ближайших элементов этого изображения $(C/Ш)_{\text{дп}}^1 = \sqrt{K_{\text{дп}}}/2$;

— флуктуации мощности оптических «1» и «0» резко возрастают при появлении аберраций пучков, например, при смещении восстанавливающего пучка в плоскости голограммы на 5—10% в случае применения четырехуровневой случайной фазовой маски $(C/Ш)_{\text{дп}}^1$ только в 3—7 раз выше, чем при использовании двухуровневой случайной фазовой маски.

Полученные теоретические оценки статистических характеристик дифракционных помех в ГП полностью согласуются с результатами экспериментальных исследований, приведенными в [23].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акаев А. А., Майоров С. А. Когерентные оптические вычислительные машины.—Л.: Машиностроение, 1977.
2. Lee Wai-Hon. Effect of film-grain noise on the performance of holographic memory // JOSA.—1972.—62, N 6.—P. 797.
3. Lee Wai-Hon, Greer N. O. Noise characteristics of photographic emulsions used for holography // JOSA.—1971.—61, N 3.—P. 402.
4. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография: Пер. с англ.—М.: Мир, 1973.
5. Hill В. Point efficiency and signal-to background ratio in exponential holograms for optical memories // Appl. Opt.—1972.—11, N 12.—P. 2937.
6. Гибин И. С., Пен Е. Ф. Влияние нелинейности фотоматериала на качество голографической записи массива двоичной информации // Оптические устройства хранения и обработки информации.—Новосибирск: ИАиЭ СО АН СССР, 1974.
7. Hill В. Some aspects of a large capacity holographic memory // Appl. Opt.—1972.—11, N 1.—P. 182.
8. Lugt A. V. Design relationship for holographic memories // Appl. Opt.—1973.—12, N 7.—P. 1675.

9. Гибин И. С. Расчет и выбор параметров оптических систем голограммных запоминающих устройств // Автометрия.—1974.—№ 6.
10. Варга П., Киш Г. Расчет оптического канала архивного голографического запоминающего устройства // Квантовая электрон.—1979.—6, № 5.
11. Богданова Е. С., Соскин С. И. Влияние aberrаций оптической системы на емкость голографической памяти // Автометрия.—1975.—№ 3.
12. Acos Gy., Kiss G., Varga P. Effect of lens aberration on the storage capacity of holographic memories // Opt. Commun.—1977.—20, N 1.—P. 63.
13. Соскин С. И., Шондин С. А. Оптимизация параметров голографического запоминающего устройства с учетом aberrаций // Оптика и спектроскопия.—1978.—44, вып. 6.
14. Блок А. А., Домбровский В. А., Домбровский С. А. и др. Практический предел плотности записи данных в голографических ЗУ на плоских носителях // Автометрия.—1989.—№ 5.
15. Kato M., Nakayama Y., Suzuki T. Speckle reduction in holography with a spatially incoherent source // Appl. Opt.—1975.—14, N 5.—P. 1093.
16. Киш Г. Влияние несовершенств оптической системы на вероятность сбоя голографического запоминающего устройства // Квантовая электрон.—1984.—11, № 10.
17. Домбровский В. А. Повышение плотности записи данных в архивных голографических ЗУ на плоских носителях // Тез. докл. II Всесоюз. конф. «Проблемы развития радиооптики». — Тбилиси: ИК АН Груз. ССР, 1985.
18. Пен Е. Ф. Повышение качества записи и достоверности считывания информации в голографических ЗУ: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / СО АН СССР. ИАиЭ.—Новосибирск, 1984.
19. Домбровский В. А., Домбровский С. А., Пен Е. Ф. Исследование помехоустойчивости голограмм в ГЗУ // Автометрия.—1985.—№ 4.
20. Пен Е. Ф. Расчет достоверности считывания информации в ГЗУ на основе экспериментальных данных характеристик восстановленных изображений // Сб. тр. IV Всесоюз. конф. по голографии.—Ереван: ВНИИРИ, 1982.—ч. 2.
21. Домбровский В. А., Домбровский С. А., Пен Е. Ф. Достоверность считывания информации в канале голографического ЗУ с постоянными параметрами // Автометрия.—1988.—№ 6.
22. Домбровский В. А. Статистика перекрестных помех голограмм в ГЗУ // Автометрия.—1987.—№ 5.
23. Домбровский В. А. Экспериментальное исследование предельной плотности записи в страничной голографической памяти на плоском носителе // Автометрия.—1992.—№ 6.

Поступила в редакцию 2 марта 1994 г.