

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 681.327.68 : 778.38

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ
С УЧЁТОМ ДИФРАКЦИОННЫХ ПОМЕХ*В. А. Домбровский¹, Е. Ф. Пен²¹ *Технический центр «Лазерные технологии»,
630049, г. Новосибирск, Красный просп., 220/10*² *Учреждение Российской академии наук
Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: pen@iae.nsk.su*

Проведена оптимизация геометрических и информационных параметров голографической странично организованной памяти с учётом влияния дифракционных помех на плотность записи и вероятность ошибок считывания информации.

Ключевые слова: голографическая память, дифракционные помехи, плотность записи, вероятность ошибок считывания информации.

Введение. Исследования и разработки объёмной голографической памяти, начатые более 40 лет назад, актуальны и в настоящее время благодаря её принципиальным достоинствам: высокой плотности записи и скорости считывания информации при параллельной организации данных [1]. Современные разработки такой памяти достигли коммерческого уровня. В 2007 г. фирма "Inphase Technology" (США) анонсировала устройство Tapestry 300г ёмкостью 300 Гбайт на одном диске со скоростью передачи данных 20 Мбайт/с [2]. Продолжаются усовершенствования уже известных подходов и поиск новых методов записи/считывания информации. Например, активно развивается идея коллинеарной схемы, обеспечивающей малые габариты устройства и совместимость с технологией дисковой памяти [3]. Вместе с тем потенциальные возможности голографической памяти остаются не реализованными в полной мере, что связано с технологическими проблемами и недостаточным уровнем теоретических исследований. Так, мало изучена взаимосвязь системных параметров голографической памяти (в первую очередь плотности записи и достоверности считывания информации) с учётом практических ограничений. В этой области исследований известны лишь несколько новых публикаций [4, 5].

Плотность записи и вероятность ошибок считывания информации в голографической странично организованной памяти ограничиваются рядом факторов, в частности влиянием дифракционных перекрёстных помех из-за взаимодействия соседних голограмм и изображений соседних информационных элементов «1» и «0» в странице данных. Такие помехи связаны с дифракционным размытием этих изображений при ограничении апертуры фурье-голограмм [6, 7]. Амплитудные и фазовые пространственные распределения изображений перекрёстных помех носят случайный характер, поэтому восстановленные из голограмм изображения страниц данных описывают с помощью статистических характеристик [8, 9]: $\overline{P^{1,0}}$, $\sqrt{D[P^{1,0}]}$, $\sigma'_{1,0} = \sqrt{D[P^{1,0}]/P^{1,0}}$ — средних значений, дисперсий, коэффициентов вариаций мощностей изображений «1» и «0», а также их контраста $K = \overline{P^1}/\overline{P^0}$.

*Работа выполнена при поддержке Президиума Сибирского отделения РАН (междисциплинарный интеграционный проект № 71).

Указанные характеристики связаны с геометрическими и информационными параметрами голографической памяти (скважность размещения информационных элементов и фотоприёмников, плотность записи, вероятность ошибки считывания), а также зависят от типа фазовой маски при записи голограмм, aberrаций восстанавливающего пучка в плоскости голограммы и изображений в плоскости матрицы фотоприёмников (фотоматрицы). Оптимизации геометрических параметров странично организованной голографической памяти, обеспечивающей максимальную ёмкость массива голограмм, посвящён ряд работ [6, 10–13]. Вместе с тем вопросы комплексной оптимизации геометрических и информационных параметров голографической памяти, особенно с учётом влияния дифракционных помех, как уже отмечено выше, изучены недостаточно.

Цель данной работы — оптимизация параметров голографической памяти, обеспечивающих при заданной вероятности ошибки считывания максимум средней плотности записи информации в условиях дифракционных помех и aberrаций записывающих/считывающих пучков в плоскости голограммы и восстановление изображения в плоскости фотоматрицы.

Дифракционные помехи и их статистические характеристики. Предположим, что при записи/восстановлении фурье-голограмм изображений страниц данных распределение амплитуд сигнальной U_c , опорной U_o и восстанавливающей U_b волн в плоскости голограммы с точностью до несущественных коэффициентов имеет вид [8]

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

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

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

где ξ, η — координаты в плоскости голограммы; $\omega_c, \omega_o, \omega_b$ — радиусы сигнального, опорного и восстанавливающего гауссовых пучков на уровне $1/e^2$ по интенсивности; f — фокусное расстояние фурье-объективов, используемых при записи/восстановлении голограмм; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число (λ — длина волны света); d — расстояние между разрядными ячейками в транспаранте; $A_{\nu, \mu}$ — функция, представляющая данные на входной странице ($A_{\nu, \mu} = A(1) = 1$, если в (ν, μ) -ячейке записана «1», и $A_{\nu, \mu} = A(0) = 0$, если «0»); $\varphi_{\nu, \mu}$ — функция, характеризующая распределение значений фазы в ячейках случайной фазовой маски (ограничимся вариантом с четырёхуровневой маской со значениями фазы $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$); θ — угол падения опорного и восстанавливающего пучков на голограмму; ξ_0 и η_0 — поперечные смещения восстанавливающего пучка относительно центра голограммы по координатам ξ, η .

Амплитуда восстановленной волны U_D в плоскости фотоматрицы

$$U_D(x, y) = \exp \left[-\frac{\xi_0^2 + \eta_0^2}{\omega_b^2} (1 - 1/L^2) \right] \sum_{\nu, \mu} A_{\nu, \mu} \exp(i\psi_{\nu, \mu}) \exp \left[-\frac{(x + \nu d)^2 + (y + \mu d)^2}{\omega_D^2} \right], \quad (1)$$

где $\psi_{\nu, \mu} = \varphi_{\nu, \mu} + \alpha_{\nu, \mu}$, $\alpha_{\nu, \mu} = -(k/fL^2)[(x + \nu d)\xi_0 + (y + \mu d)\eta_0]$, $L = \omega_b/W$, W — эффективный радиус голограммы, $1/W^2 = 1/\omega_c^2 + 1/\omega_o^2 + 1/\omega_b^2$; $\omega_D = \lambda f/\pi W$ — радиус восстановленного изображения разрядной ячейки транспаранта; x, y — координаты в плоскости фотоматрицы.

С учётом (1) найдём распределение интенсивности восстановленного изображения в плоскости фотоматрицы:

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

Здесь $T = \exp[-8(\Delta_\xi^2 + \Delta_\eta^2)(1 - 1/L^2)]$, где $\Delta_\xi = \xi_0/2\omega_b$, $\Delta_\eta = \eta_0/2\omega_b$ — относительные смещения восстанавливающего пучка по координатам ξ , η . Мощность восстановленного изображения P , приходящаяся на центральный фотоприёмник размером $b \times b$, с учётом возможного сдвига Δx , Δy изображения относительно фотоматрицы выражается как

$$P = \iint_{-b/2}^{b/2} I_D(x + \Delta x, y + \Delta y) dx dy. \quad (3)$$

Выполнив интегрирование, для мощности P имеем [8]

$$P = T \sum_{\nu, \mu} \sum_{\nu', \mu'} B_{\nu, \mu, \nu', \mu'} C_{\nu, \mu, \nu', \mu'}, \quad (4)$$

где

$$B_{\nu, \mu, \nu', \mu'} = \frac{1}{4} \exp[-2\beta_D^2((\nu - \nu')^2 + (\mu - \mu')^2)] \times \\ \times \left(\Phi \left[\sqrt{2} \frac{1 + 2\beta_F \Delta x + \beta_F(\nu + \nu')}{\beta_F/\beta_D} \right] + \Phi \left[\sqrt{2} \frac{1 - 2\beta_F \Delta x - \beta_F(\nu + \nu')}{\beta_F/\beta_D} \right] + \right. \\ \left. + \Phi \left[\sqrt{2} \frac{1 + 2\beta_F \Delta y + \beta_F(\mu + \mu')}{\beta_F/\beta_D} \right] + \Phi \left[\sqrt{2} \frac{1 - 2\beta_F \Delta y - \beta_F(\mu + \mu')}{\beta_F/\beta_D} \right] \right);$$

$$C_{\nu, \mu, \nu', \mu'} = \sum_{\nu, \mu} \sum_{\nu', \mu'} A_{\nu, \mu} A_{\nu', \mu'} \cos \left(\psi_{\nu, \mu} - \psi_{\nu', \mu'} - 8 \frac{\beta_D}{L} ((\nu - \nu')\Delta_\xi + (\mu - \mu')\Delta_\eta) \right);$$

$$\Phi[z] = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-t^2) dt \text{ — интеграл ошибок; } \Delta_x = \Delta x/d, \Delta_y = \Delta y/d \text{ — относитель-}$$

ные смещения восстановленного изображения с фотоматрицы по координатам x и y ; $\beta_F = d/b$ — скважность фотоприёмников в фотоматрице (в силу технологических особенностей фотоматриц интегрального исполнения обычно $\beta_F = 1,5 - 2,5$); $\beta_D = d/2\omega_D$ — скважность информационных пучков в плоскости фотоматрицы. Коэффициенты $B_{\nu, \mu, \nu', \mu'}$ являются функциями геометрических параметров β_F , β_D голографической памяти и аберраций восстановленного изображения в плоскости фотоматрицы Δx , Δy . Коэффициенты $C_{\nu, \mu, \nu', \mu'}$ зависят от конкретных значений $A_{\nu, \mu}$, параметров случайной фазовой маски, используемой при записи голограмм, и аберраций записывающих/считывающих пучков в плоскости голограммы Δ_ξ , Δ_η .

Предположим, что $A_{\nu,\mu}$ и $\varphi_{\nu,\mu}$ — независимые случайные величины, причём вероятности обнаружения в (ν, μ) -ячейке изображений «1» и «0» равны. Тогда, используя результаты [8], можно показать, что для восстановленных изображений страниц данных в отсутствие аберраций в плоскости матрицы фотоприёмников ($\Delta_x = \Delta_y = 0$) средняя мощность изображения «1»

$$\overline{P^1} = \frac{1}{4}(T\Phi_0^2) \left(1 + \frac{1}{K_{\text{ДП}}}\right),$$

контраст

$$K = \frac{\overline{P^1}}{\overline{P^0}} = \left(1 + \frac{1}{K_{\text{ДП}}}\right) / \left(\frac{1}{K_T} + \frac{1}{K_{\text{ДП}}}\right)$$

и коэффициенты вариаций мощностей изображений «1» и «0» имеют вид

$$\begin{aligned} \sigma'_1 &= \frac{\sqrt{D[P^1]}}{\overline{P^1}} = \frac{1}{1 + 1/K_{\text{ДП}}} \sqrt{(\sigma_T^1)^2 + (\sigma_{\text{ДП}}^1)^2/K_{\text{ДП}}^2}; \\ \sigma'_0 &= \frac{\sqrt{D[P^0]}}{\overline{P^0}} = \frac{K}{1 + 1/K_{\text{ДП}}} \sqrt{(\sigma_T^0)^2/K_T^2 + (\sigma_{\text{ДП}}^0)^2/K_{\text{ДП}}^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $K_{\text{ДП}} = M[P_c^1]/M[P_{\text{ДП}}] = \frac{1}{2}\Phi_0/(\Phi_1 + \Phi_2)$ — контраст изображения «1» из-за дифракционных помех; $K_T = M[A^2(1)]/M[A^2(0)]$ — контраст в записываемой странице данных; $D[P^{1,0}] = D[P_c^{1,0}] + D[P_{\text{ДП}}^{1,0}]$ (здесь $D[P_c^{1,0}] = (1/4)(T\Phi_0^2)^2 D[(A_{0,0}^{1,0})^2]$ — дисперсии мощностей изображений «1» и «0» без дифракционных помех; $D[P_{\text{ДП}}^{1,0}] = T^2 \sum_{i=1}^5 B_i^2 C_i^{1,0}$ — дисперсии дифракционной помехи); $\sigma_T^{1,0} = \sqrt{D[P_c^{1,0}]/M[P_c^{1,0}]}$ — коэффициенты вариаций мощностей изображений «1» и «0» в отсутствие дифракционных помех; $\sigma_{\text{ДП}}^{1,0} = \sqrt{D[P_{\text{ДП}}^{1,0}]/M[P_{\text{ДП}}^{1,0}]}$ — коэффициенты вариаций мощностей дифракционной помехи;

$$\Phi_0 = 2\Phi \left[\sqrt{2} \frac{\beta_D}{\beta_F} \right]; \quad \Phi_1 = \Phi_2 = \Phi \left[\sqrt{2} \frac{\beta_D}{\beta_F} (1 + 2\beta_F) \right] + \Phi \left[\sqrt{2} \frac{\beta_D}{\beta_F} (1 - 2\beta_F) \right].$$

Расчётная трёхмерная картина одной из возможных реализаций распределения интенсивности изображения массива 3×3 информационных элементов «1», окружающих информационный элемент «0», показана на рис. 1, *a*. Видно, что изображения этих элементов размыты и неоднородны, пересекаются друг с другом, что вызывает их интерференционное взаимодействие и, как следствие, разброс мощностей изображений информационных элементов, а также снижение их контраста. Пример распределения плотности вероятностей мощностей изображений «1» и «0» в странице данных, иллюстрирующий их статистический характер и условия ошибочного восприятия символа «1» как «0» и наоборот, представлен на рис. 1, *b*.

Графики зависимостей коэффициентов $\sigma'_{1,0}$ от скважности информационных пучков в изображении β_D при разных значениях параметра β_F приведены на рис. 2, *a, b* (расчёты проведены по формулам (5) при $K_T \gg 1$, $\sigma_T = 0$).

Видно, что с ростом величины β_D коэффициенты вариаций мощностей изображений «1» и «0» меняются значительно, а изменение параметра β_F в пределах 1,5–2,5 существенного влияния не оказывает. В то же время меньшему значению β_F соответствуют более

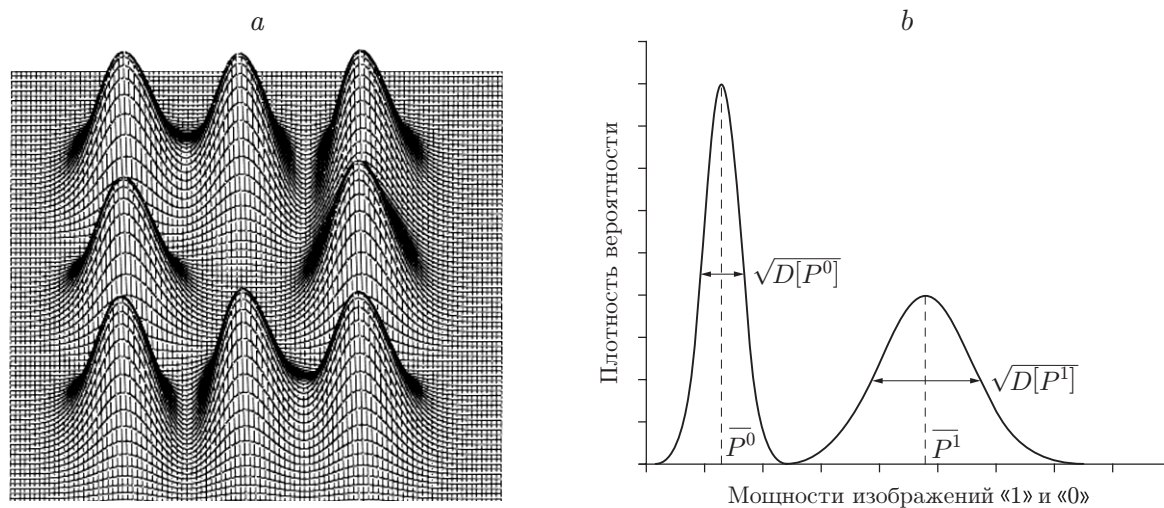


Рис. 1

высокие величины мощностей изображений «1» и «0», поэтому для определённости далее примем $\beta_F = 1,5$.

Локальная и средняя плотности записи информации. В [6, 14] показано, что для странично организованной голографической памяти локальная (для одиночной голограммы) и средняя (для массива голограмм) плотности записи информации равны соответственно

$$n = \frac{\pi}{8(\lambda F \beta_D)^2}; \quad \langle n \rangle = \frac{\pi^2}{(4\sqrt{2}\lambda F \beta_D \beta_H)^2}, \quad (6)$$

где F — относительное отверстие фурье-объектива, используемого при записи голограмм; $\beta_H = h/W$ — скважность голограмм, h — расстояние между голограммами.

Очевидно, что с уменьшением скважности информационных пучков и голограмм плотность записи возрастает, однако при этом увеличиваются дифракционные помехи из-за

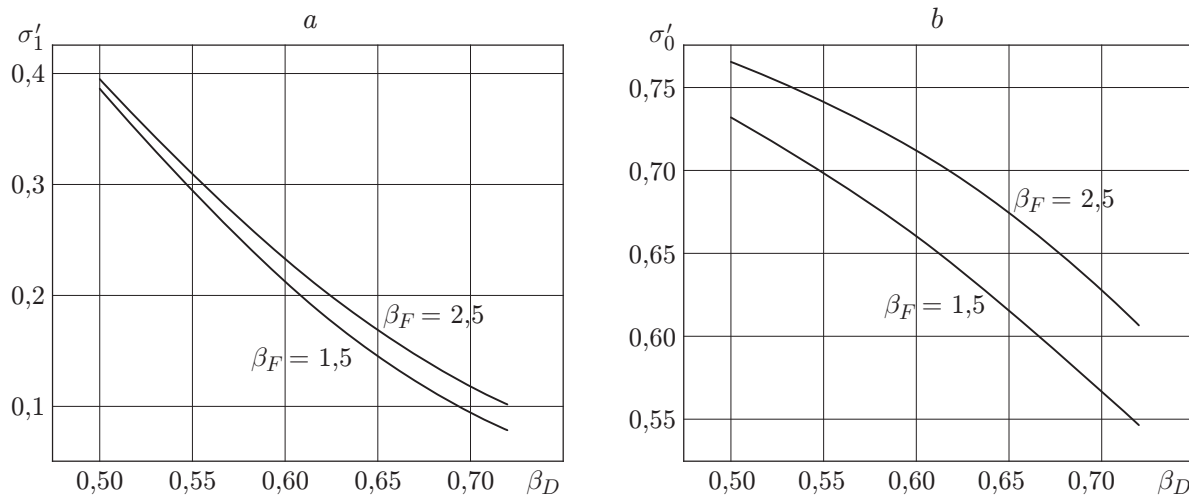


Рис. 2

размытия изображений информационных пучков и помехи от соседних голограмм за счёт их частичного перекрытия, что повышает вероятность ошибочного считывания. Исследуем влияние этих факторов подробнее.

Влияние дифракционных помех. Выше показано, что относительная мощность дифракционной помехи, обусловленная перекрытием четырёх соседних информационных элементов в восстановленном изображении страницы данных, вычисляется как

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

а отношение сигнал/дифракционный фон (контраст изображения «1» из-за дифракционных помех) имеет вид

$$\frac{C}{\Phi_D} = \frac{1}{2} \frac{\Phi\left[\sqrt{2}\frac{\beta_D}{\beta_F}\right]}{\Phi\left[\sqrt{2}\frac{\beta_D}{\beta_F}(1+2\beta_F)\right] + \Phi\left[\sqrt{2}\frac{\beta_D}{\beta_F}(1-2\beta_F)\right]}. \quad (7)$$

Согласно [1] соотношение (7) можно аппроксимировать следующим образом:

$$\frac{C}{\Phi_D} = \frac{1}{4} \exp\left[8\beta_D^2 / \left(1 + \frac{4}{\pi} \frac{\beta_D^2}{\beta_F^2}\right)\right].$$

Тогда выражение для локальной плотности записи примет вид

$$n = \frac{1}{2(\lambda F)^2} \left(\frac{2\pi}{\ln(4(C/\Phi_D))} - \frac{1}{\beta_F^2} \right).$$

Влияние помех соседних голограмм. Отношение сигнал/фон изображений информационных элементов «1» и «0», обусловленное воздействием четырёх соседних голограмм на рассматриваемую голограмму, представим как [14]

$$\frac{C}{\Phi_H} = \frac{1}{4} \exp\left[8\frac{\beta_H^2}{L^2} \left(1 - \frac{1}{L^2}\right)\right].$$

С учётом полученных соотношений выражение для относительной средней плотности можно записать как

$$\frac{\langle n \rangle}{n} = 2\pi \frac{L^2 - 1}{L^4} \frac{1}{\ln(4(C/\Phi_H))}.$$

Отсюда следует, что существует оптимальное значение параметра L ($L = \sqrt{2}$), при котором средняя плотность максимальна [15]. Часто диаметры сигнального, опорного и восстанавливающего пучков выбирают равными, т. е. $L = \sqrt{3}$, в этом случае средняя плотность записи оказывается на 10 % ниже оптимальной [14].

Оптимальное соотношение перекрёстных помех. До сих пор дифракционные помехи изображений соседних информационных элементов «1» и «0» в странице данных и взаимное влияние голограмм рассматривались отдельно. Однако имеется оптимальное соотношение между уровнями этих помех, при котором средняя плотность записи достигает максимального значения [12]. Для его нахождения преобразуем выражение средней плотности записи к виду

$$\langle n \rangle = \left(\frac{\sqrt{\pi}}{2\lambda F}\right)^2 \left[\frac{2\pi}{\ln(4(C/\Phi_D))} - \frac{1}{\beta_F^2} \right] \frac{1}{\ln(4(C/\Phi_H))}, \quad L = \sqrt{2}.$$

После упрощений и преобразований имеем [9]

$$\langle n \rangle = \left(\frac{\pi}{\sqrt{2}\lambda F} \right)^2 \frac{1}{\ln[4(C/\Phi)(1+\mu)] \ln[4(C/\Phi)(1+1/\mu)]},$$

где $\mu = (C/\Phi_D)/(C/\Phi_H)$; $C/\Phi = [(C/\Phi_D)^{-1} + (C/\Phi_H)^{-1}]^{-1}$. Видно, что оптимальным является значение $\mu = 1$, при котором реализуется максимальная средняя плотность записи на плоских носителях

$$\langle n \rangle_{\max} = \left(\frac{\pi}{\sqrt{2}\lambda F} \right)^2 \frac{1}{\ln^2(8C/\Phi)}. \quad (8)$$

В [14] показано, что из условия $\mu = 1$ вытекает также оптимальное соотношение параметров β_D и β_H :

$$\beta_H \approx 2\beta_D(1 - 2\beta_D^2/\pi\beta_F^2). \quad (9)$$

Вероятность ошибки считывания. Известно, что вероятность ошибочного считывания информации в голографической памяти определяется формулой [16]

$$N = (N_1 + N_0)/2, \quad (10)$$

где $N_1 = \int_0^\gamma \rho_1(P_1)dP_1$, $N_0 = \int_\gamma^\infty \rho_0(P_0)dP_0$ — вероятности ошибочного считывания информационных элементов «1» ($1 \rightarrow 0$) и «0» ($0 \rightarrow 1$) соответственно, γ — величина порогового сигнала, $\rho_{1,0}(P_{1,0})$ — функции распределения плотности вероятностей результирующих мощностей изображений «1» и «0».

В предположении нормального закона распределения плотности вероятностей мощностей «1» и «0» имеем

$$N_1 = \frac{1}{2}\{1 - \Phi(z_1)\}, \quad z_1 = (1 - \gamma/\overline{P_1})/\sigma'_1, \quad N_0 = \frac{1}{2}\{1 - \Phi(z_0)\}, \quad z_0 = (\gamma K/\overline{P_1} - 1)/\sigma'_0.$$

Минимум полной вероятности ошибки достигается для оптимального порогового сигнала $\gamma_{\text{опт}} = \overline{P_1} \left\{ \frac{\sigma'_0 + \sigma'_1}{\sigma'_0 + \sigma'_1 \sqrt{K}} \right\}$, при котором

$$N = \{1 - \Phi(z_1)\}, \quad (11)$$

поскольку $z_1 = z_0 = z_H = (K - 1)/(\sigma'_0 + K\sigma'_1)$.

Полученные формулы позволяют вычислить зависимости вероятности ошибок N , а также средней плотности записи от параметров β_F и β_D , что, в свою очередь, даёт возможность оптимизации геометрических и информационных параметров голографической памяти.

В данной работе принято $\beta_F = 1,5$, поэтому далее ограничимся выбором параметра β_D , определяющего величину средней плотности записи $\langle n \rangle$ и вероятности ошибок считывания N . Для этого зададим, например, значение $N \approx 10^{-10}$. В таком случае, как показывают расчёты зависимости средней плотности записи от отношения сигнал/фон (рис. 3), а также соотношения вероятности ошибок считывания и средней плотности записи (рис. 4), при $\lambda = 0,5 \cdot 10^{-3}$ мм и $F = 0,5$ максимально достижимая средняя плотность голографической записи на плоских носителях составляет $2,5 \cdot 10^5$ бит/мм² и реализуется лишь в случае оптимальных значений геометрических параметров $\omega_c^2 = \omega_o^2 = 2\omega_B^2$ (т. е. $L = \sqrt{2}$), $\beta_D = 0,72$, $\beta_H = 1,2$.

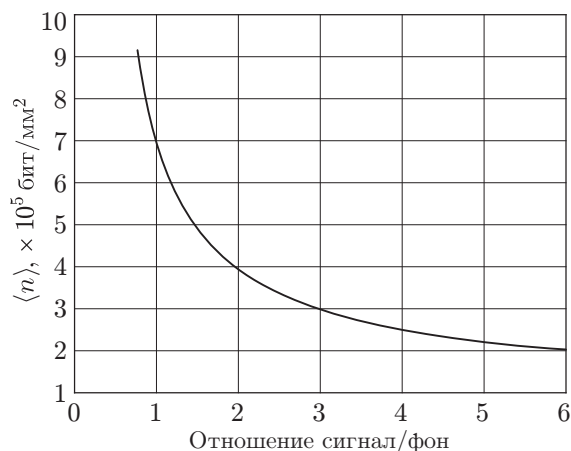


Рис. 3

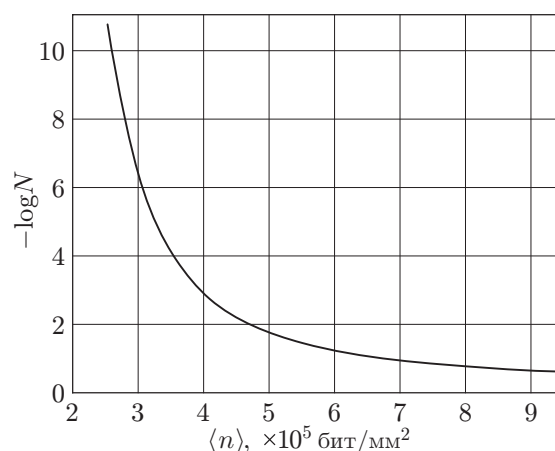


Рис. 4

Влияние aberrаций оптических систем. Aberrации пучков в плоскости голограммы (вследствие погрешностей юстировки) приводят к взаимному смещению сигнального, опорного и восстанавливающего пучков в плоскости голограммы, и в результате возрастают помехи от соседних голограмм, а из-за сдвига изображения страницы данных относительно фотоматрицы, вызванного aberrациями объективов и погрешностями юстировки, увеличиваются помехи от изображений соседних информационных элементов [14].

Выражение для отношения сигнал/фон соседних голограмм с учётом возможных смещений $\Delta\xi$, $\Delta\eta$ восстанавливающего пучка относительно центра голограммы при оптимальном значении $L = \sqrt{2}$ имеет вид [14]

$$C/\Phi_H = \frac{1}{4} \exp(2\beta_H^2) [\text{ch}(4\beta_H^2 \Delta_1)]^{-1},$$

где $\Delta_1 = \Delta\xi/W = \Delta\eta/W$ — сдвиг восстанавливающего пучка относительно центра рассматриваемой голограммы.

Приближённое выражение для отношения сигнал/дифракционный фон в случае aberrаций в плоскости фотоматрицы при $8\beta_D^2 \ll 2\pi\beta_F^2$ можно представить как

$$C/\Phi_D = \frac{1}{4} \exp(8\beta_D^2) [\text{ch}(16\Delta_2\beta_D^2)]^{-1}.$$

Здесь $\Delta_2 = \Delta x/d = \Delta y/d$ — относительный сдвиг информационных пучков с ячеек фотоматрицы.

С учётом полученных соотношений выражение для суммарного отношения сигнал/фон, определяющего среднюю плотность записи в соответствии с формулой (8), примет вид

$$\begin{aligned} C/\Phi &= [(C/\Phi_D)^{-1} + (C/\Phi_H)^{-1}]^{-1} = \\ &= [4 \exp(-8\beta_D^2) [\text{ch}(16\Delta_2\beta_D^2)] + 4 \exp(-2\beta_H^2) [\text{ch}(4\Delta_1\beta_H^2)]]^{-1}. \end{aligned}$$

В случае aberrаций оптической системы голографической памяти увеличится вероятность ошибочного считывания (рис. 5). Из рисунка следует, например, что при выбранных ранее геометрических параметрах и суммарной величине aberrаций $\sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2} = 0,1$ вероятность ошибки считывания увеличится на два порядка, а для её сохранения на уровне

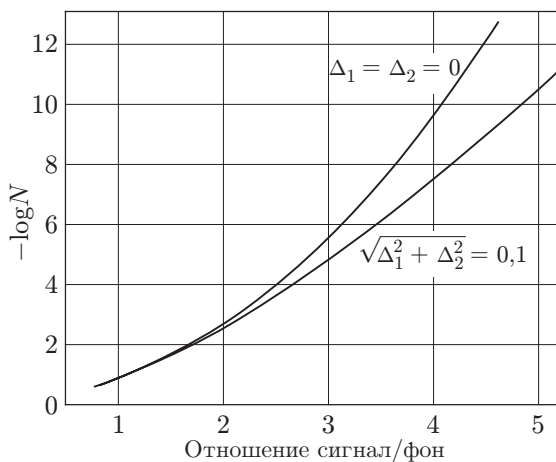


Рис. 5

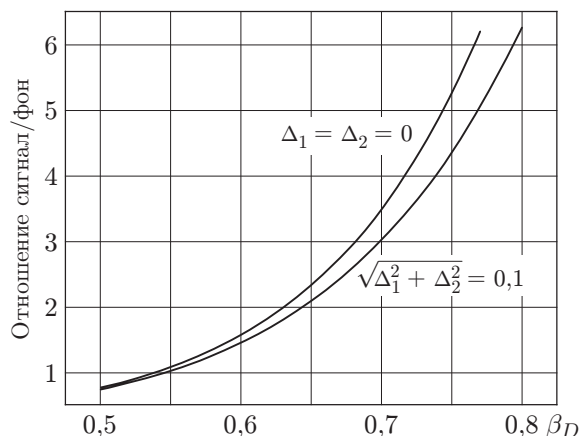


Рис. 6

$N \approx 10^{-10}$ необходимо обеспечить отношение сигнал/фон $\approx 4,7$. Это, в свою очередь, требует увеличения значения скважности расположения изображений информационных элементов β_D и скважности расположения голограмм. Учитывая зависимость отношения сигнал/фон от параметра β_D (рис. 6), видим, что необходимо выбрать $\beta_D = 0,76$ и $\beta_H = 1,30$. Вызванное таким изменением геометрических параметров уменьшение средней плотности записи составит примерно 10 % (см. рис. 3).

Заключение. Установленные в данной работе зависимости средней плотности записи, а также вероятности ошибочного считывания информации в странично организованной голографической памяти от основных геометрических параметров (в том числе в случае аберраций записывающих/считывающих пучков в плоскости голограммы и восстановленного изображения в плоскости фотоматрицы) позволяют найти оптимальные значения параметров β_D , β_H и β_F , обеспечивающие при заданной вероятности ошибки считывания максимум средней плотности записи информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Coufal H. J., Psaltis D., Sincerbox G. T. Holographic data storage. Berlin: Springer-Verlag, 2000. 486 p.
2. [http:// inphase-technologies.com/downloads/pdf/products/2007TapestryProductBrochure.pdf](http://inphase-technologies.com/downloads/pdf/products/2007TapestryProductBrochure.pdf)
3. Tanaka K., Hara M., Tokuyama K. et al. Improved performance in coaxial holographic data recording // Opt. Express. 2007. 15, N 24. P. 16196–16209.
4. Lahrichi A. Bit error rate and system limitations on the storage capacity of volume holographic memory systems // Opt. Eng. 2001. 40, N 11. P. 2392–2399.
5. Várhegyi P., Koppa P., Ujhelyi F., Lorincz E. System modeling and optimization of Fourier holographic memory // Appl. Opt. 2005. 44, N 15. P. 3024–3031.
6. Hill B. Some aspects of a large capacity holographic memory // Appl. Opt. 1972. 11, Is. 1. P. 182–196.
7. Yi X., Yeh P., Gu C., Campbell S. Crosstalk in volume holographic memory // Proc. of the IEEE. 1999. 87, N 11. P. 1912–1930.
8. Домбровский В. А., Домбровский С. А., Пен Е. Ф. Статистические характеристики дифракционных помех в голографической памяти // Автометрия. 1994. № 3. С. 38–47.
9. Yi X., Yeh P., Gu C. Statistical analysis of cross-talk noise and storage capacity in volume holographic memory // Opt. Lett. 1994. 19, N 19. P. 1580–1582.

10. **Lugt A. V.** Design relationship for holographic memories // *Appl. Opt.* 1973. **12**, N 7. P. 1675.
11. **Гибин И. С.** Расчет и выбор параметров оптических систем голограммных запоминающих устройств // *Автометрия.* 1974. № 6. С. 3–15.
12. **Акаев А. А., Майоров С. А.** Когерентные оптические вычислительные машины. Л.: Машиностроение, 1977. 440 с.
13. **Соскин С. И., Шойдин С. А.** Оптимизация параметров голографического запоминающего устройства с учетом aberrаций // *Оптика и спектроскопия.* 1978. **44**, № 6. С. 1163–1171.
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. С. 26–39.
15. **Костров Н. А.** К вопросу оптимизации голографических запоминающих устройств // *Квантовая электрон.* 1974. **1**, № 10. С. 2148–2152.
16. **Домбровский В. А., Домбровский С. А., Пен Е. Ф.** Достоверность считывания информации в канале голографического ЗУ с постоянными параметрами // *Автометрия.* 1988. № 6. С. 69–78.

Поступила в редакцию 9 декабря 2009 г.
