

ЛИТЕРАТУРА

1. Гудмен Дж. Возможности когерентных оптических систем обработки.— ТИИЭР, 1977, т. 65, № 1.
2. Касасент Д., Псалтис Д. Новые методы оптических преобразований для распознавания образов.— ТИИЭР, 1977, т. 65, № 1.
3. Cutrona L. J. Recent Developments in Coherent Optical Technology.— In: Optical and Electro-Optical Information Processing/Eds. J. T. Tippett, D. A. Berhowitz, L. C. Clapp, C. J. Koester, A. Vanderburgh, Jr.— Cambridge: MIT Press, 1965, Chap. 6.
4. Goodman J. W., Kellman P., Hansen E. W. Linear Space-Variant Optical Processing of 1-D Signals.— Appl. Opt., 1977, vol. 16, N 3.
5. Rhodes W. T., Florence J. M. Frequency Variant Optical Signal Analysis.— Appl. Opt., 1976, vol. 15, N 12.
6. Deen L. M., Walkup J. F., Hagler M. O. Representations of Space-Variant Optical Systems Using Volume Holograms.— Appl. Opt., 1975, vol. 14, N 10.
7. Krile T. F., Marks II R. J., Walkup J. F., Hagler M. O. Holographic Representations of Space-Variant Systems Using Phase-Coded Reference Beams.— Appl. Opt., 1977, vol. 16, N 12.
8. Bryngdahl O. Geometrical Transformations in Optics.— JOSA, 1974, vol. 64, N 8.
9. Casasent D., Psaltis D. Scale Invariant Optical Correlation Using Mellin Transforms.— Opt. Comm., 1976, vol. 17, N 1.
10. Блинов Л. М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М.: Наука, 1978.
11. Ярославский Л. П., Мерзляков Н. С. Методы цифровой голографии. М.: Наука, 1977.
12. Chigrinov V. G., Kompanets I. N., Vasiliev A. A. Behavior of Nematic Liquid Crystals in Inhomogeneous Electric Field.— Mol. Cryst. and Liquid Cryst., 1979, vol. 55, N 2, p. 193—207.
13. Гребенкин М. Ф., Сильвестров В. А., Блинов Л. М., Чигринов В. Г. Свойства нематических жидких кристаллов с положительной диэлектрической анизотропией.— Кристаллография, 1975, т. 20, № 5.

*Поступила в редакцию 9 июля 1980 г.;
окончательный вариант — 1 февраля 1982 г.*

УДК 681.327.535.317.7

В. А. ДОМБРОВСКИЙ, С. А. ДОМБРОВСКИЙ
(Новосибирск)

ТРЕБОВАНИЯ К АБЕРРАЦИЯМ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ТОЧНОСТИ ИХ УСТАНОВКИ В ГОЛОГРАММНЫХ ЗУ

Введение. Влияние aberrаций оптической системы на геометрические параметры и информационные характеристики ГЗУ исследовалось в [1—4]. В работах [5—7] рассмотрены вопросы точности юстировки отдельных оптических элементов. В статье [5] определены требования к точности установки транспаранта данных в передней фокальной плоскости Фурье-объектива при записи голограмм. В [6] проведен анализ условий восстановления и расчет ГЗУ, использующих голограммы Фурье. Получены выражения для продольного и поперечного смещений и увеличения изображения. В [7] определены требования к точности установки транспаранта данных и фотоматрицы, а также анализируется влияние несогласованности радиусов кривизны опорного и восстанавливающего пучков на качество изображения.

Однако в реальной оптической системе ГЗУ одновременно присутствуют и разъюстировка оптических элементов, и aberrации объективов, и несогласованность параметров пучков, формирующих голограмму. Aberrации восстановленного изображения в плоскости фотоматрицы, как правило, являются следствием совместного действия всех вышеперечисленных причин. Поэтому при анализе требований, например, к точности

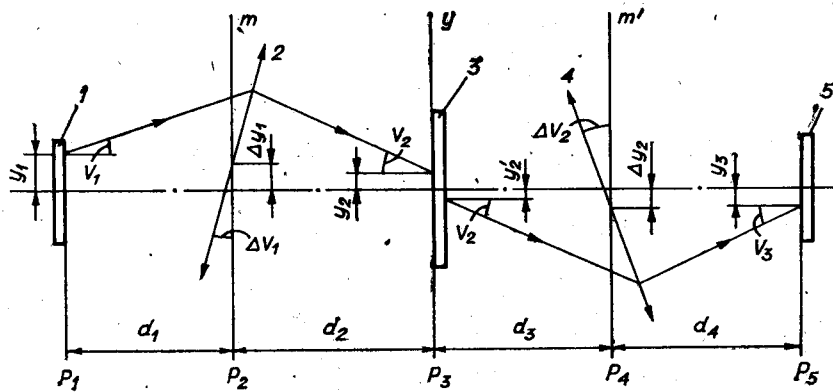


Рис. 1.

установки фотоматрицы необходимо одновременно учитывать как аберрации объективов, так и ограничения на параметры пучков.

В данной работе рассматривается традиционная оптическая система ГЗУ с отдельными схемами записи и восстановления фурье-голограмм мнимого изображения. Формулируются требования к точности установки оптических элементов, к аберрациям объективов записи и восстановления, а также к радиусам кривизны волнового фронта сигнального, опорного и восстанавливающего пучков с учетом их совместного влияния на аберрации изображения цифрового транспаранта в плоскости фотоматрицы. Расчет оптической схемы ГЗУ проводится для гауссовых пучков с помощью методов матричной оптики.

Матричный метод расчета оптической системы ГЗУ. Типичная схема записи и восстановления матриц фурье-голограмм представлена на рис. 1. Здесь 1 — транспарант данных, 2, 4 — соответственно объективы записи и восстановления, 3 — матрица голограмм, 5 — фотоматрица. Расстояния между всеми элементами, а также неточности установки объективов показаны на рис. 1. Для простоты анализа будем рассматривать одномерный случай. Матрица перемещения, связывающая матричные векторы входной P_1 и выходной P_2 плоскости, имеет вид [8]

$$\begin{bmatrix} 1 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $T = d_1/n_1$. В дальнейшем будем полагать $n_1 = 1$. Матрица передачи параксиальных лучей объектива с волновой аберрацией Φ , сдвинутого на Δy_1 и наклоненного на угол ΔV_1 относительно оптической оси, запишется [8] в виде

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta y_1 \\ -1/f & 1 & (\Delta V_1 + \delta) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Здесь $\delta = \frac{\partial \Phi}{\partial m}$ — угловая аберрация объектива записи. Матрица преобразования луча из плоскости P_1 в плоскость P_3 (см. рис. 1) представляет собой произведение трех элементарных матриц (двух матриц перемещения и одной матрицы объектива):

$$\begin{bmatrix} 1 & d_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta y_1 \\ -1/f & 1 & (\Delta V_1 + \delta) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & \Delta y_1 + d_2(\Delta V_1 + \delta) \\ C_1 & D_1 & (\Delta V_1 + \delta) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $A_1 = 1 - d_2/f$; $B_1 = d_1 + d_2 - d_1 d_2/f$; $C_1 = -1/f$; $D_1 = 1 - d_1/f$.

Аналогично можно получить матрицу преобразования лучей из плоскости матрицы голограмм P_3 в плоскость фотоматрицы P_5 :

$$\begin{bmatrix} A_2 & B_2 & \Delta y_2 + d_4(\Delta V_2 + \delta') \\ C_2 & D_2 & (\Delta V_2 + \delta') \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Здесь $A_2 = 1 - d_4/f_1$; $B_2 = d_3 + d_4 - d_3 d_4/f_1$; $C_2 = -1/f_1$; $D_2 = 1 - d_3/f_1$; δ' — угловая aberrация объектива восстановления; Δy_2 , ΔV_2 — смещение и наклон объектива восстановления к оптической оси.

Пусть сигнальный гауссовый пучок имеет радиус w_1 и радиус кривизны R_1 в плоскости транспаранта данных, а высота и угол наклона пучка по отношению к оптической оси — соответственно y_1 и V_1 . Тогда при известной матрице передачи (3) легко найти матричный вектор луча в плоскости голограмм:

$$\begin{bmatrix} y_2 \\ V_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & \Delta y_1 + d_2(\Delta V_1 + \delta) \\ C_1 & D_1 & (\Delta V_1 + \delta) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ V_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 y_1 + B_1 V_1 + \Delta y_1 + d_2(\Delta V_1 + \delta) \\ C_1 y_1 + D_1 V_1 + \Delta V_1 + \delta \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Радиус поперечного сечения пучка w_c и радиус кривизны волнового фронта R_c в плоскости голограммы можно найти, используя выражения, приведенные в [9]. Таким образом, в плоскости голограммы для сигнального пучка получим $U_c(y) = \exp[-(y - y_2)^2/w_c^2] \exp[-ik(y - y_2)^2/2R_c] \times \exp[ik(y - y_2)V_2]$, где $k = (2\pi)/\lambda$ — волновое число, λ — длина волны. Пусть для опорного и восстанавливающего пучков, падающих на голограмму под углом α , соответственно имеем

$$U_o(y) = \exp[-y^2/w_o^2] \exp[-ik(y^2/2R_o)] \exp(iky \sin \alpha),$$

$$U_b(y) = \exp[-y^2/w_b^2] \exp[-ik(y^2/2R_b)] \exp(iky \sin \alpha).$$

Если восстанавливающий пучок сдвинут относительно считываемой голограммы на величину σ , то в предположении линейной регистрации тонкой голограммы мнимая составляющая восстановленной волны запишется таким образом:

$$U_c U_o^* U_b = N \exp[-(y - y_2')^2/W^2] \exp[-ik((y - y_2')^2/2R)] \times \exp[iky(\sigma/\gamma_1 + y_2/\gamma_2 + V_2)], \quad (6)$$

где $N = \exp[-(y_2^2/w_c^2 + \sigma^2/w_b^2)] \exp[W^2(y_2/w_c^2 + \sigma/w_b^2)^2]$;

$y_2' = W^2(y_2/w_c^2 + \sigma/w_b^2)$; $1/W^2 = 1/w_c^2 + 1/w_o^2 + 1/w_b^2$; $1/R = 1/R_c + 1/R_b - 1/R_o$,
 $1/\gamma_1 = (W^2/w_b^2)1/R - 1/R_b$; $1/\gamma_2 = (W^2/w_c^2)1/R - 1/R_c$.

Матричный вектор сразу после голограммы из (6) принимает вид

$$\begin{bmatrix} y_2' \\ V_2' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W^2(y_2/w_c^2 + \sigma/w_b^2) \\ \sigma/\gamma_1 + y_2/\gamma_2 + V_2 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Матричный вектор в плоскости фотоматрицы находится при помощи матрицы передачи (4)

$$\begin{bmatrix} y_3 \\ V_3 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 & \Delta y_2 + d_4(\Delta V_2 + \delta') \\ C_2 & D_2 & (\Delta V_2 + \delta') \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_2' \\ V_2' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_2 y_2' + B_2 V_2' + \Delta y_2 + d_4(\Delta V_2 + \delta') \\ C_2 y_2' + D_2 V_2' + \Delta V_2 + \delta' \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

В идеальной оптической системе ГЗУ высоты лучей в плоскости транспаранта и фотоматрицы должны быть равны по абсолютной вели-

чине и противоположны по знаку $y_3 = -y_1$. Из выражения (8) находим смещение восстановленного пучка в плоскости фотоматрицы относительно идеального положения:

$$\xi = y_3 + y_1 = A_2 y_2' + B_2 V_2' + \Delta y_2 + d_4 (\Delta V_2 + \delta') + y_1. \quad (9)$$

Выражение (9) справедливо для центральной голограммы. Если мы считаем n -ю голограмму, то (9) преобразуется так:

$$\xi = A(y_2' + na) + B V_2' + \Delta y_2 + d_4 (\Delta V_2 + \delta') + y_1, \quad (10)$$

a — шаг между голограммами.

После подстановки выражений для y_2' и V_2' в (10) и некоторых преобразований получим

$$\xi = \sum_{i=1}^7 \xi_i, \quad (11)$$

где $\xi_1 = y_1 [A_1 A_2 (W/w_c)^2 + A_1 B_2 / \gamma_2 + B_2 C_1 + 1]$, $\xi_2 = V_1 [A_2 B_1 (W/w_c)^2 + B_1 B_2 / \gamma_2 + B_2 D_1]$, $\xi_3 = \Delta y_1 [A_2 (W/w_c)^2 + B_2 / \gamma_2] + \Delta y_2$, $\xi_4 = \Delta V_1 [A_2 d_2 \times (W/w_c)^2 + B_2 d_2 / \gamma_2 + B_2] + d_4 \Delta V_2$, $\xi_5 = \sigma [A_2 (W/w_c)^2 + B_2 / \gamma_1]$, $\xi_6 = \delta [A_2 d_2 \times (W/w_c)^2 + B_2 d_2 / \gamma_2 + B_2] + d_4 \delta'$, $\xi_7 = A_2 n a$.

Требования к точности установки оптических элементов. Члены, входящие в правую половину выражения (11), дают различный вклад в искажения изображения ячейки транспаранта. Одни члены ($i = 3; 4, 5, 7$) определяют смещение изображения транспаранта как целого, другие ($i = 1, 2, 6$) — приводят к искажению его геометрических размеров. Проанализируем влияние каждого члена в выражении (11) на смещение и геометрические искажения изображения в плоскости фотоматрицы.

Рассмотрим случай слабых разъюстировок оптических элементов, обычно реализующийся в оптической системе ГЗУ:

$$|\Delta f_1|/f = |d_1 - f|/f \ll 1; \quad |\Delta f_2|/f = |d_2 - f|/f \ll 1; \quad |\Delta f_4|/f_1 = |d_4 - f_1|/f_1 \ll 1.$$

Здесь f и f_1 — фокусные расстояния объектива записи и восстановления соответственно. Тогда для коэффициентов матриц $ABCD$ имеем

$$\begin{cases} A_1 = \Delta f_2 / f, & B_1 = f - \Delta f_1 \Delta f_2 / f, & C_1 = -1/f, & D_1 = \Delta f_1 / f; \\ A_2 = \Delta f_4 / f_1, & B_2 = f_1 + \Delta f_4 (1 - d_3 / f_1), & C_2 = -1/f_1, & D_2 = 1 - d_3 / f_1. \end{cases} \quad (12)$$

Первый член выражения (11) с учетом (12) преобразуется в виде

$$\xi_1 = y_1 [-\Delta f_0 / f - (\Delta f_4 / f) (1 - d_3 / f) + \Delta f_2 / \gamma_2], \quad (13)$$

где $\Delta f_0 = f_1 - f$. В (13) членами второго порядка малости пренебрегаем. Это выражение определяет изменение масштаба восстановленного изображения транспаранта в плоскости фотоматрицы. Масштаб восстановленного изображения зависит от точности установки голограммы Δf_2 и фотоматрицы Δf_4 соответственно в задней фокальной плоскости объективов записи и восстановления, точности совпадения фокусных расстояний f и f_1 этих объективов и от соотношения радиусов кривизны опорного, восстанавливающего и сигнального пучков γ_2 .

Для примера определим требования на вышеуказанные параметры из условия, что смещение ξ_1 изображения крайних ячеек транспаранта не должно превышать одной десятой размера ячейки фотоматрицы. Здесь и в дальнейших примерах используются значения параметров оптических элементов ГЗУ [10]. Размер ячейки фотоматрицы $b = 0,1$ мм, фокусное расстояние объективов 60 мм, координата крайней ячейки транспаранта $y_1 = 4$ мм. Предположим, что каждый член в (13) дает одинаковый вклад в лучевую aberrацию изображения. Тогда несогласованность фокусных расстояний объективов должна быть

$$|\Delta f_0|/f \ll 0,1b/3y_1 \approx 10^{-3}.$$

Если $d_3 = 0$, то относительная неточность продольной установки фотоматрицы в задней фокальной плоскости объектива восстановления $|\Delta f_i/f| \leq 0,1b/3y_1 \approx 10^{-3}$, или $|\Delta f_i| \leq 50$ мкм. Наконец, из неравенства $|\gamma_2/\Delta f_2| \geq |3y_1/0,1b|$ легко найти требования на допустимые значения параметра γ_2 при заданном значении Δf_2 , или наоборот. Если $\Delta f_2 = 0,1$ мм, то $|\gamma_2| \geq |3y_1\Delta f_2/0,1b| \approx 120$ мм. Из анализа первого члена (11) следует, что наиболее жесткие требования предъявляются к согласованию фокусных расстояний объективов $|\Delta f_0/f| \leq 0,1\%$, а также к точности установки фотоматрицы в задней фокальной плоскости объектива восстановления $\Delta f_i/f \leq 0,1\%$.

Второй член в выражении (11) без учета членов второго порядка малости запишется:

$$\xi_2 = V_1[\Delta f_i(W/w_c)^2 + \Delta f_i + (f^2 + f\Delta f_i(1 - d_3/f_1))/\gamma_2]. \quad (14)$$

Если транспарант данных освещается плоской наклонной волной (V_1 — угол наклона волны к оптической оси), то это приводит к общему сдвигу восстановленного изображения в плоскости фотоматрицы, который может компенсироваться. Более интересен случай, когда транспарант освещается сферической волной с радиусом кривизны R_1 . Тогда значение $V_1 = y_1/R_1$ зависит от координаты ячейки транспаранта y_1 , и второй член (11), как и предыдущий, приводит к изменению масштаба восстановленного изображения. Проанализируем (14) на численных примерах. Пусть $\Delta f_i = 5$ мм, тогда требования на радиус кривизны $R_1 \geq |y_1\Delta f_i/0,1b| \approx 2$ м. Из третьего члена (14) при условии $\gamma_2 \approx 100$ мм получаем $|R_1| \geq y_1 f^2/0,1b\gamma_2 = 14,4$ м. Отсюда можно сделать вывод, что требование на радиус кривизны фронта волны, освещающей транспарант, определяется главным образом значением параметра γ_2 .

Рассмотрим совместно третий и четвертый члены в выражении (11), которые обусловлены соответственно несоосностью объективов и их перекосами относительно оптической оси:

$$\xi_3 = \Delta y_1[(\Delta f_i/f_1)(W/w_c)^2 + (f_1 + \Delta f_i(1 - d_3/f_1))/\gamma_2] + \Delta y_2, \quad (15)$$

$$\xi_4 = \Delta V_1 f_1 [1 + d_2/\gamma_2] + d_4 \Delta V_2.$$

Как уже отмечалось, эти члены приводят к однородному сдвигу всего изображения, не искажая его формы. Ясно, что сдвиг за счет несоосности или наклона одного объектива легко компенсируется поперечным смещением или наклоном второго. Однако отметим, что неточность юстировки объективов записи и восстановления неодинаково влияет на сдвиг изображения транспаранта в плоскости фотоматрицы. Степень влияния определяется значением параметра γ_2 . Так, например, если при $\gamma_2 \gg f_1$ сдвиг изображения зависит только от поперечного смещения объектива восстановления, то при $\gamma_2 \sim f_1$ объективы вносят равный вклад в абerrации изображения. Также необходимо иметь в виду, что несоосность и перекосы объективов приводят к ограничению рабочего поля объектива восстановления и, как будет показано ниже, увеличению абerrаций объективов.

Пятый член (11), характеризующий сдвиг изображения за счет смещения σ восстанавливающего пучка относительно голограммы, с учетом (12) запишется в виде

$$\xi_5 = \sigma[(\Delta f_i/f)(W/w_c)^2 + f/\gamma_1] \approx (f/\gamma_1)\sigma. \quad (16)$$

Хотя этот член, как и два предыдущих, приводит к однородному смещению изображения транспаранта, однако для различных голограмм сдвиг может быть разным и зависит от абerrаций массива считывающих пучков в плоскости матрицы голограмм. Определим, какие ограничения накладывает пятый член на параметр γ_1 . Например, если $\xi_5 \leq 5$ мкм, то при $\sigma = 0,1$ мм получим $|\gamma_1| \geq |\sigma f/5 \cdot 10^{-3}| = 1,2$ м.

Седьмой член в (11) $\xi_7 = \Delta f_i n a / f$, связанный с неточностью позиционирования фотоматрицы в задней фокальной плоскости объектива

восстановления, накладывает те же требования на $\Delta f_4/f$, что и первый член. Например, если $\xi_7 \leq 5$ мкм, $na = 6,2$ мм, то $|\Delta f_4/f| \leq 0,08\%$.

Требования к aberrациям объективов ГЗУ. Шестой член в выражении (11), обусловленный aberrациями объективов, с учетом (12) запишется таким образом:

$$\xi_6 = \delta[(\Delta f_4/f)d_2(W/w_c)^2 + f + \Delta f_4(1 - d_3/f)](d_2/\gamma_2 + 1) + d_4\delta'.$$

Если $\Delta f_4 = 0$, то последнее выражение принимает вид

$$\xi_6 = \delta d_2(f/\gamma_2) + \delta f + \delta' f. \quad (17)$$

Первый член в (17) аналогичен выражению (16) ($\xi_5 = \sigma f/\gamma_1$) с той разницей, что если последний обусловлен смещением σ считывающего пучка с голограммы, то член $\delta d_2 f/\gamma_2$ связан с лучевой aberrацией сигнального пучка в плоскости голограммы. Из (17) видно, что при соответствующем выборе параметра γ_2 ($\gamma_2 = -d_2$) можно полностью устранить aberrации объектива записи. При этом искажения изображения транспаранта будут определяться только aberrациями объектива восстановления. Обсудим более детально требования к aberrациям объективов в ГЗУ. Схема записи и считывания матриц голограмм приведена на рис. 2, где P_1 — плоскость транспаранта данных, P_2, P_4 — плоскости входного и выходного зрачков объективов записи и восстановления соответственно, P_3 — плоскость матрицы голограмм, P_5 — плоскость фотоматрицы. Объективы записи и восстановления переносят изображение из фокуса в бесконечность и из бесконечности в фокус соответственно. Для простоты предположим, что объективы записи и восстановления имеют одинаковые aberrации, а входной и выходной зрачки расположены соответственно на расстоянии f от передней и задней фокальных плоскостей (см. рис. 2). Тогда угловые aberrации для объективов запишутся [11] в виде

$$\delta = \frac{m^3}{2f^3} S_I + \frac{3}{2} \frac{m^2}{f^2} \omega S_{II} + \frac{m\omega^2}{2f} (3S_{III} + S_{IV}) + \frac{\omega^3}{2} S_V; \quad (18)$$

$$\delta' = \frac{m'^3}{2f^3} S_I + \frac{3}{2} \frac{m'^2}{f^2} \omega' S_{II} + \frac{m'\omega'^2}{2f} (3S_{III} + S_{IV}) + \frac{\omega'^3}{2} S_V, \quad (19)$$

где m и m' — координаты во входном зрачке объектива записи и выходном зрачке объектива восстановления; ω и ω' — углы поля зрения объектива записи в пространстве объектов и восстановления в пространстве изображения; $S_I - S_V$ — суммы Зайделя для сферической aberrации, комы, астигматизма, кривизны поля и дисторсии соответственно.

Вычисленные из выражений (18), (19) допустимые значения сумм Зайделя для каждой aberrации для различных случаев сведены в таблицу. Значения сумм Зайделя, приведенные во 2-м и 3-м столбцах таблицы, соответствуют случаю центрированной оптической системы ГЗУ. Здесь $m = 5,66$ мм, $m' = 9$ мм, $\omega = -\omega' = 0,098$ рад. Допустимое смещение изображения в плоскости фотоматрицы, обусловленное каждой aberrацией, принимается не выше 5 мкм. Во втором столбце таблицы приведены значения сумм для случая $\gamma_2 \gg d_2$, в третьем столбце — для случая $\gamma_2 \sim d_2$. Из таблицы видно, что с уменьшением параметра γ_2 требования ко всем суммам Зайделя, кроме комы, растут.

В случае когда имеются смещения объективов и их перекосы относительно оптической оси, для расчета допустимых значений сумм Зайделя можно воспользоваться теми же формулами (18), (19), только с соответствующим изменением координат в зрачках $m_{II} = m + \Delta y_1$, $m'_{II} =$

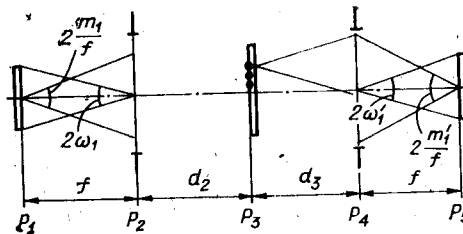


Рис. 2.

Требуемые значения сумм Зайделя фурье-объективов в зависимости от их разьюсти-
ровки и параметра γ_2 для ГЗУ [10]

1	2	3	4	5
Сумма Зайделя	$\gamma_2 \gg d_2$	$\gamma_2 \sim d_2$	$\Delta V_1 = \Delta V_2 = \Delta y_1 = 0, \Delta y_2 = 0,5 \text{ мм}$	$\Delta y_1 = \Delta y_2 = \Delta V_1 = 0, \Delta V_2 = 8,6 \cdot 10^{-3}$
$S_I \leq \left \frac{\xi_{\text{с.сф}} 2f^2}{m^3 (d_2/\gamma_2 + 1) + m'^3} \right $	0,037	0,031	0,032	0,037
$S_{II} \leq \left \frac{2f\xi_{\text{с.ком}}/3}{\omega m^2 (d_2/\gamma_2 + 1) + \omega' m'^2} \right $	0,04	0,116	0,03	0,035
$\begin{aligned} 3S_{III} + S_{IV} &\leq \\ &\leq \left \frac{2\xi_{\text{с.кр}}}{\omega^3 m (d_2/\gamma_2 + 1) + m' \omega'^2} \right \end{aligned}$	0,07	0,05	0,062	0,065
$S_V \leq \left \frac{2\xi_{\text{с.дист}}}{f [\omega^3 (d_2/\gamma_2 + 1) + \omega'^3]} \right $	∞	0,18	0,7	0,7

$= m' + \Delta y_2$ и углов поля зрения $\omega_n = \omega + \Delta y_1/f - \Delta V_1$, $\omega'_n = \omega' - \Delta y_2/f + \Delta V_2$. В столбцах 4 и 5 таблицы приведены соответственно допустимые значения сумм, когда объектив восстановления смещен относительно оптической оси на $\Delta y_2 = 0,5 \text{ мм}$ ($\Delta y_1 = 0$, $\Delta V_1 = \Delta V_2 = 0$) и перекошен относительно оптической оси на $\Delta V_2 = 8,6 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$ ($\Delta y_1 = 0$, $\Delta y_2 = 0$, $\Delta V_1 = 0$). Видно, что несоосность и перекосы объективов приводят к увеличению всех aberrаций, однако быстрее растут компенсируемые aberrации (кома, дисторсия).

В заключение отметим, что требования на радиусы кривизны волнового фронта сигнального, опорного и восстанавливающего пучков в плоскости голограммы вытекают из ограничений на значения параметров γ_1 , γ_2 , которые рассматривались выше:

$$\begin{cases} |1/\gamma_1| = |(W/w_s)^2 [1/R_c + 1/R_s - 1/R_o] - 1/R_s| \leq 1/\gamma_{1 \text{ доп}}, \\ |1/\gamma_2| = |(W/w_c)^2 [1/R_c + 1/R_s - 1/R_o] - 1/R_c| \leq 1/\gamma_{2 \text{ доп}}, \end{cases} \quad (20)$$

а также допустимой величины расфокусировки изображения разрядной ячейки [7].

Заключение. С помощью методов матричной оптики в приближении гауссовых пучков получено общее выражение для лучевой aberrации изображения произвольной ячейки транспаранта данных, восстановленного из n -й голограммы в матрице для традиционной схемы записи и восстановления фурье-голограмм с мнимым изображением. В результате анализа этого выражения установлено следующее.

1. Степень согласования фокусных расстояний f и f_1 объективов записи и восстановления, а также точность установки фотоматрицы в задней фокальной плоскости объектива восстановления высокие и для конкретных параметров элементов ГЗУ [10], которые рассматривались в статье, составляют соответственно $|f_1 - f|/f \leq 0,1\%$ и $|\Delta f_1/f| \leq 0,1\%$. Требования к точности установки транспаранта данных и матрицы голограмм соответственно в передней и задней фокальных плоскостях объектива записи небольшие $|\Delta f_1|/f \leq 1\%$, $|\Delta f_2|/f \leq 1\%$ и определяются допустимой степенью рассогласования радиусов кривизны фронта пучков, формирующих голограмму (20).

2. Несогласованность радиусов кривизны фронта сигнального, опорного и восстанавливающего пучков одновременно приводит к трем эффектам:

- расфокусировка изображения разрядной ячейки [7];
- лучевая aberrация изображения разрядной ячейки при смещении считывающего пучка с голограммы (16);

в) лучевая аберрация изображения разрядной ячейки за счет увеличения первичных аберраций фурье-объективов (17). Требования к согласованию радиусов кривизны фронта пучков зависят от параметров оптической схемы ГЗУ и, как правило, являются высокими.

3. Наиболее жесткие требования предъявляются к сферической аберрации и к кривизне поля объективов. В случае когда входной зрачок объектива восстановления помещается в плоскости матрицы голограмм, а размеры транспаранта данных и матрицы голограмм совпадают, сферическая аберрация и кривизна поля минимальные, а кома и дисторсия компенсируются соответственно частично и полностью. Неточность юстировки объективов приводит к увеличению их первичных аберраций, причем быстрее растут компенсируемые аберрации (кома, дисторсия) (см. таблицу).

Авторы выражают благодарность Е. Ф. Пену, С. А. Шойдину, Л. Н. Горшковой за полезные обсуждения, а также И. С. Гибину за ценные советы и замечания, сделанные им при чтении рукописи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богданова Е. С., Соскин С. И. Влияние аберраций оптической системы на емкость голографической памяти.— Автометрия, 1975, № 3.
2. Соскин С. И., Шойдин С. А. Расчет оптической схемы голографического запоминающего устройства.— Опт. и спектр., 1978, т. 44, № 3.
3. Соскин С. И., Шойдин С. А. Оптимизация параметров голографического запоминающего устройства с учетом аберраций.— Опт. и спектр., 1978, т. 44, № 6.
4. Acos Gy., Kiss G., Varga P. Effect of Lens Aberrations on the Storage Capacity of Holographic Memories.— Opt. Comm., 1977, vol. 20, N 1, p. 63.
5. Гибин И. С. и др. Ассоциативная выборка информации в голограммных запоминающих устройствах.— Автометрия, 1973, № 5.
6. Scamor R. Alignment and Desing Conditional for Optical Memory Systems Using Fouries Holograms.— Optica Acta, 1978, vol. 25, N 2, p. 107.
7. Домбровский В. А., Домбровский С. А., Пен Е. Ф. Влияние параметров гауссового опорного пучка на искажение восстановленного из голограммы изображения.— Опт. и спектр., 1978, т. 45, № 5.
8. Джеррард А., Берч Дж. М. Введение в матричную оптику. М.: Мир, 1978.
9. Когельник Г., Ли Т. Резонаторы и световые пучки лазеров.— ТИИЭР, 1966, т. 54, № 10.
10. Выдрин Л. В. и др. Устройство автоматической записи матриц голограмм.— Автометрия, 1980, № 2.
11. Слюсарев Г. Г. Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение, 1975.

Поступила в редакцию 16 декабря 1981 г.

УДК 612.8 : 681.5

И. П. МУРАВЬЕВ, Д. М. РОМАНОВ, А. А. ФРОЛОВ

(Москва)

СТОХАСТИЧЕСКИЙ АССОЦИАТИВНЫЙ ФИЛЬТР

Проектировщики современной вычислительной техники все чаще обращаются к результатам нейрофизиологических исследований, в которых изучаются основные особенности переработки информации в живых системах [1]. Весьма перспективным с точки зрения приложения к технике является стохастический квазиголографический подход к анализу памяти, разрабатываемый начиная с работы Бриндли [2]. В дальнейшем [3—5] этот подход был согласован с данными физиологических экспериментов о функциях и морфологической структуре отдельных областей мозга. В [5] постулировано, что гиппокамп выполняет функцию памяти, обеспечивающей восстановление запомненного ранее полного паттерна нейронной активности после предъявления его части (автоассоциативное воспроизведение [1]). В [1] эта функция обобщена для случая, когда