

ЭЛЕМЕНТЫ ОПТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ОБРАБОТКИ И ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

УДК 681.327.68 : 778.38

А. А. БОРИСКЕВИЧ, В. К. ЕРОХОВЕЦ, Н. А. ЯРМОШ

(Минск)

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ ВОСПРОИЗВОДИМЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ГЗУ ТИПА ЗД

Одним из важных показателей толстых голограмм является их ориентационная чувствительность, учитывающая связь дифракционной эффективности при их воспроизведении с угловыми характеристиками считывающего пучка. Данная связь является основополагающей для построения голографических запоминающих устройств (ГЗУ) с трехмерной (ЗД) организацией накопителя информации. С использованием теории толстых одномерных голографических решеток Х. Когельника [1] построены экспериментальные ГЗУ типа ЗД и показаны их предпочтительные области применения [2—7]. В ряде последних работ получили развитие модели трехмерных голографических решеток [8—10], более адекватные конструктивным особенностям практических схем ГЗУ типа ЗД.

При значительной толщине голограмм их ориентационная чувствительность высока. В этом случае практическим ограничением числа голограмм является их дифракционная эффективность и минимальное отношение сигнал/шум, вызванное взаимосвязью наложенных записей [11—13]. С уменьшением же толщины голограммы ориентационная чувствительность оказывается настолько низкой [10], что для улучшения информационных характеристик ГЗУ типа ЗД возникает целесообразность введения другого критерия — условия разделения изображений с наложенных соседних голограмм.

В связи с этим в настоящей работе с позиций общего математического описания рассматривается условие пространственного разделения изображений с учетом особенностей возможных конструкций ГЗУ типа ЗД.

В соответствии с непараксиальной моделью воспроизведения голограммы [14] пучок света, восстановленный из k -й голограммы и формирующий ij -ю точку в изображении, характеризуется угловыми координатами $(\alpha_{I_{ih}}; \beta_{I_{jh}})$, полученными из системы уравнений в прямоугольной системе координат (рис. 1):

$$\begin{aligned} \sin \alpha_{I_{ih}} &= \mu (\sin \alpha_{w_{o_{ih}}} - \sin \alpha_{w_{r_k}}) + \sin \alpha_{r_k}; \\ \cos \alpha_{I_{ih}} \sin \beta_{I_{jh}} &= \mu (\cos \alpha_{w_{o_{ih}}} \sin \beta_{w_{o_{jh}}} - \cos \alpha_{w_{r_k}} \sin \beta_{w_{r_k}}) + \\ &+ \cos \alpha_{r_k} \sin \beta_{r_k}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\mu = \lambda_r / \lambda_{w_r}$ — отношение длин волн на этапах записи λ_{w_r} и считывания λ_r ; $(\alpha_{w_{r_k}}; \beta_{w_{o_{jh}}})$ и $(\alpha_{r_k}; \beta_{r_k})$ — угловые координаты опорного и считывающего пучков при записи и считывании k -й голограммы соответственно; $(\alpha_{w_{o_{ih}}}; \beta_{w_{o_{jh}}})$ — угловые координаты объектных пучков при записи k -й голограммы.

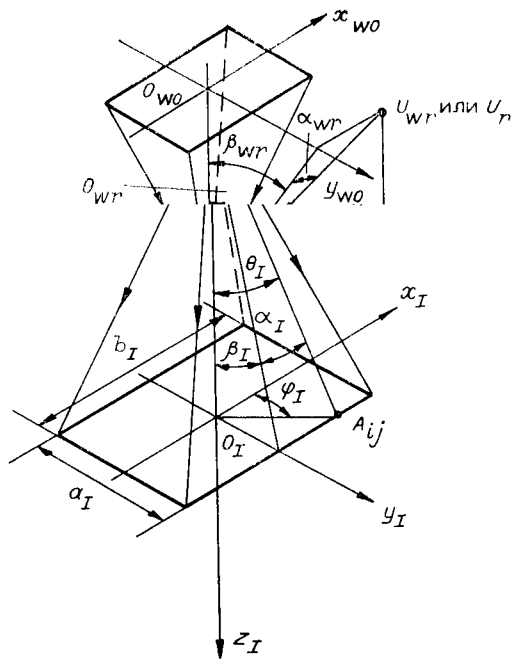


Рис. 1. Геометрическая интерпретация процесса записи и восстановления голограммы

Данная система уравнений позволяет рассчитать поле изотельной записи наложенных голограмм путем изменения несущей частоты голограммы и ее пространственной ориентации.

Условие пространственного разделения изображений в случае последовательного наложения голограмм путем изменения несущей пространственной частоты при $\beta_{wr} = \beta_r = 0$ и $\beta_I = \beta_{wo} = 0$ можно представить в виде

$$\alpha_{I_2} - \alpha_{I_1} \geq 2\theta_{I_1}^b, \quad (2)$$

где в соответствии с рис. 2 α_{I_1} и α_{I_2} — углы объектных пучков, формирующих центральные точки первого Θ_{I_1} и второго Θ_{I_2} восстанавливаемых изображений соответственно; $2\theta_{I_1}^b = \text{arctg } b/2z_I$ — угловой размер изображения со стороной b в направлении y ; z_I — расстояние между голограммой и изображением.

С учетом (1), (2) и знаков углов после преобразований получаем условие пространственного разделения изображений, т. е. требуемое изменение угла падения опорного пучка при переходе от одной голограммы к другой:

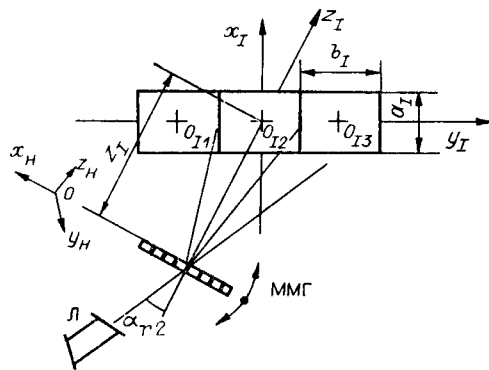


Рис. 2. Восстановление изображений с угловым кодированием наложенных записей

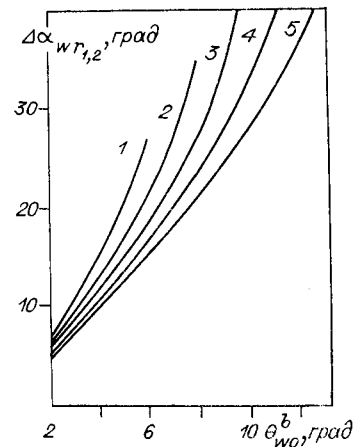


Рис. 3. Зависимости для определения условий пространственного разделения изображений при угловом кодировании:

1 — $\alpha_{wr1} = 50$; 2 — 45; 3 — 40; 4 — 35; 5 — 30°

$$2 \arcsin [\mu (\sin \alpha_{wr_2} + \sin \alpha_{wo_2}) - \sin \alpha_{wr_2}] \geq \arcsin [\mu (\sin \alpha_{wr_2} + \sin \alpha_{wo_{max_2}}) - \sin \alpha_{wr_2}] + \arcsin [\mu (\sin \alpha_{wr_1} + \sin \alpha_{wo_{max_1}}) - \sin \alpha_{wr_2}]. \quad (3)$$

Здесь $\alpha_{wr_2} = \alpha_{r_2}$, $\alpha_{wo_{max_2}} = \alpha_{wo_2} + \Theta_{wo}^b$ и $\alpha_{wo_{max_1}} = \alpha_{wo_1} + \Theta_{wo}^b$, где $2\Theta_{wo}^b$ — угловой размер объектного пучка при записи голограммы; α_{wo_1} и α_{wo_2} — углы между нормалью голограммы и осями первого и второго записывающих объектных пучков. При $\mu = 1$, $\Theta_{wo}^b = \Theta_I^b$ и нормальном падении объектных пучков получаем из (3) условие пространственного разделения изображений

$$\Delta v = \frac{\sin \alpha_{wr_2}}{\lambda} - \frac{\sin \alpha_{wr_1}}{\lambda} \geq \frac{2 \sin \Theta_I}{\lambda}, \quad (4)$$

где Δv — величина, на которую отличаются несущие частоты второй v_2 и первой v_1 голограмм, откуда

$$\Delta \alpha_{wr_2,1} = \alpha_{wr_2} - \alpha_{wr_1} \geq \arcsin (\sin \alpha_{wr_1} + 2 \sin \Theta_{wo}^b) - \alpha_{wr_1}. \quad (5)$$

Графики зависимости $\Delta \alpha_{wr} = f(\Theta_{wo}^b)$ представлены на рис. 3, откуда видно, что в ГЗУ для высокоинформативных документальных изображений при использовании светосильных объективов записи, обеспечивающих параметр $\Theta_{wo}^b \geq 10^\circ$ (например, объективы типа «Гелиос-40» или ОКП-2—85), наложенная запись с изменением несущей пространственной частоты нереализуема. С уменьшением параметра Θ_{wo}^b количество возможных наложений растет. Например, при $\Theta_{wo}^b = 5^\circ$ и $\alpha_{wr_1} = 30^\circ$ по графику на рис. 3 имеем $\Delta \alpha_{wr_1} = 12,5^\circ$. Следовательно, $\alpha_{wr_2} = \alpha_{wr_1} + \Delta \alpha_{wr_1} = 42,5^\circ$, при котором $\Delta \alpha_{wr_2} = 16^\circ$. Использование очередного значения угла падения опорного пучка $\alpha_{wr_3} = 58,5^\circ$ оказывается под сомнением в силу существенных энергетических потерь за счет отражения от регистрирующей среды.

Согласно рис. 1 справедливы следующие угловые соотношения:

$$\sin \alpha = \sin \Theta \cos \varphi, \quad \cos \alpha \sin \beta = \sin \Theta \sin \varphi.$$

Следовательно, систему уравнений (1) в сферических координатах можно представить в виде

$$\sin \Theta_{I_{ik}} \cos \varphi_{I_{jk}} = \mu (\sin \Theta_{wo_{ik}} \cos \varphi_{wo_{jk}} - \sin \Theta_{wr_k} \cos \varphi_{wr_k}) + \sin \Theta_{r_k} \cos \varphi_{r_k}; \quad (6)$$

$$\sin \Theta_{I_{ik}} \sin \varphi_{I_{jk}} = \mu (\sin \Theta_{wo_{ik}} \sin \varphi_{wo_{jk}} - \sin \Theta_{wr_k} \sin \varphi_{wr_k}) + \sin \Theta_{r_k} \sin \varphi_{r_k},$$

где $(\Theta_{wr_k}; \varphi_{wr_k})$ и $(\Theta_{r_k}; \varphi_{r_k})$ — угловые координаты опорного и считывающего пучков при записи и считывании k -й голограммы соответственно; $(\Theta_{wo_{ik}}; \varphi_{wo_{jk}})$ и $(\Theta_{I_{ik}}; \varphi_{I_{jk}})$ — угловые координаты, определяющие направления объектных пучков при записи и считывании k -й голограммы.

Данная система уравнений, моделирующая работу двумерной тонкой или толстой голограммы в непараксиальной области, позволяет получить условие пространственного разделения изображений при последовательном наложении голограмм путем изменения пространственной ориентации интерференционных плоскостей голограммы. Рассмотрим такие условия для двух наиболее рациональных с конструкторской точки зрения схем ГЗУ типа ЗД: с вращением регистрирующей среды вокруг нормали к ней и с дискретной разверткой опорного пучка вокруг объектного по образующей конуса.

Для обеих схем положение опорного пучка при записи первой и второй голограмм задается соответственно угловыми координатами

$(\Theta_{wr}; \varphi_{wr_1})$ и $(\Theta_{wr}, \varphi_{wr_2} = \varphi_{wr_1} + \Delta\varphi_{wr})$, где $\Delta\varphi_{wr}$ — угол поворота регистрирующей среды (РС) или опорного пучка против часовой стрелки. Восстановление голограммы производится при установке РС или опорного пучка в положение, соответствующее записи первой голограммы.

В этом случае система уравнений (6) для восстановления центральной точки второго изображения имеет вид

$$\begin{aligned}\sin \Theta_{I_2} \cos \varphi_{I_2} &= -\mu \sin \Theta_{wr} \cos (\varphi_{wr_1} + \Delta\varphi_{wr}) + \sin \Theta_{r_1} \cos \varphi_{r_1}; \\ \sin \Theta_{I_2} \sin \varphi_{I_2} &= -\mu \sin \Theta_{wr} \sin (\varphi_{wr_1} + \Delta\varphi_{wr}) + \sin \Theta_{r_1} \sin \varphi_{r_1}.\end{aligned}\quad (7)$$

При выполнении условия восстановления изображений с минимальными искажениями типа дисторсии

$$\begin{aligned}\sin \Theta_r \cos \varphi_r &= \mu \sin \Theta_{wr} \cos \varphi_{wr}; \\ \sin \Theta_r \sin \varphi_r &= \mu \sin \Theta_{wr} \sin \varphi_{wr}\end{aligned}$$

после простых преобразований из (7) получаем зависимость между углом поворота РС или опорного пучка при записи голограмм и азимутальным углом центральной точки второго восстановленного изображения

$$\Delta\varphi_{wr} = (2m + 1)\pi - 2(\varphi_{I_2} - \varphi_{I_1}), \quad (8)$$

где $0 \leq \varphi_{I_2} \leq 2\pi$; $0 \leq \varphi_{wr_1} \leq 2\pi$; $m = 0, 1$. Отметим, что выражение (8) справедливо и при $\mu = 1$.

Согласно рис. 4 и с учетом (8)

$$\Delta\varphi_{wr} = -2\Delta\varphi_{I_2}. \quad (9)$$

Здесь $\Delta\varphi_{I_2}$ — азимутальный угол центральной точки второго восстанавливаемого изображения, отсчитываемый от направления, нормального к направлению проекции считывающего пучка на плоскость изображения (рис. 4).

С учетом геометрии первой схемы параметр $\Delta\varphi_{I_2}$ определяется по следующему выражению:

$$\Delta\varphi_{I_2} = \arctg \left(\frac{\operatorname{tg} \Theta_r}{M_{y_{гг}} \operatorname{tg} \Theta_{wo}^a} - K_\Phi \right)^{-1}, \quad (10)$$

где $2\Theta_{wo}^a = 2 \arctg a/2z_{wo}$ — угловой размер изображения со стороной a в направлении x при записи; $K_\Phi = b/a$ — коэффициент формата изображения; $M_{y_{гг}} = \operatorname{tg} [\arcsin (\mu \sin \Theta_{wo}^a)] / \operatorname{tg} \Theta_{wo}^a$ — угловое увеличение при восстановлении изображений с минимальными дисторсионными искажениями; $\operatorname{tg} \Theta_r = \mu \sin \Theta_{wr} / \sqrt{1 - \mu^2 \sin^2 \Theta_{wr}}$.

Характер зависимостей $\Delta\varphi_{wr} = f(\Theta_{wo}^a)$, представленных на рис. 5, остается подобным графикам $\Delta\alpha_{wr} = f(\Theta_{wo}^b)$. Уменьшение коэффициента формата ($K_\Phi < 1$) вызывает уменьшение угла поворота РС и как следствие увеличение количества наложенных голограмм. Для аналогичного случая с приведенным выше примером $\Theta_{wr} = 30^\circ$, $\Theta_{wo}^a = 5^\circ$ и $K_\Phi = 0,71$ по графикам рис. 5 получаем $\Delta\varphi_{wr} \approx 20^\circ$. Таким образом, возможна запись $N = 2\pi/\Delta\varphi_{wr} = 18$ наложенных голограмм.

Согласно (7) для второй схемы с дискретной разверткой опорного пучка по образующей конуса также справедливо выражение (8).

Поскольку вращение считывающего пучка можно разложить по двум взаимно перпендикулярным направлениям x и y , положение восстанавливаемых изображений соответствует рис. 6. С учетом геометрии

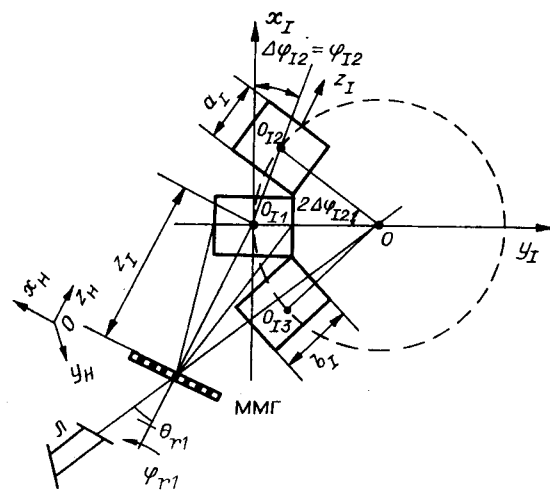


Рис. 4. Восстановление изображений с азимутальным кодированием наложенных записей при повороте РС

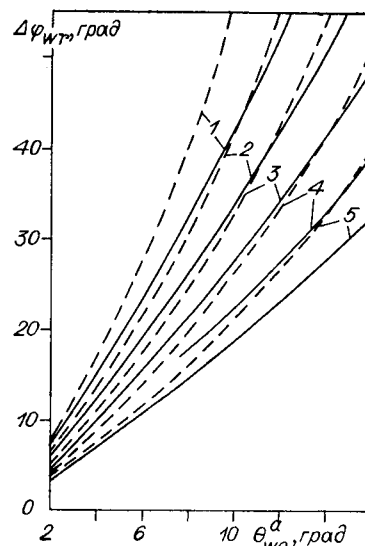


Рис. 5. Зависимости для определения условий пространственного разделения изображений при азимутальном кодировании и повороте РС:

сплошная линия — $K_\phi = 0,707$, штриховая — 1,414; 1 — $\theta_{wr} = 30$; 2 — 35; 3 — 40; 4 — 45; 5 — 50°

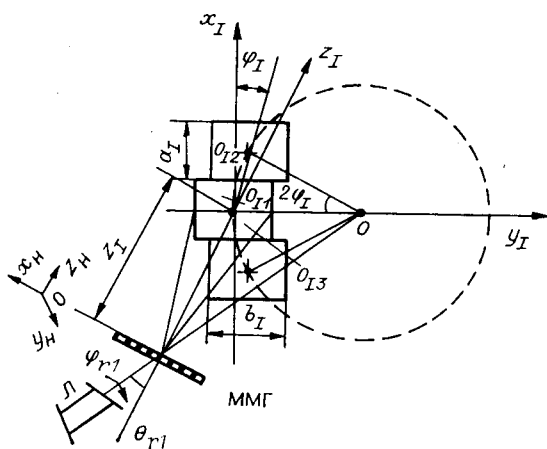
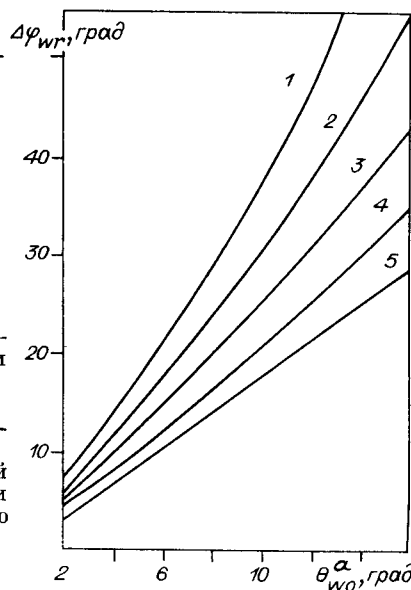


Рис. 6. Восстановление изображений с азимутальным кодированием наложенных записей при повороте опорного пучка

Рис. 7. Зависимости для определения условий пространственного разделения изображений при азимутальном кодировании и повороте опорного пучка:

1 — $\theta_{wr} = 30$; 2 — 35; 3 — 40; 4 — 45; 5 — 50°



взаимного положения изображений условие их пространственного разделения можно представить в виде

$$\Delta\varphi_{wr} = 2 \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{\operatorname{tg}^2 \theta_r}{4M_{y_{гд}} \operatorname{tg}^2 \theta_{w0}^\alpha} - 1} \right)^{-1}. \quad (11)$$

Анализ графиков на рис. 7, построенных по выражению (11), свидетельствует о незначительном уменьшении параметра $\Delta\varphi_{wr}$ по сравнению с вариантом азимутального кодирования наложенных голограмм путем вращения РС.

Заключение. На основе непараксиальной модели воспроизведения тонкой голограммы получены условия разделения изображений для трех

практических схем ГЗУ типа ЗД. Показано, что более высокой плотностью по критерию разделения изображений с наложенных соседних голограмм обладают схемы с дискретной разверткой опорного пучка вокруг объектного по образующей конуса и вращением регистрирующей среды вокруг нормали к ней. Вместе с тем целесообразность выбора конкретной схемы определяется не только критерием плотности записи. Здесь требуется дополнительно учитывать простоту и надежность конструкции ГЗУ, его ремонтпригодность, а также эффективность используемых методов развязки наложенных записей по шумовым составляющим [13].

ЛИТЕРАТУРА

1. Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings // The Bell Syst. Techn. J.—1969.— V. 48, N 9.— P. 2909—2947.
2. Микаэлян А. Л., Бобринев В. И., Соколова Л. З. Запись большого числа изображений методом наложения голограмм // ДАН СССР.—1970.— Т. 191, № 4.
3. Bolusset Ch., Treheux M. Systeme de stockage d'informations analogiques par superposition de reseaux optiques modules // Nouv. Rev. Optiq.—1974.— V. 5, N 6.— P. 333—342.
4. Акаев А. А., Майоров С. А. Когерентные оптические вычислительные машины.— Л.: Машиностроение, 1977.
5. Майоров С. А., Очин Е. Ф., Романов Ю. Ф., Тропченко А. Ю. Голографическое ЗУ с трехкоординатной выборкой на объемных фазовых голограммах // Приборостроение.—1980.— Т. 23, № 5.
6. Микаэлян А. Л. Радиооптические системы хранения и отображения информации на принципах голографии // Радиотехника.—1981.— № 11.
7. Денисюк Ю. Н. Голография и ее проблемы // Проблемы оптической голографии.— Л.: Наука, 1981.
8. Якимович А. П. Селективные свойства трехмерных голографических решеток сферических волновых фронтов // Опт. и спектр.—1979.— Т. 47, вып. 5.
9. Ярмош Н. А., Ероховец В. К., Кулик В. Я. Избирательные свойства объемно-ориентированных голограмм // Фундаментальные свойства оптической памяти и среда.— Киев: Вища шк., 1984.— Вып. 15.
10. Борискевич А. А., Дайлюденко В. Ф., Ероховец В. К., Ярмош Н. А. Ориентационная избирательность микроголограмм в ГЗУ типа ЗД // Тез. докл. V Всесоюз. конф. по голографии (Рига, 1985).— Рига: ИФ АН ЛатвССР, 1985.— Ч. II.
11. Зельдович Б. Я., Шкунов В. В., Яковлева Т. В. Теория объемных голограмм с наложенной записью // Проблемы оптической голографии.— Л.: Наука, 1981.
12. Якимович А. П. Дифракционная эффективность наложенных объемных фазовых голограмм // Оптическая голография.— Л.: Наука, 1983.
13. Борискевич А. А., Ероховец В. К., Ярмош Н. А. Координатно-азимутальная развязка наложенных записей в ГЗУ типа ЗД // Тез. докл. V Всесоюз. конф. по голографии (Рига, 1985).— Рига: ИФ АН ЛатвССР, 1985.— Ч. II.
14. Champagne E. B. Nonparaxial imaging, magnification and aberration properties in holography // JOSA.—1967.— V. 57, N 1.— P. 61—65.

Поступила в редакцию 22 октября 1986 г.

УДК 681.7.06+535.12

**М. А. ГОЛУБ, Н. Л. КАЗАНСКИЙ, И. Н. СИСАКЯН,
В. А. СОЙФЕР, С. И. ХАРИТОНОВ**

(Куйбышев — Москва)

ДИФРАКЦИОННЫЙ РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА, ФОКУСИРУЮЩЕГО В КОЛЬЦО

Недавно создан новый класс оптических элементов [1—3] на основе решения на ЭВМ обратной задачи фокусировки лазерного излучения. В рамках разработанного подхода фазовая функция фокусатора рассчитывается в приближении геометрической оптики и имеет весьма сложный вид. При этом актуальным является решение прямой задачи дифракции светового поля на синтезированном оптическом элементе.