

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 681.2 : 537.7 : 518.5

С. Б. Одиноков, М. В. Щербинин

(Москва)

**АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ УСТАНОВКИ КОДИРУЮЩЕЙ МАСКИ
В СХЕМАХ ПОЛУЧЕНИЯ ПЛОСКИХ ГОЛОГРАММ**

Проведен анализ схем получения голограмм с оптическим кодированием изображения. Исследованы процессы получения голограммы и восстановления изображения при его оптическом кодировании для голограмм Фурье и Френеля с кодовой маской в опорной и предметной ветвях, а также с кодовой маской в виде набора вторичных точечных источников, находящейся в опорной ветви. Изучено влияние погрешностей установки оптических элементов в схеме восстановления изображения на качество восстановленного изображения. Выбрана схема получения голограммы, и дана оценка отношения сигнал/шум в плоскости изображения. Проанализированы возможности применения мультиплицирования голограмм при оптическом кодировании изображения.

Введение. В последнее время для защиты товаров, ценных бумаг, документов, денежных знаков от подделок широко используются голограммы. На российском рынке с этой целью применяются, в основном, радужные голограммы, содержащие помимо изображения, наблюдаемого в естественных условиях (в белом свете), специальное скрытое изображение, которое можно заметить лишь при использовании когерентного источника с определенной длиной волны. Применение скрытого изображения защищает от подделки саму голограмму и повышает степень защиты товаров, ценных бумаг и т. д. Но схемы получения голограмм со скрытым изображением довольно просты, и для специалиста в области голографии не составит труда определить схему записи голограммы по схеме восстановления, что позволит подделать такую голограмму. Появилась необходимость оптического кодирования изображения, восстановленного с голограммы, которое помогает завуалировать схему получения голограммы и резко увеличивает степень ее защиты.

Подход к решению данной задачи предложен в работе [1], которая содержит общие сведения по получению голограмм с кодовой маской. Один из частных случаев рассматриваемой задачи (получение плоских голограмм с протяженным опорным источником) проанализирован в [2], где при помощи теории дифракции рассмотрены особенности формирования изображения голограммами с оптическим кодированием изображения (кодовая маска в виде диффузного рассеивателя находится в опорной ветви) и описаны результаты экспериментального исследования таких голограмм.

В настоящей статье рассматриваются возможности оптического кодирования изображений для схем получения голограмм Фурье и Френеля с кодовой маской в опорной и предметной ветвях, определяются точностные пара-

метры схем с определенной кодовой маской, а также возможности мультиплицирования голограмм; проведен анализ отношения сигнал/шум для схемы Френеля с конкретной кодовой маской в опорной ветви.

1. Анализ возможностей оптического кодирования изображений.

Под оптическим кодированием изображения, восстановленного с голограммы, следует понимать следующее: при получении голограммы в опорную или предметную ветвь устанавливается специальная кодовая маска. Если на стадии восстановления изображения в схеме восстановления на том же самом месте, что и при получении голограммы, будет присутствовать точно такая же кодовая маска, то в плоскости изображения восстановится изображение объекта. В противном случае (при отсутствии в схеме восстановления кодовой маски) изображение будет сильно искажено и идентифицировать его невозможно.

Для анализа возможностей оптического кодирования изображений были выбраны наиболее распространенные схемы получения плоских голограмм [4–6]:

– схемы получения голограмм Фурье и Френеля с кодовой маской в предметной ветви;

– схемы получения голограмм Фурье и Френеля с кодовой маской в опорной ветви.

1.1. Схемы получения голограмм с кодовой маской в предметной ветви.

Схемы получения голограмм Фурье и Френеля с кодовой маской в предметной ветви представлены на рис. 1, *a, b*. Данные схемы имеют ряд особенностей: 1) для удобства анализа схемы получения голограммы и восстановления изображения совмещены; 2) схемы корректны для получения голограмм, работающих на отражение.

В силу симметричности исследуемых схем, их анализ будем проводить только по одной координате x . В качестве конечного результата должно быть получено распределение оптического сигнала в плоскости изображения, поэтому расчет будем вести с точностью до постоянных коэффициентов.

1.1.1. Схема получения голограммы Фурье. Для всех схем анализ выполним при помощи теории оптико-электронных систем в линейном приближении. Прохождение оптического сигнала через систему будем рассматривать последовательно до получения выражения, которое описывает распределение этого сигнала в плоскости изображения. Далее именно это выражение будет основой для построения выводов.

Пусть для получения голограммы используется объект с амплитудным пропусканием $t_{об}$ и кодовая маска с пропусканием $s_{км}$, которая выполняет функции кодирующего элемента. При этом кодовая маска располагается в непосредственной близости от объекта (на расстоянии 1–5 мм). Объектную волну обозначим $A_{об}$, опорную – $A_{оп}$, а восстанавливающую волну – $A_{вос}$. Объектная волна является плоской и падает по нормали к объекту, тогда как волны $A_{оп}$ ($A_{вос}$), также являясь плоскими, падают на регистрирующую среду (голограмму) под углом и образуют с оптической осью углы θ ($-\theta$).

Рассмотрим прохождение оптического сигнала через данную систему. Согласно [3] объектную волну в плоскости регистрирующей среды можно записать через фурье-образы коэффициентов пропускания кодовой маски и объекта:

$$A_{об}(x_r) = a_{об} \left\{ T_{об} \left(\frac{x_r}{\lambda f'} \right) \otimes S_{км} \left(\frac{x_r}{\lambda f'} \right) \right\}, \quad (1)$$

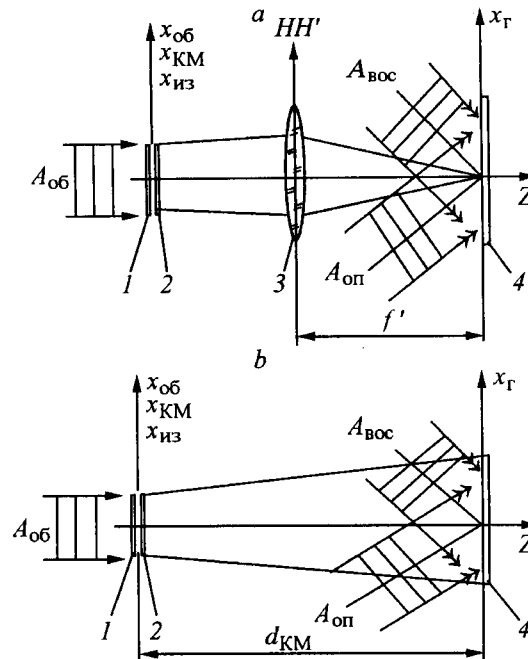


Рис. 1. Схемы получения и реконструкции голограмм Фурье (а) и Френеля (б) в случае, когда кодовая маска находится в предметной ветви: 1 – объект, 2 – кодовая маска, 3 – фурье-объектив, 4 – регистрирующий слой (голограмма), HH' – главные плоскости фурье-объектива

где $a_{об}$ – амплитуда плоской объектной волны; $T_{об}$, $S_{КМ}$ – фурье-образы коэффициентов пропускания объекта и кодовой маски; f' – фокусное расстояние фурье-объектива; λ – длина волны излучения при получении голограммы; \oplus – операция свертки; $x_г$ – линейная поперечная координата в плоскости голограммы.

Распределение комплексных амплитуд оптического сигнала в плоскости регистрирующей среды при получении голограммы является результатом интерференции объектной и опорной волн. Поэтому амплитудный коэффициент пропускания голограммы определяется как

$$\tau(x_г) = |A_{об}(x_г)|^2 + |A_{оп}(x_г)|^2 + A_{об}^*(x_г)A_{оп}(x_г) + A_{об}(x_г)A_{оп}^*(x_г), \quad (2)$$

где индексом * обозначено комплексное сопряжение. В данном выражении за формирование действительного и мнимого изображений отвечают два члена, один из которых ($A_{об}^*(x_г)A_{оп}(x_г)$) и будет использоваться в дальнейших расчетах. С учетом этого найдем коэффициент амплитудного пропускания голограмм

$$\tau(x_г) = a_{об}a_{оп} \left\{ T_{об} \left(\frac{x_г}{\lambda f'} \right) \otimes S_{КМ} \left(\frac{x_г}{\lambda f'} \right) \right\} \exp \left[i2\pi \frac{\sin \theta}{\lambda} x_г \right], \quad (3)$$

где $a_{оп}$ – амплитуда плоской опорной волны.

Вычислим распределение комплексных амплитуд в плоскости изображения при восстановлении его с голограммы. Для этого голограмму необходи-

мо осветить плоской восстанавливающей волной, сопряженной опорной. Получим

$$A_{\Gamma}(x_{\Gamma}) = a_{об} a_{оп} a_{вос} \left\{ T_{об}^* \left(\frac{x_{\Gamma}}{\lambda f'} \right) \otimes S_{KM}^* \left(\frac{x_{\Gamma}}{\lambda f'} \right) \right\}, \quad (4)$$

где $a_{вос}$ – амплитуда восстанавливающей плоской волны.

В плоскости изображения распределение комплексных амплитуд оптического сигнала можно найти через преобразование Фурье [3]:

$$A_{из}(x_{из}) = a_{об} a_{оп} a_{вос} F \left\{ T_{об}^* \left(\frac{x_{\Gamma}}{\lambda f'} \right) \otimes S_{KM}^* \left(\frac{x_{\Gamma}}{\lambda f'} \right) \right\} s_{KM}(x_{из}), \quad (5)$$

где F – знак преобразования Фурье. Далее получим

$$A_{из}^{Fr}(x_{из}) = a_{об} a_{оп} a_{вос} t_{об}^* s_{KM}(x_{из}) s_{KM}^*(x_{из}). \quad (6)$$

Из выражения (6) для распределения оптического сигнала в плоскости изображения видно, что при данном положении кодовой маски можно сделать два противоречащих друг другу вывода: для успешной идентификации изображения необходимо, чтобы кодовая маска была фазовой, но, с другой стороны, при использовании фазовой кодовой маски не удастся закодировать изображение объекта, поскольку при вычислении интенсивности оптического сигнала фазовый коэффициент пропускания кодовой маски пропадет. Выходом из сложившегося положения может служить ввод между маской и объектом воздушного промежутка, обеспечивающего картину дифракции Френеля и свертку функции пропускания фазовой кодовой маски с функцией пропускания объекта, так как кодирование изображения объекта можно обеспечить при помощи любой интегральной линейной операции, используемой в оптике [3].

1.1.2. Схема получения голограммы Френеля. Данная схема анализируется по тому же алгоритму, что и схема Фурье. Конечной целью вычислений является получение распределения оптического сигнала в плоскости изображения. В отличие от предыдущего случая здесь при нахождении распределения комплексных амплитуд оптического сигнала используется приближение Френеля для дифракционного интеграла Рэлея – Зоммерфельда. Распределение оптического сигнала от объектной волны в плоскости голограммы можно выразить как [3]

$$A_{об}(x_{\Gamma}) = \{ a_{об} t_{об}(x_{об}) s_{KM}(x_{об}) \} \otimes \left\{ \frac{\exp(ikd_{об})}{i\lambda d_{об}} \exp \left(i\pi \frac{x_{\Gamma}^2}{\lambda d_{об}} \right) \right\}, \quad (7)$$

где $d_{об}$ – расстояние от объекта до голограммы, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

Принимая во внимание выражение (7) и используя ту же последовательность вычислений, что и для схемы Фурье, получим распределение комплексных амплитуд оптического сигнала в плоскости изображения для схемы Френеля (изображение является действительным):

$$A_{из}^{Fr}(x_{из}) = a_{об} a_{оп} a_{вос} t_{об}^* s_{KM}(x_{из}) s_{KM}^*(x_{из}), \quad (8)$$

которое полностью идентично выражению (6). Отсюда следует, что для схемы Френеля с кодовой маской в предметной ветви можно сделать те же самые выводы, что и для схемы Фурье. Прежде всего, это необходимость наличия в схеме именно фазовой кодовой маски и сложность эффективного оптического кодирования изображения.

1.2. *Схемы получения голограмм с кодовой маской в опорной ветви.* Такие схемы получения голограмм представлены на рис. 2, *a, b*. Последовательность вычислений для этих схем идентична таковой для схемы Фурье с кодовой маской в предметной ветви (выражения (1)–(6)), поэтому далее для каждой схемы будут приведены только конечные выражения и сделаны соответствующие выводы.

1.2.1. *Схема получения голограммы Фурье.* В этом случае распределение комплексных амплитуд оптического сигнала в плоскости изображения имеет вид

$$A_{\text{из}}^{\text{Fur}}(x_{\text{из}}) = a_{\text{об}} a_{\text{оп}} a_{\text{вос}} \exp\left(i \frac{\pi}{\lambda d_{\text{об}}} x_{\text{из}}^2\right) \times \left[t_{\text{об}}^*(x_{\text{из}}) \exp\left(-i 2\pi \frac{\sin \theta}{\lambda} x_{\text{из}}\right) \exp\left(-i \frac{\pi}{\lambda d_{\text{об}}} x_{\text{из}}^2\right) \right] \otimes \left[s_{\text{KM}}\left(-\frac{f'}{d_{\text{об}}} x_{\text{из}}\right) \otimes s_{\text{KM}}^*\left(-\frac{f'}{d_{\text{об}}} x_{\text{из}}\right) \right]. \quad (9)$$

Данное выражение показывает, что при наличии кодовой маски в опорной ветви выполняется условие успешного кодирования изображения, так как

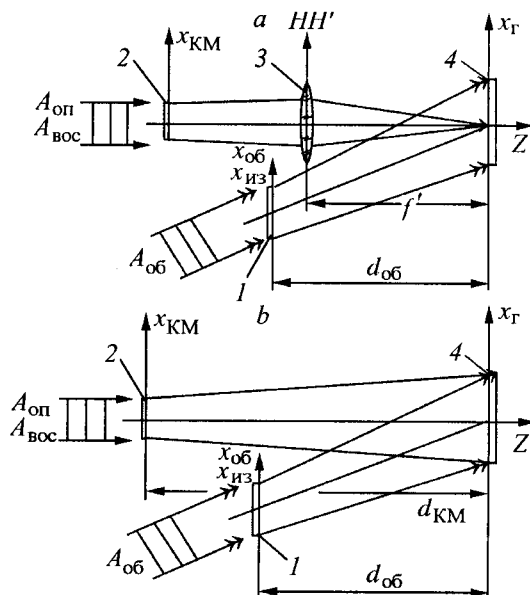


Рис. 2. Схемы получения и реконструкции голограмм Фурье (*a*) и Френеля (*b*) в случае, когда кодовая маска находится в опорной ветви: 1 – объект, 2 – кодовая маска, 3 – фурье-объектив, 4 – регистрирующий слой (голограмма), *HH'* – главные плоскости фурье-объектива

получена свертка функции пропускания объекта с выражением, содержащим функцию пропускания кодовой маски. Но при этом согласно [4] функция пропускания кодовой маски должна иметь довольно широкий пространственный спектр для хорошей идентификации изображений. Это объясняется тем, что функция пропускания объекта свертывается с функцией, представляющей собой свертку функций пропускания кодовой маски, которая для «раскодирования» изображения должна быть дельта-функцией Дирака, а она имеет бесконечно широкий пространственный спектр. Если это условие выполняется, то в плоскости изображения получим выражение

$$A_{\text{из}}^{\text{Fr}}(x_{\text{из}}) = a_{\text{об}} a_{\text{оп}} a_{\text{вос}} t_{\text{об}}^*(x_{\text{из}}) \exp\left(-i2\pi \frac{\sin\theta}{\lambda} x_{\text{из}}\right), \quad (10)$$

представляющее собой изображение объекта.

1.2.2. Схема получения голограммы Френеля. В данном случае распределение комплексных амплитуд оптического сигнала в плоскости изображения имеет вид

$$A_{\text{из}}^{\text{Fr}}(x_{\text{из}}) = a_{\text{об}} a_{\text{оп}} a_{\text{вос}} \exp\left(i \frac{\pi}{\lambda d_{\text{об}}} x_{\text{из}}^2\right) \times \left\{ t_{\text{об}}^*(x_{\text{из}}) \exp\left(-i2\pi \frac{\sin\theta}{\lambda} x_{\text{из}}\right) \exp\left(-i \frac{\pi}{\lambda d_{\text{об}}} x_{\text{из}}^2\right) \otimes [A_{\text{КМ}}(x_{\text{из}})] \right\}, \quad (11)$$

где

$$A_{\text{КМ}}(x_{\text{из}}) = \exp\left(-i \frac{\pi d_{\text{КМ}}}{\lambda d_{\text{об}}} x_{\text{из}}^2\right) \times \int_{-\infty}^{\infty} s_{\text{КМ}}\left(-\frac{d_{\text{КМ}}}{d_{\text{об}}} x'\right) s_{\text{КМ}}^*\left(\frac{d_{\text{КМ}}}{d_{\text{об}}} (x_{\text{из}} - x')\right) \exp\left(i2\pi \frac{d_{\text{КМ}}}{\lambda d_{\text{об}}^2} x_{\text{из}} x'\right) dx', \quad (12)$$

а $d_{\text{КМ}}$ – расстояние от кодовой маски до голограммы. Получено выражение, в котором происходит свертка функций пропускания объекта и кодовой маски. Поэтому все выводы, сделанные относительно предыдущей схемы, справедливы и для данной.

2. Схема получения голограмм с кодовой маской типа «точечный растр» в опорной ветви. В голографических системах на качество изображения сильно влияют поперечные сдвиги оптических элементов. Так, из наблюдения за фантомными изображениями известно, что для пропадания изображения достаточно сдвинуть диффузный восстанавливающий источник в поперечном направлении лишь на несколько десятков микрометров [4]. Поэтому анализ влияния поперечных сдвигов элементов схемы очень важен для практического применения.

Анализ проведем для схем с кодовой маской в опорной ветви, причем в качестве кодовой возьмем маску с точечными отверстиями, расположенными по ее апертуре на одинаковом расстоянии друг от друга. Пусть по координате x на диаметре кодовой маски D находится $2N$ отверстий, каждое отверстие при падении на него плоской опорной волны будет точечным источни-

ком с амплитудой A_n и фазой φ_n (в общем случае A_n и φ_n – случайные величины). Отверстия расположены друг относительно друга на расстоянии x_0 . Пропускание такой маски можно записать следующим образом:

$$s_{\text{KM}}(x) = \sum_{n=-N}^N A_n \exp(i\varphi_n) \delta(x - x_n), \quad (13)$$

где $\delta(x - x_n)$ – дельта-функция Дирака; $x_n = nx_0$ – координата, определяющая положение n -го точечного источника. Данная маска удовлетворяет условию широты пространственного спектра и может использоваться в качестве кодо-где ν_x – пространственная частота.

2.1. *Влияние поперечных сдвигов в схеме Фурье.* Обозначим сдвиг кодовой маски в направлении, перпендикулярном оптической оси, через c . Тогда выражение (13), определяющее пропускание маски, трансформируется следующим образом:

$$s_{\text{KM}}(x) = \sum_{n=-N}^N A_n \exp(i\varphi_n) \delta(x - x_n - c). \quad (15)$$

Подставляя (15) в (9) и считая, что начальные фазы всех точечных источников равны нулю, а их амплитуды единичны, получим распределение оптического сигнала в плоскости изображения при сдвиге кодовой маски:

$$A_{\text{из}}(x_{\text{из}}) = 2Na_{\text{об}}a_{\text{оп}}a_{\text{вос}}t_{\text{об}} \left(x_{\text{из}} - \frac{d_{\text{об}}c}{f'} \right) \exp(i\Phi) \exp(i\Psi(x_{\text{из}})), \quad (16)$$

где $\exp(i\Phi)$ – постоянный фазовый набег за счет сдвига кодовой маски, $\exp(i\Psi(x_{\text{из}}))$ – плоская волна.

Из выражения (16) видно, что сдвиг маски в схеме Фурье не ухудшает изображения, а приводит к его перемещению относительно начала координат на величину $d_{\text{об}}c/f'$. Физически это можно пояснить следующим образом. При поперечном сдвиге кодовой маски в плоскости голограммы, или в задней фокальной плоскости фурье-объектива (или в частотной плоскости) для опорной волны появляется постоянный фазовый набег, обусловленный этим сдвигом. При дифракции восстанавливающей волны на структуре голограммы и восстановлении изображения данный фазовый набег при помощи фурье-объектива превращается в линейный поперечный сдвиг с учетом преобразования координат при переходе в частотную и координатную области.

Проанализируем влияние поперечных сдвигов голограммы в этой же схеме. Если голограмму сдвинуть в направлении, перпендикулярном оптической оси на величину c , то аналогично предыдущему случаю (введя величину сдвига в выражение для коэффициента пропускания голограммы) полу-

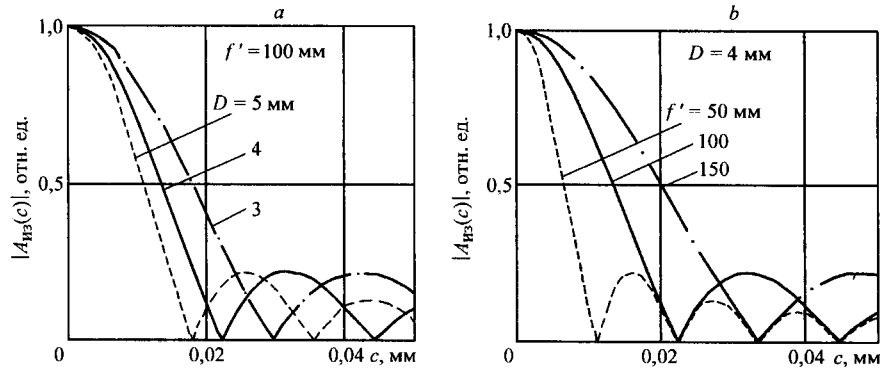


Рис. 3. Зависимость модуля амплитуды нормированного оптического сигнала от поперечного сдвига голограммы для схемы Фурье при различных диаметрах кодовой маски (а) и различных фокусных расстояниях фурие-объектива (b)

чим распределение комплексных амплитуд оптического сигнала в плоскости изображения:

$$A_{из}(x_{из}) = 2Na_{об}a_{оп}a_{вос}t_{об}(x_{из} - c) \exp\left[-i2\pi \frac{\sin\theta}{\lambda}(x_{из} - c)\right] \times \\ \times \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda f'}(N+1)x_0c\right] \sin c\left[\frac{\pi}{2\lambda f'}Dc\right]. \quad (17)$$

Из данного выражения видно, что распределение оптического сигнала в плоскости изображения связано с поперечным сдвигом голограммы c через функцию $\sin c(\pi Dc/2\lambda f')$. Поэтому максимальный поперечный сдвиг голограммы, при котором изображение полностью пропадет, составит

$$c_{max} = 2\lambda f'/D. \quad (18)$$

Зависимость нормированной амплитуды оптического сигнала в плоскости изображения от поперечного сдвига голограммы представлена на рис. 3, а, b для различных значений диаметра кодовой маски D и фокусных расстояний фурие-объектива f' . Видно, что максимальный поперечный сдвиг лежит в пределах 10–30 мкм, что требует очень точной и сложной механики при практическом использовании данной схемы. Кроме того, предпочтение следует отдавать длиннофокусным объективам и кодовым маскам с малым диаметром.

2.2. Влияние поперечных сдвигов в схеме Френеля. Схема Френеля не предполагает использования каких-либо оптических элементов, поэтому для нее поперечные сдвиги голограммы и кодовой маски полностью эквивалентны. Пусть кодовая маска (голограмма) сдвинута относительно своего номинального положения на величину c . Тогда, подставляя (15) в (12), а (12) в (11), получим распределение комплексных амплитуд оптического сигнала в плоскости изображения при сдвинутой маске (голограмме):

$$A_{из}(x_{из}) = 2Na_{об}a_{оп}a_{вос}t_{об}\left(x_{из} - c \frac{d_{об}}{d_{км}}\right) \times$$

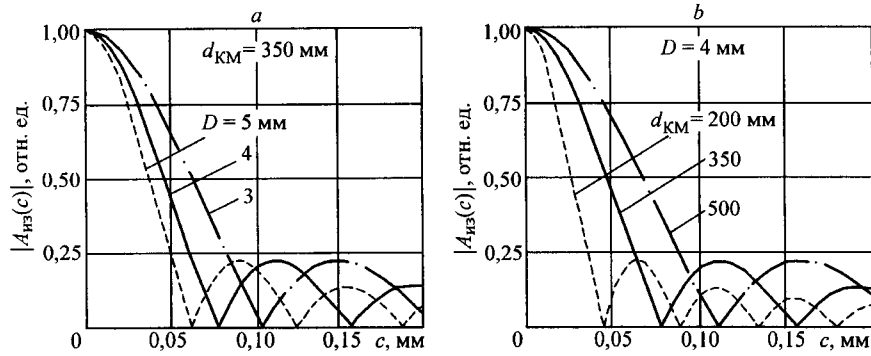


Рис. 4. Зависимость модуля амплитуды нормированного оптического сигнала от поперечного сдвига голограммы для схемы Френеля при различных диаметрах кодовой маски (а) и различных расстояниях от голограммы до кодовой маски (б)

$$\times \exp \left[-i2\pi \frac{\sin \theta}{\lambda} \left(x_{\text{из}} - \frac{c}{d_{\text{КМ}}} \right) \right] \exp \left[i \frac{\pi}{\lambda d_{\text{КМ}}} (N+1)x_0 c \right] \sin c \left[\frac{\pi}{2\lambda d_{\text{КМ}}} Dc \right]. \quad (19)$$

Выражение (19) показывает, что результат для схемы Френеля аналогичен результату для схемы Фурье с поперечным сдвигом голограммы с тем лишь отличием, что в данном случае в формуле фигурирует не фокусное расстояние фурье-объектива, а расстояние от кодовой маски до голограммы. Поэтому максимальный поперечный сдвиг маски (голограммы), при котором изображение полностью пропадет, для схемы Френеля составит

$$c_{\text{max}} = 2\lambda d_{\text{КМ}} / D. \quad (20)$$

Зависимость нормированной амплитуды оптического сигнала в плоскости изображения от поперечного сдвига кодовой маски (голограммы) приведена на рис. 4, а, б. Видно, что при изменении диаметра маски от 3 до 5 мм и изменении расстояния от голограммы до кодовой маски от 200 до 500 мм максимальный поперечный сдвиг лежит в пределах 50–100 мкм. При максимально возможных габаритах схемы данные значения более удобны с практической точки зрения, чем в схеме Фурье. Кроме того, для увеличения допуска на поперечную установку кодовой маски и голограммы в схему восстановления изображения необходимо увеличивать расстояние от маски до голограммы и уменьшать диаметр кодовой маски.

2.3. Влияние изменения угла падения восстанавливающей волны. До этого момента рассматривался идеальный случай восстановления изображения: угол падения опорного пучка равен по абсолютной величине углу падения восстанавливающего пучка на голограмму. Но в реальной системе данные углы будут отличаться и при определенной разнице этих углов изображение пропадет. Пусть угол падения опорного пучка отличается от угла падения восстанавливающего пучка на голограмму на величину $\Delta\theta$. Тогда для схемы Френеля восстанавливающую волну в плоскости кодовой маски можно записать так:

$$Ac(x_{\text{КМ}}) = a_{\text{оп}} \exp \left(i2\pi \frac{\sin \Delta\theta}{\lambda} x_{\text{КМ}} \right) \sum_{n=-N}^N \delta(x_{\text{КМ}} - x_n). \quad (21)$$

Выражение (21) позволяет получить следующее распределение комплексных амплитуд оптического сигнала в плоскости изображения:

$$A_{из}(x_{из}) = 2Na_{об}a_{оп}a_{вос}t_{об}(x_{из}) \exp\left[-i2\pi \frac{\sin\theta}{\lambda}(x_{из})\right] \times \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda}(N+1)x_0 \sin(\Delta\theta)\right] \operatorname{sinc}\left[\frac{\pi}{2\lambda}D \sin(\Delta\theta)\right]. \quad (22)$$

Зависимость модуля нормированного оптического сигнала от $\Delta\theta$ приведена на рис. 5. Как видно из рисунка, на угловое положение восстанавливающего пучка накладываются довольно жесткие требования, поскольку изображение пропадает при $\Delta\theta = 1,2'$. Поэтому при практической реализации схем с оптическим кодированием изображений следует ввести возможность регулировки углового положения восстанавливающего пучка и его контроль за качеством восстановленного изображения.

3. Анализ отношения сигнал/шум при мультиплицировании голограмм. Для увеличения степени защиты голограммы от подделки предлагается использовать мультиплицирование голограмм, при котором на один носитель записывают несколько голограмм при различных заданных поперечных положениях кодовой маски. Тогда на стадии восстановления изображения на каждое текущее положение маски откликнется своя голограмма и восстановится соответствующее изображение. Недостатком такой технологии получения голограмм является то, что при текущем положении кодовой маски для одной из голограмм на восстанавливающую волну откликаются все полученные на носителе голограммы, которые создают дополнительный аддитивный шумовой фон в плоскости изображения. Кроме того, наличие кодовой маски в схемах получения голограммы и восстановления изображения приведет к наличию еще одной аддитивной шумовой составляющей в этой же плоскости. Все это может привести к тому, что изображение «утонет» на фоне шумов и его будет невозможно идентифицировать. В связи с этим важным становится анализ отношения сигнал/шум.

Анализ проведем для схемы Френеля с кодовой маской в виде набора регулярно расположенных точечных отверстий в опорной ветви. В [4] дан подход к оценке шумов в данном случае. Он заключается в том, что рассматривается отношение освещенностей в плоскости изображения, создаваемых шумовой и сигнальной составляющими.

Этот способ оценки шумов удобен, так как выражения, описывающие сигнальную и шумовую составляющие, довольно громоздки и трудно поддаются анализу. Заметим также, что мы рассматриваем идеальную среду для регистрации голо-

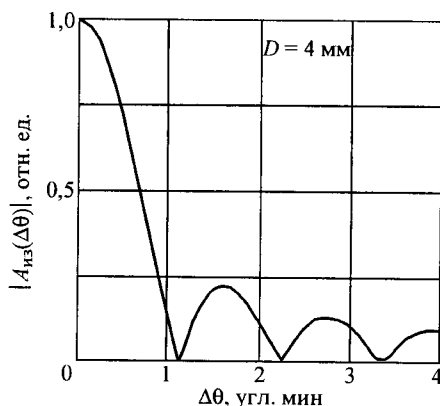


Рис. 5. Зависимость модуля амплитуды нормированного оптического сигнала от изменения угла падения восстанавливающей волны на голограмму для схемы Френеля

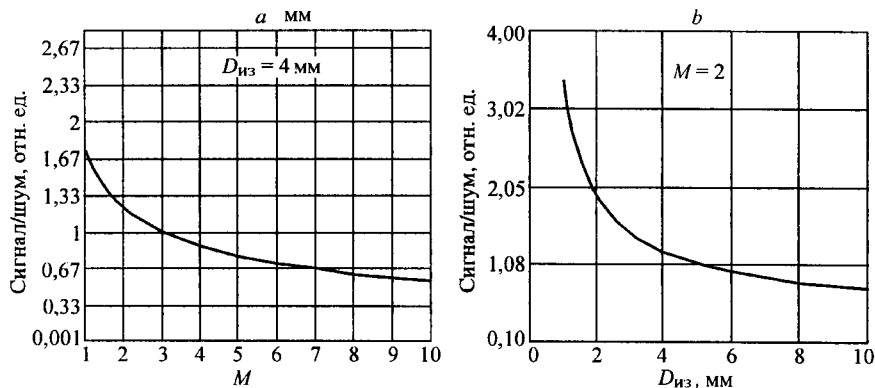


Рис. 6. Зависимость отношения сигнал/шум от количества мультиплицированных голограмм на одном носителе (а) и диаметра изображения (б) для схемы Френеля: $d_{об} = 60$, $D_{КМ} = 350$, $D = 4$ мм

граммы, т. е. она не имеет зернистости фотослоя, нелинейности и других шумовых составляющих.

Пусть на одном носителе было получено M голограмм при M различных положениях кодовой маски. Тогда согласно [4, с. 464] отношение сигнал/шум в плоскости голограммы при восстановлении одного из изображений определяется как

$$\mu_{г} = 1/M. \quad (23)$$

Отношение сигнал/шум в плоскости изображения вычисляется следующим образом:

$$\mu_{из} = \frac{1}{M} \frac{\rho_c}{\rho_{ш}}, \quad (24)$$

где ρ_c – отношение освещенности в пятне восстановленного изображения к освещенности, соответствующей сигнальной составляющей в плоскости голограммы; $\rho_{ш}$ – отношение освещенности в пятне шума плоскости изображения к освещенности, соответствующей шумовой составляющей в плоскости голограммы.

В соответствии с тем, что отношение освещенностей можно определить через обратное отношение соответствующих площадей, получим

$$\rho_c = D_{г}^2 / D_{из}^2, \quad (25)$$

$$\rho_{ш} = D_{г}^2 / \left(D_{из} + 2D \frac{d_{об}}{d_{КМ}} \right)^2, \quad (26)$$

где $D_{г}$ – диаметр голограммы, $D_{из}$ – диаметр изображения. Подставляя (25), (26) в (24) и учитывая когерентность излучения [4], получим отношение сигнал/шум в плоскости изображения при использовании мультиплицирования голограмм:

$$\mu_{из} = \frac{1}{\sqrt{2M}} \left[1 + 2 \frac{d_{об} D}{d_{КМ} D_{из}} \right]. \quad (27)$$

На рис. 6, *a, b* представлены зависимости отношения сигнал/шум от количества мультиплицированных голограмм и диаметра изображения объекта. Из рисунка и выражения (27) видно, что для увеличения отношения сигнал/шум необходимо увеличивать диаметр кодовой маски и расстояние от объекта до регистрирующего материала, а также уменьшать диаметр изображения и расстояние от маски до регистрирующего материала, что противоречит условиям увеличения возможного допуска взаимного поперечного положения голограммы и кодовой маски, представленным в п. 2.2. Кроме того, видно, что при данных условиях можно получать только две голограммы на одном носителе, поскольку отношение сигнал/шум больше единицы лишь для этого случая.

Заключение. Проведен анализ схем получения голограмм с оптическим кодированием изображения. Показано, что для эффективного кодирования изображения необходимо осуществить свертку функций пропускания объекта и кодовой маски, которая должна иметь широкий пространственный спектр.

Установлено, что в схемах, реализующих такое кодирование изображения, точность взаимного поперечного позиционирования элементов лежит в пределах десятков микрометров, а рассогласование углового положения восстанавливающего пучка с опорным пучком не должно превышать одной угловой минуты.

Анализ возможности мультиплицирования голограмм для увеличения степени их защиты от подделки показал, что при удовлетворительном значении отношения сигнал/шум на одном носителе можно записать только две голограммы. Существенную роль для значения отношения сигнал/шум играет подбор таких параметров схемы, как диаметр кодовой маски, расстояние от голограммы до маски, диаметр изображения объекта и расстояние от него до регистрирующей среды. Оптимальной можно считать схему, например, со следующими параметрами: $D = 4$, $D_{из} = 4$, $d_{ос} = 60$, $d_{км} = 350$ мм, при которых отношение сигнал/шум принимает значение 1,2. На практике такое отношение сигнал/шум используется редко, но для его повышения необходимо резко увеличить продольные габариты схемы считывания и уменьшить ее поперечные габариты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миказлян А. Л. Оптические методы в информатике. М.: Наука, 1990.
2. Гуланян Э. Х. Голограммы с протяженным источником опорного луча // Квантовая электрон. 1971. № 4. С. 58.
3. Мосягин Г. М., Немтинов В. Б., Лебедев Е. Н. Теория оптико-электронных систем. М.: Машиностроение, 1990.
4. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. М.: Мир, 1973.
5. Милер М. Голография. Л.: Машиностроение, 1979.
6. Сороко Л. М. Основы голографии и когерентной оптики. М.: Наука, 1971.

*Московский государственный
технический университет им. Н. Э. Баумана,
E-mail: odinokov@rl2.bmstu.ru*

*Поступила в редакцию
15 марта 2000 г.*