

УДК 681.7.013.8

Борискевич А. А., кандидат технических наук, доцент (БГУИР);**Ероховец В. К.**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник (ОИПИ НАН Беларуси);**Ткаченко В. В.**, кандидат технических наук, заведующий лабораторией (ОИПИ НАН Беларуси)**МОДЕЛЬ 3D И 2D/3D ГОЛОГРАММ**

Поставлена и решена задача – оценка ориентационной избирательности 3D голограмм по параметрам угловой, ортогональной и азимутальной чувствительности. Теоретически и экспериментально показаны возможности записи голограмм с 10-кратно повышенной удельной плотностью 2D/3D голограмм по сравнению с 2D голограммами при заданных требованиях к их избирательности.

The problem of estimating the 3D holograms orientation selectivity on the angular, orthogonal, and azimuthal sensitivity parameters is formulated and solved. Tenfold increase of density 3D, 2D/3D holograms in comparison with 2D holograms at there given selectivity is shown in theory and experimentally.

Введение. На современном этапе развития методов и средств голографической памяти центр тяжести исследований постепенно переносится в область использования потенциальных возможностей объемных регистрирующих сред для наложенной записи ряда документов с кодированной опорной волной света и свойств их угловой избирательности с целью существенного повышения плотности записи данных. Эти свойства проявляются в том, что считывающий пучок света дифрагирует на объемной голографической решетке в максимальной степени только при соблюдении условий Брэгга, отклонение от которых приводит к уменьшению дифракционной эффективности вплоть до нулевого значения. При описании чувствительности такого отклонения, как правило, основываются на работе Х. Когельника [1], где дается теория толстых одномерных голографических решеток в приближении двух связанных волн.

Однако одномерная модель толстой голографической решетки, образованная в результате записи интерференционной картины двух плоских волн, неадекватна реальным объемным голограммам при записи трехмерных волновых полей с конечными угловыми размерами [2–7]. Поэтому оценка селективных свойств 2D/3D и 3D голограмм, формируемых при защите документов комбинированием объемных и плоских изображений [8], требует последующих уточнений для моделей, полученных применительно к голографической памяти [9–12].

Основная часть. 1. Теоретическая модель. Пользуясь теорией Х. Когельника, для одномерной модели толстой голограммы с наклонными интерференционными плоскостями (рис. 1) находим выражение для определения угловой чувствительности, т. е. изменения угла падения считывающего пучка в среде, ведущего к падению дифракционной эффективности до нулевого уровня [1]:

$$\delta_{1C} = \frac{\lambda[\cos\theta'_{1C} - \cos\theta_{1C} - \cos(2\Phi + \theta_{1C})]}{\bar{n}T \sin 2(\Phi + \theta_{1C})}, \quad (1)$$

где $\lambda = \lambda_R = \lambda_W$ — длина волны записывающего и считывающего пучков света в воздухе; \bar{n} — средний показатель преломления регистрирующей среды; T — толщина голограммы; Φ — угол наклона интерференционных плоскостей голограммы; $\theta'_{1C} = \theta_{1C} - \delta_{1C}$ — угол падения считывающего пучка в среде, отличный от угла Брэгга θ_{1C} .

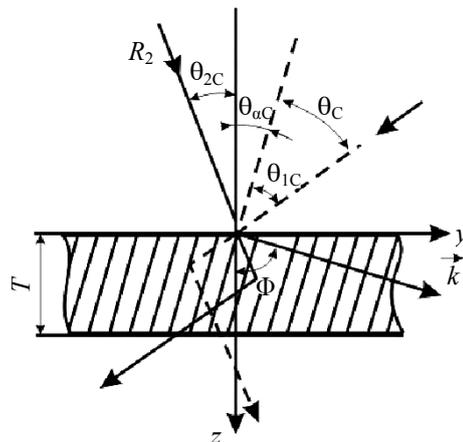


Рис. 1. Одномерная модель толстой голограммы

Учитывая связь углов Брэгга θ_{1C} и θ_{2C} соотношением

$$\Phi = \frac{\pi}{2} - \theta_{ac} = \frac{\pi}{2} - \frac{\theta_{1C} \mp \theta_{2C}}{2}, \quad (2)$$

выражение (1) перепишем в виде

$$\delta_{1C} = \frac{\lambda[\cos\theta'_{1C} - \cos\theta_{1C} - \cos\theta_{2C}]}{\bar{n}T \sin(\theta_{2C} \pm \theta_{1C})}. \quad (3)$$

Здесь θ_{ac} (2) — угол между интерференционной плоскостью голограммы и нормалью к ней, знак «–» в знаменателе (3) соответствует падению пучков R_1 и R_2 по разные стороны от оси Oz , а знак «+» — по одну сторону.

Для малых значений δ_{1C} , т. е. при $\theta \gg \delta_{1C}$ и $\cos\theta'_{1C} \approx \cos\theta_{1C}$, выражение (3) можно представить в виде

$$\delta_{1C} = \frac{\lambda \cos\theta_{2C}}{\bar{n}T \sin 2(\theta_{1C} \pm \theta_{2C})}, \quad (4)$$

с относительной погрешностью такого приближения:

$$\Delta = \frac{\cos\theta'_{1C} - \cos\theta_{1C}}{\cos\theta_{1C}}.$$

Для практических случаев голографической записи, например, при $\lambda = 0,63$ мкм, $T = 15$ мкм, $\bar{n} = 1,52$, $\theta_{2C} = 0^\circ$ и $\theta_{2B} \geq 30^\circ$ относительная погрешность $\Delta < 4,8\%$. При модуляции показателя преломления регистрирующей среды $n_1 \leq 10^{-2}$ с погрешностью не более 4% справедливо соотношение, связывающее угловые чувствительности голограммы для нулевого и заданного уровней падения дифракционной эффективности:

$$\delta_{1C}^{k_3} = \frac{\delta_{1C} k_3}{\pi},$$

где $k_3 \leq \pi$ — энергетический безразмерный параметр, задающий уровень падения дифракционной эффективности голограммы.

При замене θ_{1C} на θ_{2C} переходим к угловому отклонению считывающего пучка от второго угла Брэгга

$$\delta_{2C} = \frac{\lambda \cos\theta_{1C}}{\bar{n}T \sin 2(\theta_{2C} \mp \theta_{1C})} \quad (5)$$

и их отношению

$$\delta_{1C}/\delta_{2C} = \cos\theta_{2C}/\cos\theta_{1C}. \quad (6)$$

Для малых значений δ_{1C} , согласно закону преломления, угловая чувствительность для среды $\delta_{1C} = \theta'_{1C} - \theta_{1C}$ и воздуха $\delta_{1B} = \theta'_{1B} - \theta_{1B}$ связана соотношением

$$\delta_{1B} = \bar{n} \delta_{1C} \cos\theta_{1C}/\cos\theta_{1B}. \quad (7)$$

С учетом записи (7) и замены $\theta_{1C} \leftrightarrow \theta_{2C}$, $\theta_{1B} \leftrightarrow \theta_{2B}$ выражение (6) принимает вид

$$\delta_{1B}/\delta_{2B} = \cos\theta_{2B}/\cos\theta_{1B}.$$

Следовательно, большей угловой чувствительности толстой голограммы соответствует меньший угол Брэгга, причем с ростом угла наклона Φ интерференционных плоскостей голограммы увеличивается различие между δ_{1B} и δ_{2B} .

Для модели трехмерной пропускающей голограммы (рис. 2) найдем выражение, определяющее изменение угла падения считывающего пучка по двум взаимно перпендикулярным направлениям в плоскости γ , проходящей через

направления интерферирующих пучков при записи, и в плоскости β , проходящей через направление пучка при записи и перпендикулярной плоскости γ . Значение первой составляющей оценивается выражениями (4)–(7), а при отклонении направления считывающего пучка в плоскости β на Ψ_{\perp} изменяется угол между считывающим пучком и интерференционной плоскостью (рис. 2) по соотношению

$$\theta'_C = \arcsin(\sin\theta_C \cos\Psi_{\perp}) \quad (8)$$

при $\theta_C = 0,5(\theta_{1C} \pm \theta_{2C})$.

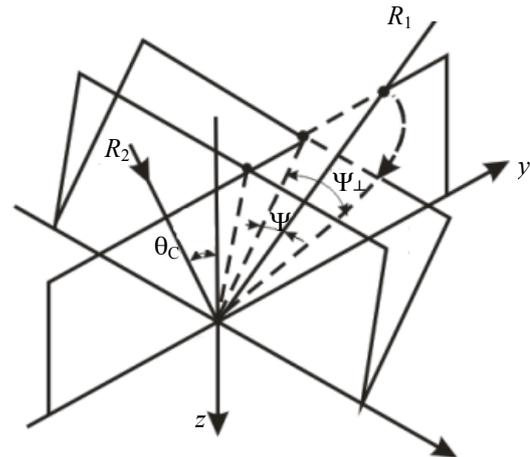


Рис. 2. Трехмерная модель толстой голограммы

Пренебрегая влиянием поворота плоскости поляризации считывающего пучка света на дифракционную эффективность голограммы при изменении его направления в плоскости β , получаем выражение для угловой чувствительности, ортогональной δ_{1C} :

$$\delta_{1C\perp} = \arccos \frac{\sin[0,5(\theta_{1C} \pm \theta_{2C}) - \delta_{1C}]}{\sin 0,5(\theta_{1C} \pm \theta_{2C})}. \quad (9)$$

С учетом закона преломления света аналогично определяется угловая ортогональная чувствительность голограммы в воздухе:

$$\delta_{1B\perp} = \arccos \left\{ \frac{\bar{n}}{C} [\sin(\theta_C - \delta_{1C}) \sin\theta_{1B} \cos\theta_{\alpha C} + \sin\theta_{\alpha C} \sqrt{\sin^2(\theta_C - \delta_{1C}) \cos^2\theta_{1B} + (\bar{n}^2 - 1)\bar{n}^{-2}C}] \right\} \quad (10)$$

при $\theta_C > \delta_{1C}$, где $C = \sin(\theta_{1B} - \theta_{\alpha C})$.

Любое сложное изменение направления считывающего пучка в пространстве можно разложить по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Если направление в плоскости y изменилось на угол Ψ , а в плоскости β — на угол Ψ_{\perp} , то угол между считывающим пучком и интерференционной плоскостью α , согласно зависимости (8), равен

$$\theta'_C = \arcsin[\sin(\theta_C - \Psi) \cos\Psi_{\perp}]. \quad (11)$$

При изменении направления считывающего пучка по конической поверхности, осью которой является ось объектного пучка при записи, углы Ψ и Ψ_{\perp} выражаются через азимутальный угол φ следующим образом:

$$\Psi = 2\theta_C - \text{arccotg}(\text{tg}2\theta_C \cos\varphi); \quad (12)$$

$$\Psi_{\perp} = \arccos(\cos\theta_C \sqrt{1 + \text{tg}^2 2\theta_C \cos^2 \varphi}). \quad (13)$$

Подставив формулы (12) и (13) в выражение (11), получим

$$\theta'_C = \arcsin[(\text{tg}2\theta_C \cos\varphi \cos\theta_C - \sin\theta_C) \cos 2\theta_C]. \quad (14)$$

Выражая из формулы (14) угол φ и полагая $\theta'_C = \theta_C - \delta_C$, находим запись азимутальной чувствительности голограммы:

$$\delta_{\varphi} = \arccos \frac{\sin(\theta_C - \delta_{1C}) + \sin\theta_C \cos 2\theta_C}{\cos\theta_C \sin 2\theta_C} \quad (15)$$

при $\theta_C > \delta_{1C}$. После преобразований выражения (15) получаем

$$\delta_{\varphi} = \arccos \left(1 - \frac{\delta_{1C}}{2 \sin 2\theta_C} \right). \quad (16)$$

Для практических угловых параметров объектного пучка (рис. 2) при использовании фотопластин ЛОИ-2-633 избирательность 3D голограммы повышается с уменьшением углового размера $2\theta_{2B}$, его смещением в отрицательную область значений $2\theta_{2B}$ и увеличением угла считывания θ_B (рис. 3, 4), угловая чувствительность δ_{1B} в 3–5 раз больше ортогональной $\delta_{1B\perp}$ и азимутальной δ_{φ} . При сопоставлении двух последних отличия несущественны, поскольку азимутальная чувствительность δ_{φ} лишь на 2–3° выше ортогональной $\delta_{1B\perp}$. Это хорошо согласуется с выводами работы [12] о том, что селективные свойства 3D голограммы в направлении, параллельном интерференционным плоскостям, весьма малы.

Оценим влияние различия длин волн светового излучения на этапах записи и воспроизведения на ориентационную избирательность 3D голограмм. При изменении длины волны считывающего пучка $\lambda = \lambda \pm \Delta\lambda$, согласно закону Брэгга, максимальная дифракционная эффективность голограммы наблюдается при освещении ее не под углом θ_C , а под новым углом $\theta''_C = \theta_C \pm \delta_{\lambda}$, если $\Delta\lambda/\lambda_{\text{пр}} \ll 1$.

Таким образом, из закона Брэгга следует, что при $|\mu - 1| \leq 1$

$$\delta_{\lambda} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\text{пр}}} \text{tg}\theta_C = |\mu - 1| \text{tg}\theta_C,$$

где $\mu = \lambda_R/\lambda_{\text{пр}}$, δ_{λ} – угловое отклонение считывающего пучка от угла θ_C при изменении длины волны.

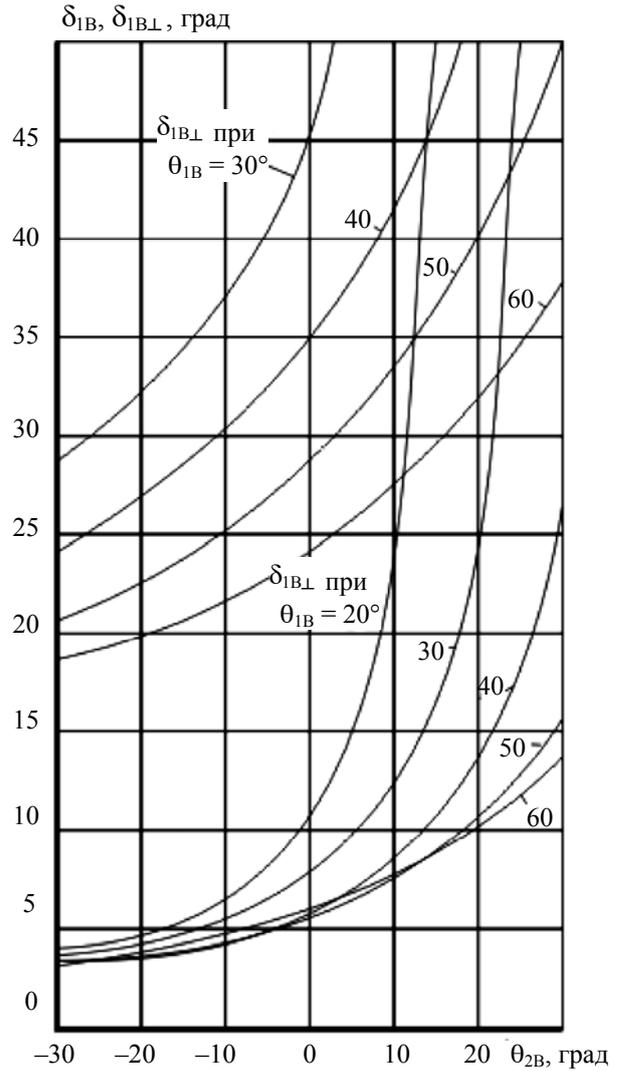


Рис. 3. Зависимости угловой δ_{1B} и ортогональной $\delta_{1B\perp}$ чувствительностей 3D голограммы:
 $T = 12 \text{ мкм}, \lambda = 0,63 \text{ мкм}, \bar{n} = 1,52$

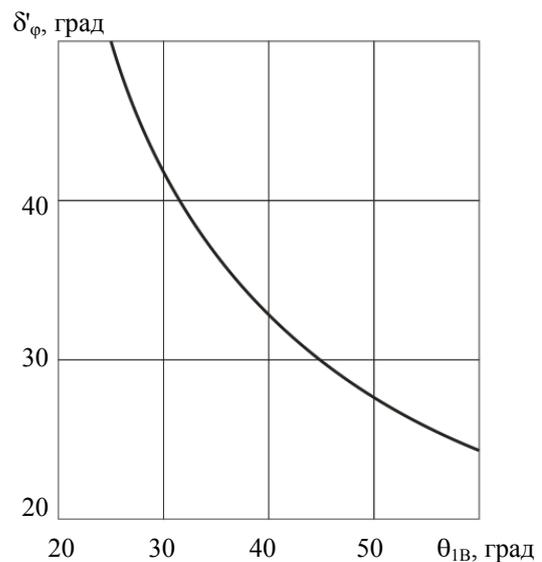


Рис. 4. Зависимость азимутальной чувствительности от угла считывания 3D голограммы:
 $T = 15 \text{ мкм}, \lambda = 0,63 \text{ мкм}, \theta_{2B} = 0^\circ$

Два новых угла Брэгга, которыми будет характеризоваться 3D голограмма, имеют вид

$$\theta'_{1C} = \theta''_C - \theta_{\alpha C} = \theta_{1C} \pm \delta_\lambda;$$

$$\theta'_{2C} = \theta''_C + \theta_{\alpha C} = \theta_{2C} \pm \delta_\lambda,$$

где верхний и нижний знаки соответствуют $\mu > 1$ и $\mu < 1$.

С учетом новых брэгговских параметров θ'_{1C} , θ''_C , λ_R и при $\theta_C = 0,5(\theta_{1C} + \theta_{2C})$ выражения (4), (5), (7), (10) и (16) перепишем соответственно в виде

$$\delta'_{1C} = \frac{\mu \lambda_W \cos(\theta_{2C} \pm \delta_\lambda)}{\bar{n} T \sin(\theta_{1C} + \theta_{2C} \pm 2\delta_\lambda)};$$

$$\delta'_{2C} = \frac{\mu \lambda_W \cos(\theta_{1C} \pm \delta_\lambda)}{\bar{n} T \sin(\theta_{1C} + \theta_{2C} \pm 2\delta_\lambda)};$$

$$\delta'_{1B} = \frac{\bar{n} \delta'_{1C} (\theta_{1C} \pm \delta_\lambda)}{\cos \theta_{1B}};$$

$$\delta_{1B \perp} = \arccos \left\{ \frac{\bar{n}}{C'} [\sin(\theta_C \pm \delta_\lambda - \delta'_{1C}) \sin \theta_{1B} \cos \theta_{\alpha C} + \sin \theta_{\alpha C} \sqrt{\sin^2(\theta_C \pm \delta_\lambda - \delta'_{1C}) \cos^2 \theta_{1B} + (\bar{n}^2 - 1) \bar{n}^{-2} C'}] \right\},$$

$$\text{где } \delta'_\varphi = \arccos \left(1 - \frac{\delta_{1C}}{\sin 2(\theta_C + \delta_\lambda)} \right);$$

$$C' = \sin(\theta'_{1B} - \theta_{\alpha B}) \sin(\theta'_{1B} + \theta_{\alpha B});$$

$$\theta'_{1B} = \arcsin[\bar{n} \sin(\theta_{1C} \pm \delta_\lambda)].$$

С ростом параметра μ угловая чувствительность δ'_{1B} должна уменьшаться, а азимутальная чувствительность δ'_φ должна увеличиваться.

Экспериментальные исследования. Для экспериментального изучения ориентационных свойств 2D и 3D голограмм создан комплекс конструкторско-технологических установок (рис. 5).



Рис. 5. Фотография установки для исследования 2D и 3D голограмм

В качестве примера на рис. 6 приведено семейство графиков нормированных кривых дифракционной эффективности $\eta/\eta_0 = f(\theta_{2B})$ при экспериментальном исследовании угловой чувствительности фотопластин ЛОИ-2-633, полученных при $\lambda = 0,63$ мкм, $\theta_{2B} = 0^\circ$ и с изменением угла θ_{2B} от 10 до 60°. Значение $\theta_{1B} = 0^\circ$ выбрано с точки зрения применения наиболее простых схем с нормальным падением объектного пучка на регистрирующую среду.

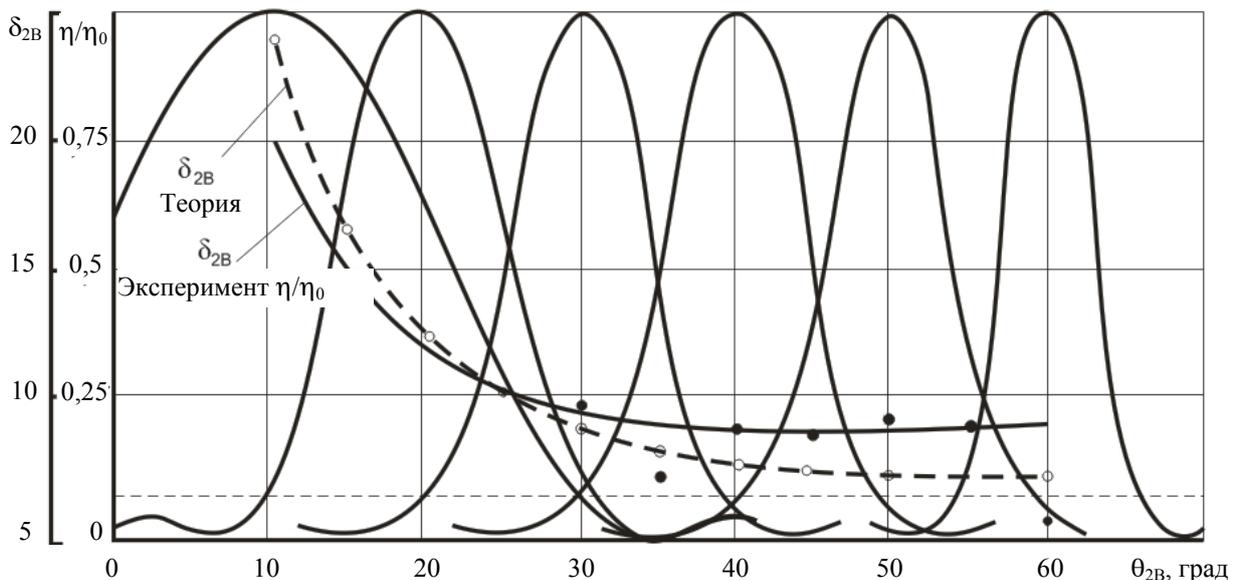


Рис. 6. Семейство графиков, характеризующих угловую чувствительность трехмерных голограмм на фотопластине ЛОИ-2-633 при $\theta_{1B} = 0^\circ$ и $\lambda = 0,63$ мкм

Нижнее значение $\theta_{2B} = 10^\circ$ обусловлено конечной апертурой объектного канала, а верхнее — значительными потерями света на отражение от фотопластины при восстановлении. На основе семейства графиков $\eta/\eta_0 = f(\theta_{2B})$ там же представлены экспериментальная и расчетная зависимости угловой чувствительности $\delta_{2B} = f(\theta_{2B})$ по энергетическому уровню — 5%. Из графиков видно хорошее совпадение теории с экспериментом, где в области $\theta_{2B} = 30\text{--}60^\circ$ угловая чувствительность θ_{2B} остается приблизительно постоянной и равной 9° . Следовательно, в диапазоне рабочих углов записи $\Delta\theta_{2B} = 60\text{--}30^\circ$ на одном и том же участке среды можно записать $N_A = [\theta_{2B}/\delta_{2B}]$ независимых изображений с максимальным уровнем перекрестных помех $\sim 10\%$.

По аналогии с экспериментальным исследованием угловой чувствительности на рис. 7 приведены кривые азимутальной чувствительности $\eta/\eta_0 = f(\varphi)$ при постоянных значениях θ_{1B} и θ_{2B} . В силу симметричности исследуемых характеристик значения измерений и вычислений δ_φ показаны для диапазона $\varphi = 0\text{--}180^\circ$. Из анализа кривых следует, что с увеличением θ_{2B} значение δ_φ уменьшается, т. е. азимутальная избирательность улучшается.

Вместе с тем для серийно выпускаемых фотопластин типа ЛОИ-2-633 в практическом диапазоне θ_{2B} азимутальная избирательность оказывается в 3–5 раз меньше угловой. При столь низкой азимутальной избирательности предельное число наложенных голограмм определяется минимальным изменением азимутального угла $\Delta\varphi_{\min}$ от записи к записи, когда каждая из них при восстановлении не набегают на соседние. Если число наложенных записей при азимутальной развертке опорного пучка представить как $N_A = [2\pi/\Delta\varphi]$, то общее число наложенных записей в одной 3D голограмме определится выражением $N = N_A N_\varphi$.

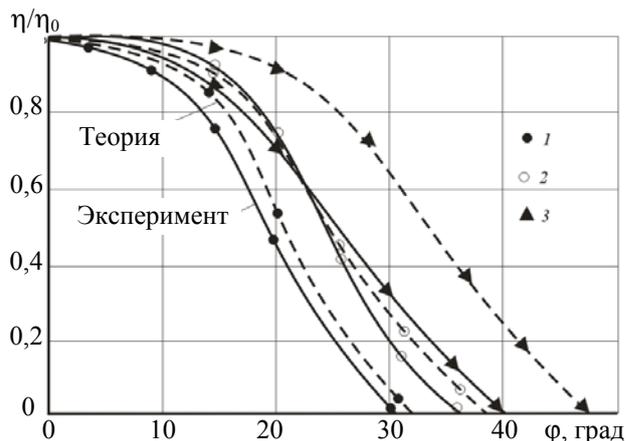


Рис. 7. Азимутальная чувствительность 3D голограммы на фотопластине ЛОИ-2-633 при $\theta_{1B} = 0^\circ$, $\lambda_W = \lambda_R = 0,63$ мкм и $\theta_{2B} = 50^\circ$ (1), 40° (2), 30° (3)

В качестве иллюстрации на рис. 8 приведена фотография в ближней зоне дифракции при воспроизведении нормально падающим пучком света на голограмму с $d_H = 3$ мм.

Заключение. 1. Поставлена и решена задача — оценка ориентационной избирательности 3D голограмм по параметрам угловой, ортогональной и азимутальной чувствительности.

2. Теоретически предполагаемые с использованием разработанных моделей 10-кратные преимущества в информационной емкости защитных 2D/3D голограмм по сравнению с 2D голограммами подтверждены экспериментально и обеспечиваются возможностью записи голограмм с большей удельной плотностью при заданных требованиях к их избирательности. При этом избирательность 2D/3D голограмм улучшается с увеличением угла считывания, а угловая чувствительность в 3–5 раз больше ортогональной и азимутальной чувствительностей.

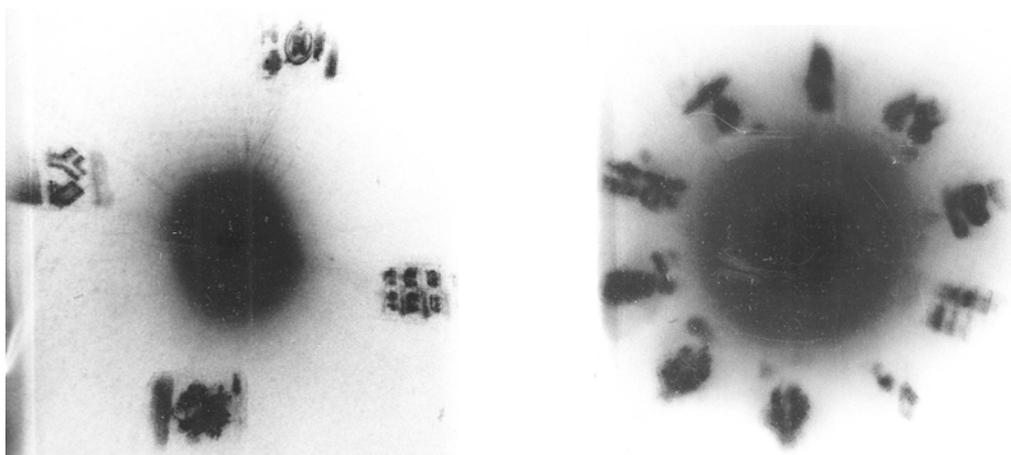


Рис. 8. Разделение 4 и 10 наложенных голографических записей из 2D/3D голограмм при восстановлении изображений в ближней зоне

Литература

1. Kogelnik, H. Couple Wave Theory for Thick Hologram Gratings / H. Kogelnik // The Bell System Technical Journal. — 1969. — No. 9. — P. 2909–2947.
2. Аристов, В. В. Свойства трехмерных голограмм / В. В. Аристов, В. Ш. Шехтман // Успехи физических наук. — 1971. — Т. 104, № 1. — С. 51–76.
3. Денисюк, Ю. Н. Некоторые проблемы и перспективы голографии в трехмерных средах / Ю. Н. Денисюк // Оптическая голография. — М.: Мир, 1982. — Т. 2. — С. 691–729.
4. Якимович, А. П. Селективные свойства трехмерных голографических решеток сферических волновых фронтов / А. П. Якимович // Оптика и спектроскопия. — 1979. — Т. 47, вып. 5. — С. 960.
5. Якимович, А. П. Многослойные объемные голографические решетки / А. П. Якимович // Оптика и спектроскопия. — 1980. — Т. 49, вып. 1. — С. 158–164.
6. Якимович, А. П. Дифракционная эффективность наложенных объемных фазовых голограмм / А. П. Якимович // Оптическая голография. — М.: Наука, 1983. — С. 100.
7. Зельдевич, Б. Я. Теория объемных голограмм с накопленной записью / Б. Я. Зельдевич, В. В. Шкунов, Т. В. Яковлева // Проблемы оптической голографии. — М.: Наука, 1981. — С. 80–97.
8. Танин, Л. В. Методы формирования комбинированных объемных и плоских изображений / Л. В. Танин, А. Д. Короленко // Голография ЭКСПО – 2004: материалы первого Междунар. форума, Москва, 19–22 окт. 2004 г. / ЗАО «ВДНХ – ЭКСПО». — М., 2004. — С. 28–29.
9. Твердохлеб, П. Е. Голографическая память: история и перспективы / П. Е. Твердохлеб, А. Ю. Беликов // Голография в России и за рубежом. Наука и практика: сб. тр. науч.-практ. конф. «Голография ЭКСПО–2007», Москва, 25–27 сент. 2007 г. / ООО «Голография-сервис». — М., 2007. — С. 26–28.
10. Пен, Е. Ф. Неоднородные и нестационарные брэгговские голограммы: модели и методы исследований / Е. Ф. Пен, М. Ю. Родионов // Автометрия. — 2005. — Т. 41, № 2. — С. 98–114.
11. Пен, Е. Ф. Выбор параметров наложенной записи в объемной голографической памяти / Е. Ф. Пен, В. М. Русаков // Голография. Наука и практика: сб. тр. 7-й Междунар. науч.-практ. конф. «ГОЛОЭКСПО – 2010», Москва, 28–30 сент. 2010 / ООО «Голография-сервис». — М., 2010. — С. 315–322.
12. Пен, Е. Ф. Экспериментальные исследования и моделирование многослойных неоднородных голограмм / Е. Ф. Пен, М. Ю. Родионов // Голография. Наука и практика: сб. тр. 7-й Междунар. науч.-практ. конф. «ГОЛОЭКСПО – 2010», Москва, 28–30 сент. 2010 г. / ООО «Голография-сервис». — М., 2010. — С. 323–329.

Поступила 05.05.2011