

Аккозов А.Д.

**ПОВЫШЕНИЕ ДИФРАКЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЧЕТЫРЕХФАЗОВЫХ
ФУРЬЕ-ГОЛОГРАММ НА ФАЗОВЫХ СРЕДАХ**

A.D. Akkuzov

**INCREASING OF A DIFFRACTION EFFICIENCY OF A FOUR PHASE DIGITAL
FOURIE-HOLOGRAM ON PHASE MEDIUMS**

УДК: 681.385

Предлагается метод повышения дифракционной эффективности цифровых четырехфазовых фурье-голограмм на фазовых средах, основанный на сужении динамического диапазона амплитуд фурье-спектра голографируемого объекта путем отсечки. Приводятся теоретическое обоснование предлагаемого метода и подтверждающие его результаты компьютерного моделирования.

The method of increasing of a diffraction efficiency of a four phase digital Fourier hologram on phase mediums based on narrowing of dynamic range of Fourier spectrum amplitude of the holographing object by the cutoff method is given. The theoretical reasoning of the given method and results of a computer simulation are considered.

Введение

Голограммы, записанные на фазовых средах как оптическими, так и цифровыми методами, являются более привлекательными по сравнению с голограммами, записанных на амплитудных средах. Это связано тем, что они обладают большей дифракционной эффективностью по сравнению с амплитудными голограммами. Среди цифровых методов записи особое место занимает киноформная запись. При этом методе полностью отбрасывается информация об распределении амплитуд регистрируемого светового поля и регистрируются лишь фазы отсчетов этого поля как распределение оптической толщины. Главным достоинством киноформа является его высокая дифракционная эффективность (~90%). Поэтому она восстанавливает очень яркое изображение. Но из-за того, что при синтезе киноформа полностью игнорируется амплитудная информация, это изображение, хоть и оно получается ярким, оказывается искаженным и зашумленным. Т.е. качество восстановленного изображения оказывается низким. Это является главным недостатком киноформа. Желание сохранить и амплитудную информацию при записи голограммы, чтобы снизить искажение восстановленного изображения, привело к появлению метода двухфазовой записи и их модификаций [1-5]. В предлагаемых в этих работах методы обеспечивают частичное или полное устранение недостатка, присущего к киноформам. При этом дифракционная эффективность для полезного порядка дифракции понижается примерно до 6%-15%. Иначе говоря, повышение качества восстановленного изображения достигается за счет понижения дифракционной эффективности, что является нежелательным. В работах [6, 7] нами был предложен способ повышения дифракционной эффективности двухфазовых голограмм и было показано, что применение его для голограмм, синтезированных методами, приведенными в работах [3,5] дает положительный эффект (дифракционная эффективность повышается примерно до 25%-40%). Этот способ был назван методом отсечки. И основан он на сужении динамического диапазона амплитудного Фурье-спектра голографируемого объекта путем отсечки на выбранном определенным образом пороговом уровне. В данной работе приводятся результаты исследования по изучению влияния метода отсечки на качество голограмм, синтезированных методом четырехфазового кодирования.

Теоретическая часть

Сущность метода четырехфазовой записи цифровых фурье-голограмм на фазовых средах приведена в работе [5]. Синтезированная этим методом голограмма восстанавливает изображение, описываемое выражением

$$h(x, y) \sim \text{sinc}\left(\frac{\Delta\xi}{2}x\right)\text{sinc}\left(\frac{\Delta\eta}{2}y\right)\sum_{p=-\infty}^{\infty}\sum_{q=-\infty}^{\infty}i^{p+q}\cdot h_{p,q}\left(x-\frac{p}{\Delta\xi}, y-\frac{q}{\Delta\eta}\right), \quad (1)$$

где $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$.

В этом выражении $h_{p,q}(x_p, y_q)$ представляет собой изображение, локализованное в области дифракционного порядка (p, q) :

$$h_{p,q}(x_p, y_q) = \begin{cases} \tilde{u}(x_p, y_q), & \text{если } p \text{ и } q \text{ четные,} \\ 0, & \text{если одно из пар чисел } p \text{ и } q \text{ - четное,} \\ & \text{а другое - нечетное,} \\ \tilde{r}(x_p, y_q), & \text{если } p \text{ и } q \text{ - нечетные,} \end{cases} \quad (2)$$

$x_p = x - \frac{p}{\Delta\xi}$ и $y_q = y - \frac{q}{\Delta\eta}$ - система пространственных координат, введенная в области конкретного отдельно взятого дифракционного порядка (p, q) .

Здесь $\tilde{u}(x, y)$ и $r(x, y)$ представляют собой знакомые из [1-4] полезное и мешающее изображения:

$$\begin{aligned} \tilde{u}(x, y) &= \text{rect}(\Delta\xi x)\text{rect}(\Delta\eta y)\sum_{n=-N}^N\sum_{m=-M}^M A_{nm}\exp(\varphi_{nm})\exp[i2\pi(xn\Delta\xi + ym\Delta\eta)] \approx \\ &\approx \text{rect}(\Delta\xi x)\text{rect}(\Delta\eta y)\sum_{n=-\infty}^{\infty}\sum_{m=-\infty}^{\infty} A_{nm}\exp(\varphi_{nm})\exp[i2\pi(xn\Delta\xi + ym\Delta\eta)] = u(\xi, \eta), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} r(x, y) &= \text{rect}(\Delta\xi x)\text{rect}(\Delta\eta y)\sum_{n=-N}^N\sum_{m=-M}^M\sqrt{A_{\max}^2 - A_{nm}^2}\exp(\varphi_{nm})\exp[i2\pi(xn\Delta\xi + ym\Delta\eta)] = \\ &= \text{rect}(\Delta\xi x)\text{rect}(\Delta\eta y)\sum_n\sum_m R_{nm}\exp(\varphi_{nm})\exp[i2\pi(xn\Delta\xi + ym\Delta\eta)]; \end{aligned} \quad (4)$$

$$R_{nm} = \sqrt{A_{\max}^2 - A_{nm}^2}. \quad (5)$$

Из (1) и (2) видно, что восстановленное изображение, как и для других методов, состоит из дифракционных порядков (p, q) изображения, маскированных функцией $\text{sinc}\left(\frac{\Delta\xi}{2}x\right)\text{sinc}\left(\frac{\Delta\eta}{2}y\right)$. В каждом дифракционном порядке в зависимости от значений p и q наблюдается либо полезное изображение $\tilde{u}(x, y)$, либо мешающее изображение $r(x, y)$, либо ничего. Таким образом, в восстановленном изображении имеет место пространственное разделение полезного и мешающего изображений.

Ниже приводятся результаты компьютерного моделирования процессов синтеза четырехфазовой голограммы и ее оптического восстановления, полученные в [5]. В этом эксперименте в качестве голографируемого объекта был принят тот же объект, что и в исследованиях [6, 7] (см. рис.1, рис.2 и табл.1). Для показателей качества синтезированной голограммы также были приняты те же обозначения и те же методика расчета их расчета. На рис.1 и рис.2 представлены исходный голографируемый объект, освещенный диффузно, и картина девяти порядков дифракции (p, q) ($p = -1, 0, +1$; $q = -1, 0, +1$) восстановленного изображения с голограммы, синтезированной методом четырехфазовой записи. Согласно (2) в порядках дифракции $(-1, -1)$, $(-1, +1)$, $(+1, +1)$ и $(+1, -1)$ локализованы мешающие изображения $r(x_p, y_q)$, а в полезном, т.е. в нулевом порядке $(0, 0)$ локализовано полезное изображение $\tilde{u}(x_p, y_q)$.



Рис. 1.

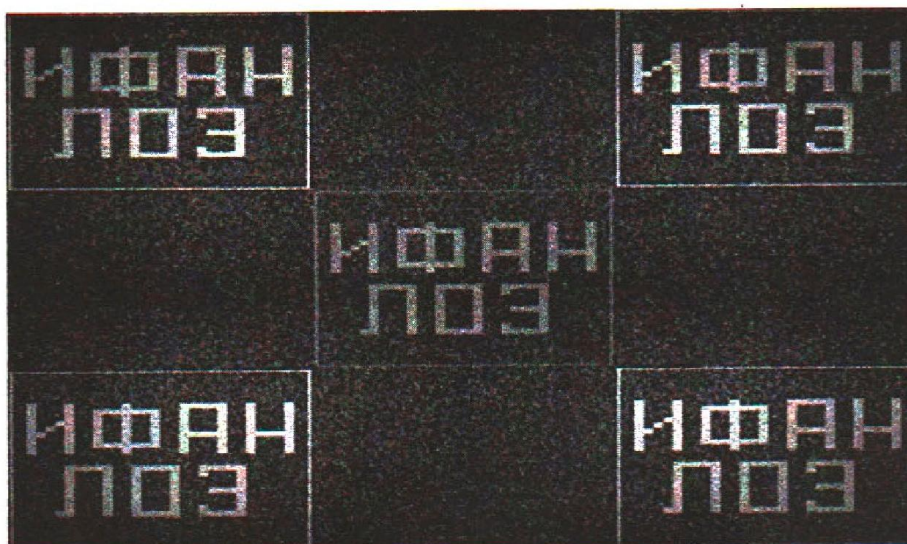


Рис. 2. Изображение, восстановленное с четырехфазовой голограммы, синтезированной без применения метода отсечки

Из визуального сравнения этих порядков дифракции по рис.2 и сравнения количественных оценок показателей качества по табл.1 следует, что в полезном дифракционном порядке восстанавливается более качественное изображение (в смысле среднеквадратических ошибок (скоКА и скоА) и отношения «сигнала-шум» (с/ш)), но с низкой яркостью, т.е. с низкой дифракционной эффективностью. Слабая яркость полезного изображения по сравнению с яркостью мешающего изображения является главным недостатком метода четырехфазовой записи. Это объясняется тем, что мощность, сосредоточенная в полезном изображении ниже, чем в мешающем изображении. Эти мощности разнятся тем сильнее, чем больше разброс амплитуд A_{nm} от

$$A_{\max}, \text{ т.е. чем больше } \frac{1}{N \cdot M} \sum_n \sum_m (A_{\max} - A_{nm}).$$

Таблица 1

		p-номер дифракционного порядка по горизонтали		
		p = -1	p = 0	p = 1
q- номер дифракционного порядка по вертикали	q = 1	скока=0,438 скоа= 0,438 с/ш= 41,94 д.э.= 14,49	скока=0,438 скоа=0,438 с/ш= 1,04 д.э.= 2,21	скока= 0,438 скоа= 0,438 с/ш= 42,285 д.э.= 14,80 %
	q = 0	скока=0,436 скоа= 0,438 с/ш= 0,90 д.э.=1,68 %	скока=0,248 скоа=0,226 с/ш= 12,84 д.э.= 8,90 %	скока= 0,438 скоа= 0,438 с/ш= 0,94 д.э.= 1,68 %
	q = -1	скока= 0,438 скоа= 0,438 с/ш=37,54 д.э.=13,17 %	скока= 0,438 скоа=0,438 с/ш=0,895 д.э.=2,16 %	скока=0,438 скоа= 0,438 с/ш=37,97 д.э.=13,53 %

Нами в [6] и [7] было показано, что сужение динамического диапазона A_{nm} приводит к увеличению мощности полезного изображения и, наоборот, к уменьшению мощности мешающего изображения. Т.е. происходит перераспределение общей мощности между полезным и мешающим изображениями в пользу полезного. Этот эффект и был применен нами для повышения показателей качества двухфазовых голограмм. При этом сужение динамического диапазона A_{nm} производилось путем отсечки амплитуд на выбранном определенном образом пороговом уровне $A_{отс}$. Естественно, при отсечке можно ожидать понижения качества полезного изображения. Поэтому пороговый уровень выбирается, так чтобы понижение качества полезного изображения было незначительным. Опыт показывает [6,7], что это соблюдается, если процентное выражение $p_{тс}$ количества подвергнутых отсечке амплитуд не превышает значения 15%-20%.



Рис. 3. Изображение, восстановленное с четырехфазовой голограммы, синтезированной с объемом отсечки $P_{отс} = 5\%$

Из выше изложенного возникает вопрос, как повлияет применение метода отсечки на показатели качества голограмм, синтезированных методом четырехфазовой записи. Чтобы ответить на этот вопрос, нами было проведено компьютерное моделирование, результаты которого приводятся на рис.3 - рис.5 и в таблице 2. На рис. 3 приведено изображение, восстановленное с четырехфазовой голограммы, синтезированной с применением метода отсечки со значением $= 5\%$. Из этого рисунка видно, что, действительно, яркость полезного изображения стало выше, чем на рис.2, тогда как яркость мешающих изображений понизились. А как изменились значения показателей качества, видны из сравнения таблиц 1 и 2. Дифракционная эффективность д.э. для полезного дифракционного порядка (0,0) повысилась со значения 8,90%. до значения д.э.=29,52%. Видим, также, что улучшилось и качество изображения в смысле среднеквадратичных ошибок: скоА уменьшилась со значения 0,226 до значения 0,140. На рис.4 и рис.5 приводятся графики зависимостей дифракционной эффективности и среднеквадратической ошибки восстановленного изображения от объема отсечки амплитуд. По графику на рис.4 видно, что с увеличением объема отсечки увеличивается и дифракционная эффективность.

Таблица 2

		р-номер дифракционного порядка по горизонтам		
		р = -1	Р = 0	р = 1
q- номер дифракционного порядка по вертикали	q = 1	скока=0,438 скоа= 0,438 с/ш= 18,43 д.э.= 9,73	скока=0,438 скоа=0,438 с/ш= 1,04 д.э.= 2,89	скока= 0,438 скоа= 0,438 с/ш= 18,73 1 д.э.= 10,06%
	q = 0	скока=0,438 скоа= 0,438 с/ш= 0,89 д.э.= 2,17%	скока=0.160 с/ш= 39.71 д.э.=2,82 %	скока= 0,438 скоа= 0,438 с/ш= 0,93 д.э.— 2,15%
	q = -1	скока=0,438 скоа=0,438 с/ш=16,63 д.э.— 8,97 %	скока= 0,438 скоа=0,438 с/ш=0,89 д.э.= 2,82%	скока=0,438 скоа= 0,438 с/ш=16,87 д.э.= 9,23 %

А по графику на рис.5 видим, что для среднеквадратической ошибки существует точка минимума, т.е. с увеличением объема отсечки среднеквадратическая ошибка, вначале, уменьшается, а затем начинает увеличиваться. Это объясняется тем, что в интересующем нас полезном порядке дифракции (0,0) локализовано полезное изображение, на которое с соседних дифракционных порядков накладываются «хвосты» мешающих изображений. Поэтому на качество полезного изображение влияют два фактора, связанные с увеличением объема отсечки. Первый является отрицательным и заключается в том, что с увеличением объема отсечки должно ухудшаться качество самого полезного изображение. Первый является отрицательным и заключается в том, что с увеличением объема отсечки должно ухудшаться качество самого полезного изображение. А второй является положительным и заключается он в том, что увеличение объема отсечки приводит к уменьшению мощности мешающего изображения, следовательно, и мощности их «хвостов», тем самым, уменьшая их отрицательное влияние на качество полезного изображения. Потому, уменьшение среднеквадратической ошибки в начале означает, что положительный эффект от второго фактора преобладает отрицательный эффект от первого фактора. А после некоторого значения объема отсечки наблюдается обратный эффект, т. е. главенствующим становится первый фактор.

Следует отметить, что эти эксперименты были повторены для ряда голографируемых объектов с различными информационными содержаниями и являющихся как бинарными, так и полутоновыми изображениями. Их результаты по характеру изменения значений показателей качества получились примерно такими же. Значение объема отсечки, при котором достигался минимум среднеквадратической ошибки восстановленного изображения, не выходило за пределы интервала с нижней границей около 5% и с верхней границей около 10%. На этом интервале дифракционная эффективность колебалась, примерно, от 30% до 40%.

Зависимость дифракционной эффективности от объема отсечки

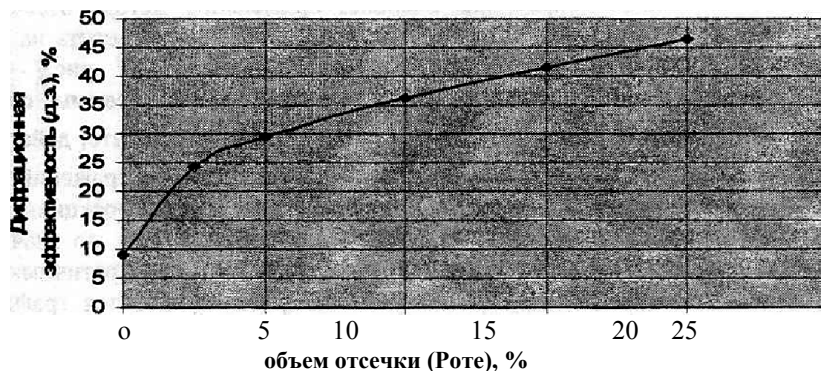


Рис. 4.

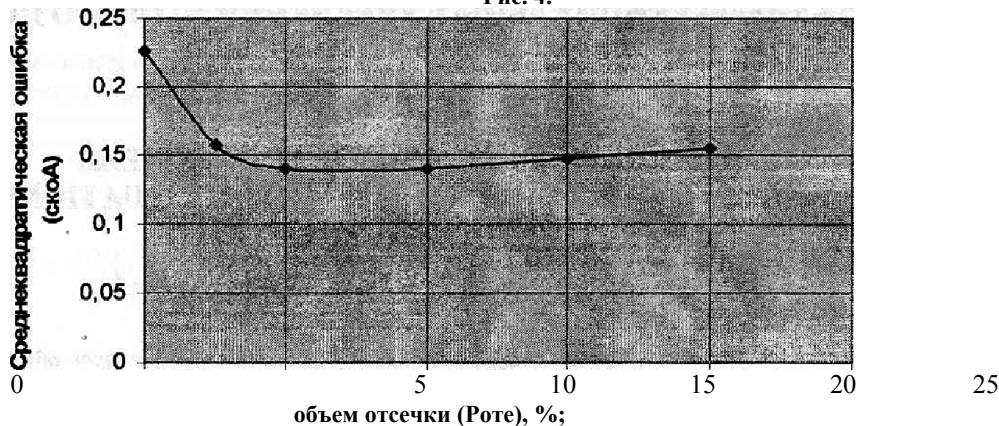


Рис. 5.

Из выше изложенного можно заключить, что при выборе оптимального объема отсечки следует исходить из разумного сочетания значений дифракционной эффективности и среднеквадратической ошибки, чтобы желание добиться, как можно большей дифракционной эффективности, не привело к неприемлемому качеству восстановленного изображения.

Вывод

Применение метода отсечки амплитуд при синтезе цифровых голограмм на фазовых средах методом четырехфазового кодирования действительно приводит к увеличению ее дифракционной эффективности, устраняя тем самым главный недостаток метода четырехфазовой записи. Кроме этого, до определенных значений объема отсечки, можно добиться и улучшения качества восстановленного изображения в смысле среднеквадратической ошибки.

Литература:

1. Ярославский Л. П., Мерзляков Н. С. Цифровая голография - М.: Наука, 1982. - 220 с.
2. Ярославский Л. П., Мерзляков Н.С. Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии. Введение в цифровую оптику.- М.: Радио и связь, 1987,- 296 с.
3. Аккозов А. Д. Метод простой встречной записи двухфазовых цифровых фурье - голограмм на фазовых средах// Известия КГТУ им И. Раззакова, № 13, Бишкек, 2008, С. 124-128
4. Аккозов А. Д., Абакирова Ж. Метод пространственного разделения полезного и мешающего изображения для записи двухфазовых цифровых голограмм на фазовых средах// Наука и новые технологии, №1,2, г. Бишкек, 2008, С. 247- 251
5. Аккозов А. Д., Алымкулов С. А., Четырехфазовый метод для синтеза цифровых фурье-голограмм на фазовых средах// Известия ВУЗов, №5, Бишкек, 2009, С. 8-14.
6. Азаматов З.Т., Аккозов А. Д., Абдурахманов К. П. Улучшение качества двухфазовых голограмм методом отсеки амплитуд// вестник туит, № 3, ташкент, 2008, с. 63-70
7. Аккозов А. Д. Повышение дифракционной эффективности двухфазовых цифровых фурье-голограмм на фазовых средах// Известия ВУЗов, № 7-8, Бишкек, 2008, С.3-8.

Рецензент: д.т.н. Алымкулов С.А.