

$c_{12}$	$c_{22}$	$c_{32}$	$c_{42}$	$c_{52}$	$c_{62}$	$c_{72}$	$c_{82}$
0,143	-0,143	0,143	-0,143	0,143	-0,143	0,143	0,143
0,2	-0,089	0,16	-0,15	0,132	-0,25	0,12	0,121

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. С. Гиббин, Е. С. Нежевенко, О. И. Потатуркин, П. Е. Твердохлеб. Когерентно-оптические устройства для обобщенного спектрального анализа изображений.— «Автоматрия», 1972, № 5.
2. Е. С. Нежевенко, О. И. Потатуркин, П. Е. Твердохлеб. Линейные оптические системы для выполнения интегральных преобразований общего вида.— «Автоматрия», 1972, № 6.
3. Хармут. Применение функций Уолша в теории связи.— «Зарубежная радиоэлектроника», 1971, № 8.
4. С. Бесветтер. Анализ и синтез сигналов с помощью функций Уолша.— «Зарубежная радиоэлектроника», 1972, № 5.
5. В. П. Логинов. Функции Уолша и области их применения.— «Зарубежная радиоэлектроника», 1973, № 4.
6. A. Kozma. Analysis of the Film Non-Linearities in Hologram Recording.— "Optica Acta", 1968, v. 15, № 6.
7. E. Leith, J. Upatnieks. Wave Front Reconstruction with Continuous Tone Objects.— "J. Opt. Soc. America", 1963, v. 53, p. 1377.
8. Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лин. Оптическая голография. М., «Мир», 1973.

Поступила в редакцию 26 декабря 1974 г.

УДК 772.99 : 621.391.156

**Г. И. ВАСИЛЕНКО, А. Д. МАНУИЛЬСКИЙ, Е. С. НЕЖЕВЕНКО,  
А. И. ТРОЙНИКОВ**  
(Москва — Новосибирск)

### ОПТИМАЛЬНОЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Задача апостериорного восстановления качества изображений относится к широкому классу задач редукции к идеальному прибору [1]. Возможность решения этой задачи на основе применения методов голографии продемонстрирована Дж. Строуком и его сотрудниками [2].

В методах Дж. Строука компенсация несовершенства некоторого прибора как линейной системы с передаточной функцией  $H(\vec{\omega})$ , достигается путем применения инверсного фильтра, имеющего передаточную функцию  $1/H(\vec{\omega})$ . Эта функция реализуется при помощи двух транспарантов-фильтров, один из которых представляет амплитудную часть функции и изготавливается голографическим способом, а другой — фазовую часть и получается голографическим способом. Такая фильтрация имеет ряд принципиальных недостатков, обусловленных тем, что в тех точках частотной плоскости, где  $H(\vec{\omega})=0$ , передаточная функция не определена, а неизбежное присутствие шума в восстановленном изображении приводит к тому, что решение интегрального уравнения, дающее передаточную функцию инверсного фильтра, оказывается неустойчивым также в окрестностях точек, в которых  $H(\vec{\omega})=0$ . Эти особенности инверсной фильтрации приводят к тому, что несмотря на преодо-

ние технических трудностей, связанных с необходимостью обеспечения большого динамического диапазона регистрирующей среды для записи амплитудного транспаранта и его точного совмещения с голографическим фильтром, передаточная функция реального инверсного фильтра в окрестностях точек  $H(\vec{\omega})=0$  отличается от теоретической, что может привести к большим ошибкам при восстановлении изображения.

Этих недостатков лишена оптимальная фильтрация, предусматривающая минимизацию среднего квадратического отклонения функции восстановленного изображения от функции неискаженного изображения с учетом отношения сигнал/шум. Основываясь на результатах работы К. Хелстрема [3], можно показать, что передаточная функция оптимального восстанавливающего фильтра отличается от передаточной функции инверсного фильтра  $1/H(\vec{\omega})$  наличием действительного положительного множителя вида

$$\frac{1}{1 + \frac{1}{|H(\vec{\omega})|^2 \varphi(\vec{\omega})}}, \quad (1)$$

где  $\varphi(\vec{\omega}) > 0$  — значение отношения сигнал/шум в восстанавливаемом изображении. Передаточная функция оптимального фильтра определена при всех  $\vec{\omega}$  и позволяет получить единственное и устойчивое решение исходного интегрального уравнения при наличии шума.

Задача настоящей работы — показать, что на основе применения методов голографии возможно реализовать на едином транспаранте оптимальный фильтр с передаточной функцией

$$H_{\text{оп}}(\vec{\omega}) = \frac{1}{1 + \frac{1}{|H(\vec{\omega})|^2 \varphi(\vec{\omega})}} \frac{1}{H(\vec{\omega})}, \quad (2)$$

в результате чего существенно снижаются технические трудности, связанные с двухстадийным изготовлением инверсного фильтра по методу Дж. Строука.

Такая возможность открывается, если использовать нелинейную характеристику фотоматериала, на котором регистрируется голограмма, путем соответствующего выбора распределений интенсивностей сигнального и опорного пучков света.

Для определения условий регистрации фильтра, обеспечивающего передаточную функцию (2), представим  $H_{\text{оп}}(\vec{\omega})$  в виде степенного ряда при следующих соотношениях:

$$1) |H(\vec{\omega})|^2 \gg 1/\varphi(\vec{\omega}); \quad 2) |H(\vec{\omega})|^2 \ll 1/\varphi(\vec{\omega}); \quad 3) |H(\vec{\omega})|^2 = \varphi(\vec{\omega}).$$

1)  $|H(\vec{\omega})|^2 \gg 1/\varphi(\vec{\omega})$ . Ограничиваясь двумя членами разложения выражения (2), получаем

$$H_{\text{оп}}(\vec{\omega}) \cong [H(\vec{\omega})]^{-1} - 1/\varphi(\vec{\omega}) [H(\vec{\omega})]^{-3}. \quad (3)$$

Будем регистрировать голографический фильтр при условии, что амплитуда опорного пучка  $E_0$  значительно меньше амплитуды сигнального  $E_c$ , т. е.  $|E_0| \ll E_c$ . Пусть коэффициент контрастности на соответствующем участке  $T-E$ -характеристики фотоматериала будет  $\gamma_1$ . Тогда, разлагая в ряд функцию амплитудного пропускания голограммы  $t_1$ , согласно [4], и ограничиваясь вторым приближением, для первого порядка дифракции получим

$$t_1 = \frac{\gamma_1(\gamma_1 + 2)}{4} E_0^3 E_c^{-(\gamma_1+3)} - \frac{1}{2} \gamma_1 E_c^{-(\gamma_1+1)}. \quad (4)$$

Сравнивая (3) и (4), замечаем, что если положить  $E_c = H(\vec{\omega})$ ,  $E_o = 1/\varphi(\vec{\omega})$ ,  $\gamma_1 \ll 1$ , то

$$t_I = -\frac{1}{2} \gamma_1 H_{\text{оп}}(\vec{\omega}) 1/\varphi(\vec{\omega}). \quad (5)$$

2)  $|H(\vec{\omega})|^2 \ll 1/\varphi(\vec{\omega})$ . Разложение функции (2) до члена второго порядка имеет вид

$$H_{\text{оп}}(\vec{\omega}) \cong \varphi(\vec{\omega}) H(\vec{\omega}). \quad (6)$$

Если условия регистрации фильтра сохраняются, т. е.

$$E_o = 1/\varphi(\vec{\omega}), \quad E_c = H(\vec{\omega}), \quad (7)$$

то  $|E_c| \ll |E_o|$  и пропускание голограммы для первого порядка дифракции в первом приближении будет

$$t_I = E_o^{-\gamma_2 - 1} \left( -\frac{1}{2} \gamma_2 \right) E_c.$$

Подставляя в это выражение (6) и (7), получаем

$$t_I = -\frac{1}{2} \gamma_2 \left[ \varphi(\vec{\omega}) \right]^{\frac{\gamma_2 - 1}{2}} H_{\text{оп}}(\vec{\omega}).$$

Нетрудно видеть, что если обеспечить  $\gamma_2 = \gamma_1 \ll 1$ , то с учетом малого изменения  $\varphi(\vec{\omega})$  в рассматриваемой малой области пространственных частот последнее выражение совпадает с (5).

3) Провести сравнение  $H_{\text{оп}}(\vec{\omega})$  и  $t_I$  для различных близких значений опорного и сигнального пучков весьма сложно. Поэтому проведем расчет для соотношения  $|E_o| = |E_c|$ . В этом случае  $H(\vec{\omega}) = 1/\sqrt{\varphi(\vec{\omega})}$  и  $H_{\text{оп}}(\vec{\omega}) = \frac{1}{2} 1/H(\vec{\omega})$ , а амплитудное пропускание голограммы для первого порядка дифракции, согласно [4],  $t_I = -2^{-\frac{1}{2}\gamma_3} \left( \frac{\gamma_3}{4} \right) E_c^{-\gamma_3}$ . Представив последнее выражение в виде  $t_I = -2^{-\frac{1}{2}\gamma_3} E_c^{-1} E_o^{-\gamma_3 + 1} \left( \frac{\gamma_3}{4} \right)$ , получим

$$t_I = -2^{-\frac{1}{2}\gamma_3} \left( \frac{\gamma_3}{4} \right) \left[ \varphi(\vec{\omega}) \right]^{\frac{\gamma_3 - 1}{2}} H_{\text{оп}}(\vec{\omega}).$$

Если положить  $\gamma_3 = \gamma_2 = \gamma_1 \ll 1$ , то это выражение, как и во втором случае, совпадает с выражением (5).

Таким образом, если при съемке голографического фильтра сигнальную волну промодулировать в соответствии с функцией  $H(\vec{\omega})$ , являющейся передаточной функцией системы, искажающей изображение, а опорную — в соответствии с функцией  $1/\varphi(\vec{\omega})$ , то при регистрации фильтра на пологом участке  $T-E$ -характеристики фотоматериала ( $\gamma \ll 1$ ) передаточная функция оптимального фильтра пропорциональна произведению передаточной функции голографического фильтра на функцию  $1/\sqrt{\varphi(\vec{\omega})}$ . Остается некоторая неопределенность для значений  $H(\vec{\omega})$  близких, но не равных  $1/\sqrt{\varphi(\vec{\omega})}$ , однако, исходя из непрерывности функции  $t(\gamma)$ , можно ожидать, что закономерность, указанная выше, сохранится и в этом случае.

Можно дать следующее качественное объяснение соотношения (5). Дифракционная эффективность голографического фильтра в малой окрестности  $\vec{\omega}$  пропорциональна отношению контраста интерференционных полос к среднему пропусканию в рассматриваемой окрестности и определяет модуль передаточной функции соответствующей области фильтра при фильтрации. Величина контраста полос, возникших вследствие интерференции сигнального ( $E_c$ ) и опорного ( $E_o$ ) равномерных пучков света, равна

$$\eta = \frac{2|E_o||E_c|}{|E_o|^2 + |E_c|^2}.$$

Если же амплитуды сигнального и опорного пучков в плоскости голограммы меняются таким образом, что

$$E_c = H(\vec{\omega}), E_o = 1/\sqrt{\varphi(\vec{\omega})}, \quad (8)$$

а зависимость между интенсивностью падающего на фотопластинку света и пропусканием ее по интенсивности линейна, то распределение величины контраста зарегистрированных полос будет иметь вид

$$\eta(\vec{\omega}) = \frac{2}{\sqrt{\varphi(\vec{\omega})}} \frac{1}{1 + \frac{1}{|H(\vec{\omega})|^2 \varphi(\vec{\omega})}} \frac{1}{|H(\vec{\omega})|}. \quad (9)$$

Дифракционная эффективность или, что то же самое, амплитуда восстановленной световой волны при единичной амплитуде восстанавливающей волны будет равна  $|t| = \eta(\vec{\omega})k$ , где среднее пропускание фильтра  $k = \frac{2}{\sqrt{E_o^2 + E_c^2}} \cong \text{const}$ , если наклон  $T-E$ -характеристики мал. От-

куда  $|t| = 2/\sqrt{\varphi(\vec{\omega})} H_{\text{оп}}(\vec{\omega})k$ , что с точностью до коэффициента совпадает с (5).

Таким образом, при условии (8) модуль передаточной функции голографического фильтра будет равен модулю передаточной функции оптимального восстанавливающего фильтра с точностью до множителя  $1/\sqrt{\varphi(\vec{\omega})}$ . Аргумент требуемой передаточной функции фильтра, зависящий только от локализации интерференционных полос, при этом не меняется, и, следовательно, регистрация фильтра возможна на одной пластинке.

Следует отметить, что при постоянном значении  $\varphi(\vec{\omega})$  передаточная функция фильтра (2) достигается с точностью до константы. Однако при реальных для фотоизображений значениях  $\varphi(0) = 10^2 - 10^3$  отношение средних значений интенсивностей опорного и сигнального пучков должно составлять  $10^{-2} \div 10^{-3}$ , ввиду чего происходит перераспределение энергии в область высших пространственных частот и восстанавливаемое в процессе фильтрации изображение имеет крайне низкую интенсивность. Попытки преодоления этого недостатка за счет применения, например, однорастворного проявителя и отбеливания фильтра голограммы малоэффективны и приводят к существенному возрастанию шумов на восстановленном изображении [5].

В случае  $\varphi(\vec{\omega}) \neq \text{const}$  синтез оптимального голографического фильтра может быть осуществлен посредством маскирования опорного луча по закону  $E_o(\vec{\omega}) = 1/\sqrt{\varphi(\vec{\omega})}$ . В дальнейшем на этапе восстановле-

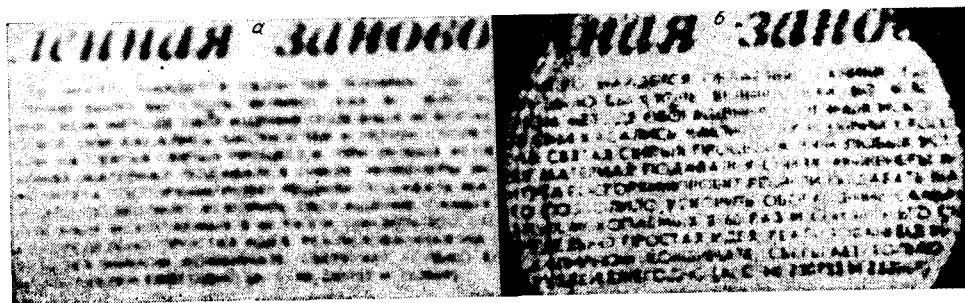


Рис. 1.

ния с целью компенсации множителя  $1/\sqrt{\varphi(\vec{\omega})}$  в выражении (8) можно использовать совместно с изготовленным восстанавливающим фильтром амплитудный фильтр с пропусканием  $\sqrt{\varphi(\vec{\omega})}$ .

Поскольку отношение сигнал/шум на близко лежащих пространственных частотах для реальных изображений резко не меняется, функция  $\sqrt{\varphi(\vec{\omega})}$  достаточно пологая, и, следовательно, требования к точности совмещения амплитудного и голографического фильтров оказываются низкими. Если шум на восстановленном изображении изотропен, то  $\varphi(\vec{\omega})$  — функция с круговой симметрией и амплитудные фильтры, необходимые для записи и фильтрации, могут быть изготовлены с высокой точностью.

Экспериментальная проверка предлагаемого метода восстановления качества изображений проводилась применительно к случаю компенсации ошибок фокусировки, приводящих к увеличению диаметра функции рассеяния точки до 300 мкм. Изображения, подлежащие восстановлению, изготавливались с помощью фотоаппарата «Зенит-1» с объективом «Гелиос-44» путем экспозиции тестовых изображений стандартных мир и печатного текста в условиях дефокусировки. Голографические восстанавливающие фильтры изготавливались по классической схеме Фурье-голографии с маскированием канала опорного луча в соответствии с монотонно убывающей функцией  $\varphi(\vec{\omega})$ . В качестве материала для регистрации голографических восстанавливающих фильтров использовались фотопластинки «Микрат-СРБШ» и «Agfa — Gevaert 8E70».

Примером восстанавливающих свойств одного из синтезированных голографических фильтров являются фотоиллюстрации, приведенные на рис. 1. Тестовое изображение, подлежащее восстановлению (см. рис. 1, а), имело неодинаковое разрешение по полю. Это позволило определить диапазон восстанавливаемых расфокусировок с помощью изготовленных фильтров. Как видно из рис. 1, б, достаточно хорошее качество восстановления наблюдается в центральной области изображения.

На рис. 2 приведен пример действия голографического восстанавливающего фильтра на изображение радиальной миры. Как и следовало ожидать, в ре-

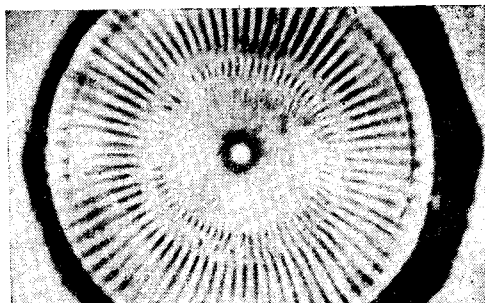


Рис. 2.

зультате фильтрации полученное изображение имеет ряд реверсированной контраста, соответствующих областям изменения знака фазы передаточной функции.

Предложенный способ получения восстанавливающего фильтра непосредственно по импульсному отклику искажающей системы позволяет, с одной стороны, избежать сложных расчетов по определению передаточной функции инверсного или оптимального фильтра, а с другой — существенно снизить трудоемкость получения этого фильтра. Кроме того, появляется возможность оперативного восстановления изображения, если импульсный отклик искажающей системы меняется во времени.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Я. И. Хургин, В. П. Яковлев. Финитные функции в физике и технике. М., «Наука», 1971.
2. Д. Ж. Строук. Оптические вычисления.— «Автометрия», 1973, № 5.
3. С. W. Helstrom. Image Restoration by the Method of Least Squares.— "JOSA", 1967, v. 57, p. 297—303.
4. Л. М. Сороко. Основы голографии и когерентной оптики. М., «Наука», 1971.
5. S. Ragansson.— "Physica Scripta", 1970, v. 2.

*Поступила в редакцию 29 января 1975 г.*

УДК 621.319+681.332+535.317

**Б. Е. КРИВЕНКОВ, С. В. МИХЛЯЕВ, П. Е. ТВЕРДОХЛЕБ,  
Ю. В. ЧУГУЙ**  
(Новосибирск)

### **НЕКОГЕРЕНТНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ МАТРИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ**

Преобразования, эквивалентные операции умножения нескольких матриц (с числом строк и столбцов, отличных от единицы) и называемые далее матричными, являются исходными при решении ряда важных практических задач. Они применяются, например, при многоканальной обработке одномерных сигналов и при обработке двумерных изображений (задачи анализа, фильтрации, обнаружения и кодирования).

Вопросы моделирования матричных преобразований оптическими когерентными методами рассматривались в [1—3]. Так, в [1, 2] для умножения двух многоэлементных матриц применена система оптической пространственной фильтрации с голографическим фильтром. Элементы результирующей матрицы вычислялись одновременно и параллельно. Позднее для тех же целей предложена специальная оптическая система, более эффективная с точки зрения использования световой энергии, точности вычислений и организации работы в оперативном режиме [3].

Дальнейшие исследования [4, 5], проведенные в этом направлении, показали, что оптические системы способны производить более сложные преобразования, описываемые произведением трех матриц, и что такие преобразования можно моделировать не только когерентными, но и некогерентными методами. Правда, во вновь разработанных системах элементы результирующей матрицы вычислялись последовательным [4] и параллельно-последовательным [5] способами, предусматривающими смену изображений строк (столбцов) умножаемых матриц.