АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
АВТОМЕТРИЯ

№ 5 1973

ОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ХРАНЕНИЯ, ОБРАБОТКИ И ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

© IEEE SPECTRUM, 1972. УДК 621.378; 681.327

ДЖ. СТРОУК
(Нью-Йорк)

ОПТИЧЕСКИЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

Состояние оптической обработки сегодня. В настоящее время существуют, по крайней мере, три направления, основанных на оптических вычислительных принципах: оптическое восстановление размытых изображений, когерентные радары с синтезируемой апертурой бокового обзора и корреляционное распознавание изображений.

Современные оптические средства позволяют улучшать размытые изображения практически до полной резкости. Эта процедура может быть осуществлена за малое время, и при этом не требуется высокой квалификации оператора.

В области когерентных радаров [1] оптическая параллельная обработка позволяет синтезировать изображения с высоким разрешением по данным, зарегистрированным на пленке в виде микроволновой голограммы. Информация получается с помощью маленькой антенны, установленной на движущемся самолете. В результате разрешение системы соответствует разрешению большой антенны. В последнее время когерентные радары применяют для исследования земных ресурсов и картографирования недоступных районов.

Корреляционное распознавание изображений дает возможность исследователю производить сравнение входных сигналов с сигналами, предварительно записанными в виде голограмм. Это используется при анализе сигналов, вызванных взрывными зарядами или вибраторами (например, при поиске нефти), распознавании символов, аэрокартографировании и обнаружении движений облачного покрова по данным, переданным со спутника.

В предлагаемой работе рассматривается одно из направлений оптического вычисления — устранение размытия изображений.

Метод. Причина, по которой размытая фотография может быть восстановлена, заключается в том, что размытие не приводит к безвозвратной потере информации, особенно в пространственно-частотных областях. На первый взгляд кажется, что информация в расфокусированной фотографии или фотографии, смазанной движением, потеряна. Это касается и фотографий, полученных путем сканирования объекта пучком конечной ширины (электронная микроскопия, ультразвуковые изображения). На самом деле, «достоверное» изображение закодировано в размытой фотографии в форме интеграла свертки. Декодирование может быть легко осуществлено с помощью голографического аналогового вычислительного устройства, приведенного на рис. 1. На нем показано ухудшение качества изображения радиальной тест-миры при

смазанная фотография тест-миры характеризуется очень слабой интенсивностью в области высоких частот (см. рис. 1) по сравнению с низкочастотными областями, восстановление правильных соотношений интенсивности выполняется с помощью амплитудной компоненты фильтра. Это достигается путем сильного увеличения доли высокочастотных компонент и ослабления низкочастотных.

Восстановление фазы или правильное положение частотных компонент тоже легко понять. На рис. 1 показана сильно увеличенная часть голографической фазовой компоненты фильтра. Она охватывает два соседних кольца вблизи центра амплитудной компоненты. Тщательное исследование фазовой компоненты обнаруживает ее решетчатую структуру: это фактически «несущая» решетка голограммы, которая формирует фазовую компоненту фильтра. Кроме того, при более детальном исследовании можно обнаружить, что полосы в голографической решетке смещаются точно на половину периода при переходе к соседнему кольцу. Можно показать, что это смещение в фильтре в точности равно смещению, которое необходимо для компенсации смещения полос в центральной части размытой фотографии радиальной тест-миры. Эти смещения полос компенсируют соответствующие фазовые сдвиги в остальной части спектра.

Обозначим распределение амплитуд первоначального изображения объекта через $f(x, y)$, в размытой фотографии — $g(x', y')$, распределение амплитуд восстановленной фотографии — $\hat{f}(x', y')$.

Математически процесс размытия изображения можно представить интегралом свертки функции $f(x, y)$ с функцией рассеяния точки $h(x'-x, y'-y)$

$$g(x', y') = \iint f(x, y) h(x'-x, y'-y) dxdy. \qquad (1)$$

Уравнение (1) можно записать символически следующим образом:

$$g = f \otimes h.$$

В Фурье-области интеграл свертки (1) представляется в виде произведения

$$G(u, v) = F(u, v) H(u, v), \qquad (2)$$

где G, F и H — Фурье-преобразования функций g, f и h. Например, в обычной нормированной форме [2]

$$H(u, v) = \iint h(x, y) \exp[2\pi i(ux+vy)] dxdy. \qquad (3)$$

Следует напомнить, что функция $H(u, v)$, которую можно переписать в виде преобразования Фурье

$$H(u, v) = \mathbf{F}[h(x, y)],$$

есть пространственно-частотная передаточная функция, обычно называемая частотно-контрастной характеристикой (ЧКХ). Из (2) видно, что процесс размытия изображения, описываемый уравнением (1), в общем случае приводит к полному уменьшению (и сдвигу) пространственно-частотных составляющих и в ряде случаев к подавлению некоторых пространственно-частотных компонент (см. рис. 1).

Процесс устранения размытия теперь осуществляется путем деления G на H в соответствии с уравнением

$$G/H = F, \qquad (4)$$

из которого искомая функция f получается с помощью обратного преобразования Фурье или символически

$$F \rightarrow f. \qquad (5)$$

С помощью голографического вычислительного метода уменьшение контраста, вызванное размытием и инверсией, может быть почти полностью исправлено. При этом достигается улучшение качества изображения, несмотря на отсутствие восстановления в нескольких дискретных пространственно-частотных областях.

Восстановление исходного распределения интенсивностей в изображении требует определения двух параметров: амплитуды (интенсивности) и фазы, т. е. положения максимумов различных пространственно-частотных компонент. Эта задача решается специальным фильтром, установленным в оптической схеме (см. рис. 1). Коллимированный пучок лазера проходит сначала через размытую фотографию B, а затем через линзу L_1, которая выполняет преобразование Фурье. В плоскости Фурье установлен фильтр F. Известно [2—4], что если объект представляет собой решетку параллельных полос, имеющих одну пространственную частоту, то в Фурье-плоскости, где помещен фильтр, появится его пространственный спектр в виде решетки. При этих условиях линза L_1 выполняет двумерное преобразование Фурье между передней фокальной плоскостью (x, y) и задней фокальной плоскостью (u, v). Пространственная частота спектра в Фурье-плоскости (u, v) обратно пропорциональна пространственной частоте элементарной решетки в плоскости изображения x, y. Другими словами, области миры с низкой пространственной частотой (далеко разнесенные полосы) будут давать спектр с очень высокой пространственной частотой (близко расположенные линии).

Независимо от того, где в двумерном размытом транспаранте помещена элементарная решетка с данной пространственной частотой, спектр ее в Фурье-плоскости будет появляться в одном и том же месте при условии, что эта решетка имеет одну и ту же ориентацию в плоскости x, y. Таким образом, спектры всех элементов изображения в виде полос с одинаковой пространственной частотой и ориентацией накладываются друг на друга в Фурье-плоскости. Именно это обстоятельство и позволяет восстанавливать все неправильно переданные пространственно-частотные компоненты на размытой двумерной фотографии лишь одним единственным фильтром в Фурье-плоскости. Это справедливо одновременно для всех точек изображения в предположении, что все точки на фотографии размыты одинаково и, таким образом, характеризуются одним и тем же Фурье-спектром. Каждая элементарная область размытой фотографии будет однозначно восстановлена с помощью второго преобразования Фурье, осуществляемого линзой L_2 (см. рис. 1) между плоскостями u, v и x', y'. Надлежащее взвешивание элементарных областей изображения по интенсивности достигается тем же самым фильтром. Одновременная обработка всех точек изображения — уникальная особенность оптической системы с двойным преобразованием Фурье. Это дает право называть такие оптические устройства компьютерами параллельной обработки информации.

Фильтр, используемый для устранения размытия изображения, должен состоять из двух компонент: амплитудной и фазовой. Амплитудная компонента для расфокусированной фотографии состоит из системы концентрических колец (см. рис. 1) в виде диска Эйри с гауссовым распределением. Можно представить, что такая система колец образуется при вращении спектра решетки вокруг центральной оси, если учесть то обстоятельство, что спектр на самом деле состоит из интенсивной центральной компоненты и более слабых боковых пиков. Таким образом, амплитудная компонента такого фильтра должна быть темной в центре (что соответствует областям с низкими пространственными частотами) и более прозрачной по мере удаления от центра (что соответствует более высоким пространственным частотам). Поскольку

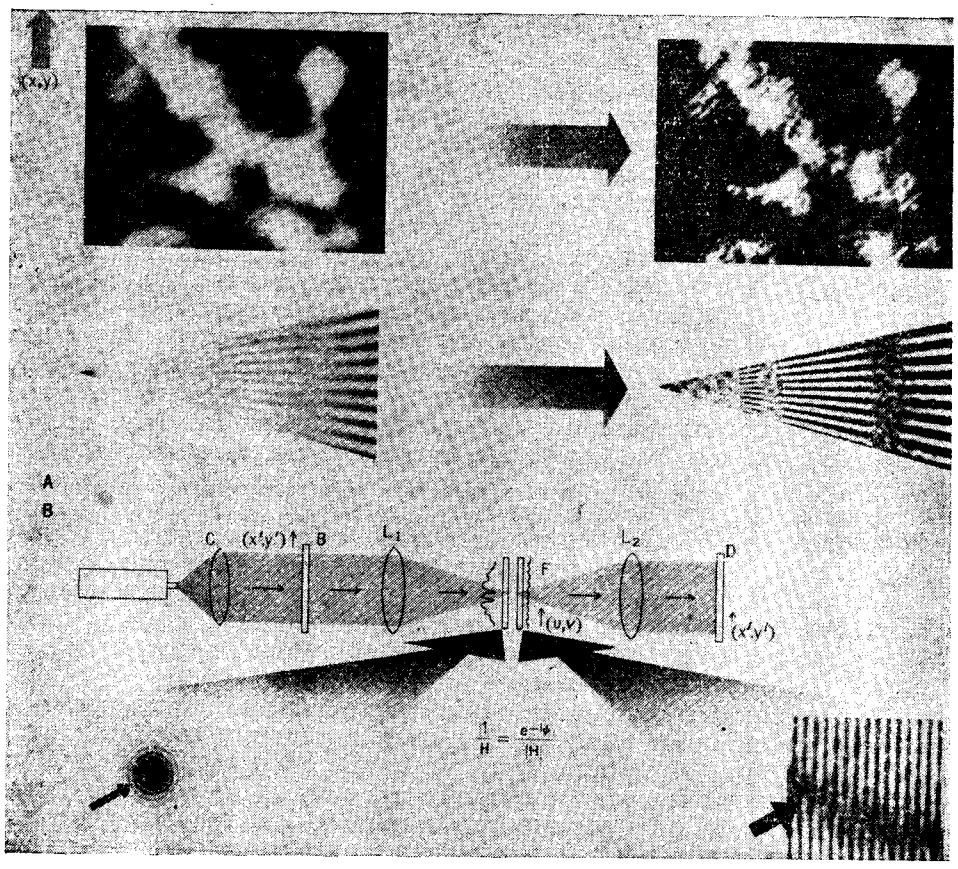

Рис. 1. Устранение размытия изображений:

а — электронная микрограмма *fd* вируса (разрешение 5 Å); *б* — голографически восстановленное изображение (разрешение 2,5 Å); *в* — размытое изображение радиальной тест-миры; *г* — восстановленное изображение радиальной тест-миры; *д* — оптическая схема фильтрации: *1* — амплитудная компонента фильтра $1/|H|$; *2* — фазовая компонента фильтра $e^{-i\Phi}$.

сильной расфокусировке. В оригинальной тест-мире все радиальные полосы имели одинаковую интенсивность: либо все черные, либо все белые. Общий контраст полос в расфокусированном изображении миры уменьшается с возрастанием их плотности. В оптике плотность полос измеряется числом линий на миллиметр. Эту величину называют «пространственной частотой». Таким образом, контраст в размытой фотографии радиальной миры уменьшается с увеличением пространственной частоты ($u=1/x$, $v=1/y$ с точностью до констант).

Исследование расфокусированной миры (см. рис. 1) обнаруживает и более интересное явление. Контраст не только уменьшается при увеличении пространственной частоты, но и резко падает до нуля на расстоянии одной трети от вершины миры. При этой пространственной частоте изображение полос настолько ухудшено, что можно говорить о полном отсутствии изображения. При дальнейшем увеличении пространственной частоты контраст полос снова возрастает. Однако при более тщательном наблюдении можно обнаружить, что положение черных полос или максимумов в этой области смещено на половину периода полосы. Этот полупериодный сдвиг происходит из-за скачка фазы и приводит к инверсии контраста в размытом изображении. При анализе электронных микрофотографий инверсия контраста приводит к сложным деградациям изображения, затрудняющим его расшифровку.

Фильтр, устраняющий размытие изображения. Голографический фильтр с использованием Фурье-преобразования можно представить следующей функцией:

$$\frac{1}{H} = \frac{e^{-i\Phi}}{|H|}. \qquad (6)$$

Этот фильтр осуществляет в Фурье-плоскости операцию деления. Он может быть реализован с помощью устройства [2], оптическая схема которого показана на рис. 2. Фильтр, осуществляющий деление, состо-

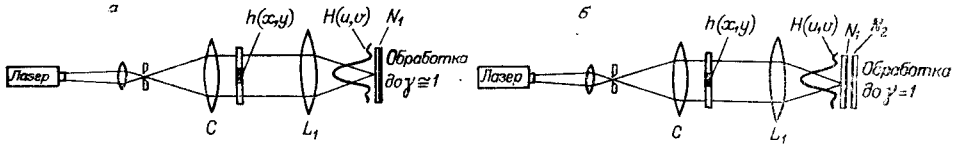

Рис. 2. Оптическая схема изготовления амплитудной компоненты фильтра.

ит из двухслойного «сэндвича», одна из компонент которого представляет амплитудную часть фильтра, а другая — фазовую. Амплитудная компонента фильтра имеет пропускание $1/H$, где $H(u, v)$ — Фурье-преобразование функции рассеяния $h(x, y)$, так что освещение его полем $H(u, v)$ дает чисто фазовую компоненту $\exp(i\phi) = H/|H|$, которая легко реализуется в виде голограммы сфокусированного изображения (рис. 3).

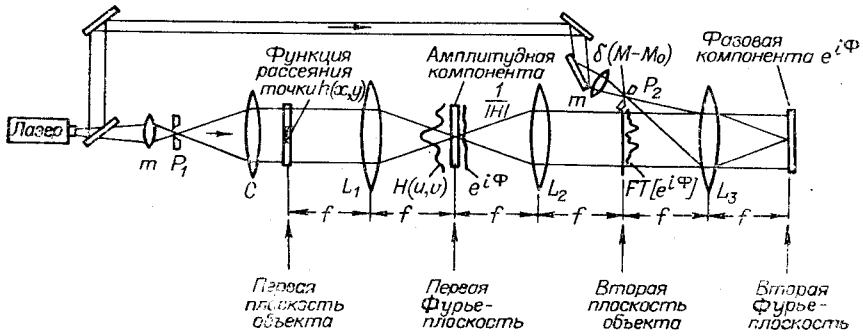

Рис. 3. Оптическая схема изготовления фазовой компоненты фильтра.

Этот новый метод [5, 6] позволяет нам изготовлять фильтр для устранения размытия изображения менее чем за один рабочий день, имея в распоряжении экспериментальную функцию рассеяния $h(x, y)$. Фильтр имеет больший динамический диапазон (амплитудная компонента) и более высокую пространственно-частотную область восстановления (фазовую компоненту), чем ранее используемые нами фильтры, которые требовали месяцы работы для их изготовления. Особенности нового метода создания фильтра следующие: 1) очень большой динамический диапазон амплитудной компоненты и 2) расширенная пространственно-частотная область голографической фазовой компоненты.

Принцип изготовления амплитудной компоненты нового фильтра приведен на рис. 4. На нем показаны экспериментальные сенситометрические кривые для фильтров, которые мы используем при получении экспериментальных результатов (N_1 = Кодак 649, N_2 = Акфа 10E70). Напомним, что изображение на фотографической пластинке можно представить на сенситометрической характеристике в виде прямой ли-

нии с наклоном, равным —1 (кривая *0* на рис. 4). В нашем случае необходимо реализовать негатив N с наклоном, равным +1, и динамическим диапазоном порядка 4. Заметим, что при этих условиях стандартные фотоматериалы имеют наклоны в логарифмическом масштабе в лучшем случае около 1,5, так что пропускание при освещении полем $H(u, v)$ (кривая *0*) будет постоянным и равным T. В результате поле, пропущенное амплитудной компонентой $1/|H|$, будет чисто фазовым полем $\exp(i\phi)$, необходимым для записи фазовой компоненты фильтра в виде голограммы сфокусированного изображения (см. рис. 3).

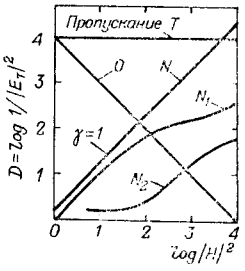

Рис. 4. Сенситометрические кривые фильтров.

Амплитудная компонента фильтра с большим диапазоном пропускания $1/|H|$ представлена на рис. 4 кривой N. Она реализуется следующим образом: сначала регистрируется фотография $|H|^2$, что дает компоненту N_1 (см. рис. 2, *а*), она переэкспонируется для того, чтобы перекрыть желаемый диапазон и иметь в линейной области низких плотностей наклон, близкий к 1. Затем через N_1 путем освещения его полем $H(u, v)$ в линейной области регистрируется компонента N_2 (см. рис. 2, *б*) с тщательно контролируемым наклоном +1, который практически легко достигается, так как первоначальный большой диапазон $|H|^2$ был «сжат». Наконец, можно видеть (см. рис. 4), что суммарная плотность $N_1+N_2=N$. Причина, по которой компонента N_2 имеет наклон, равный +1, может быть понята из того факта, что N_2 является записью изображения поля с наклоном —1, пропущенным через N_1.

Таким образом, весь фильтр $1/H$ состоит из трехслойного «сэндвича» N_1, N_2 и голограммы сфокусированного изображения и используется, как показано на рис. 1. Уже отмечалось [6], что новый метод реализации фильтра имеет дополнительное преимущество, которое заключается в том, что при регистрации голограммы через амплитудную компоненту автоматически компенсируются фазовые неоднородности в стекле и эмульсии, а также вариации показателя преломления. Кроме того, так как такая голограмма имеет нулевое пропускание в нулях функции $H(u, v)$, то тем самым осуществляется подавление шума винеровского типа в этих точках.

Увеличение резкости изображения с помощью когерентного света. Мы моделировали на ЦВМ голографический метод устранения размытия изображения для предсказания ожидаемых характеристик в практических приложениях. Эти вычисления показали, что голографический метод обеспечит заметное улучшение разрешающей способности электронных микроскопов. Результаты моделирования (полученные на машине IBM 360/67 с объемом памяти в 768 килобит) приведены на рис. 5. Здесь показаны частотно-контрастные характеристики и соответствующие импульсные отклики для трех случаев, которые в настоящее время в электронной микроскопии считаются оптимальными.

Были рассмотрены чисто фазовые объекты, которые соответствуют прозрачным объектам в оптической микроскопии. Такая ситуация имеет место в электронной микроскопии для тонких образцов при очень высоких разрешениях, для которых увеличение контраста изображения особенно необходимо. При регистрации фазовых объектов обычно контраст отсутствует. В электронной микроскопии контраст достигается с помощью дефокусировки, и говорят, что изображение получается в «дефокусированном фазовом контрасте» (ДФК).

Естественно, что при этих условиях изображение становится размытым из-за дефокусировки. Кроме того, во всех фазоконтрастных изображениях (а такие методы существуют в электронной микроско-

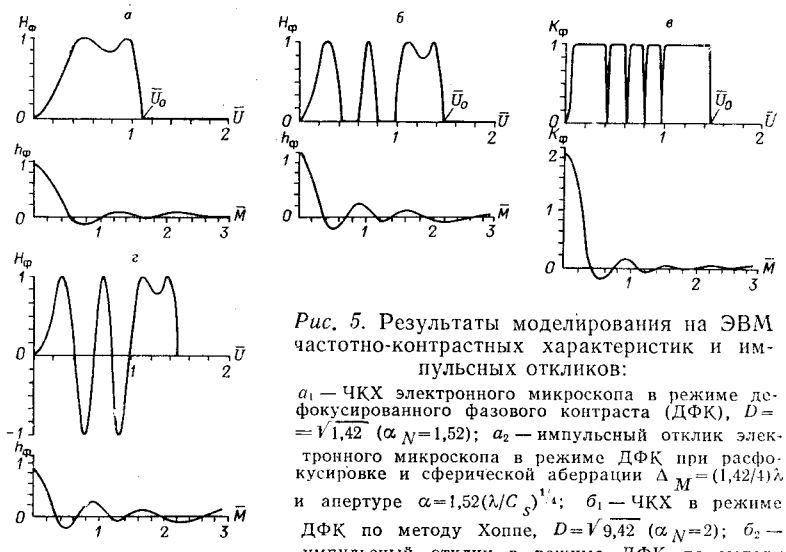

Рис. 5. Результаты моделирования на ЭВМ частотно-контрастных характеристик и импульсных откликов:

a_1 — ЧКХ электронного микроскопа в режиме дефокусированного фазового контраста (ДФК), $D=\sqrt{1{,}42}$ ($\alpha_N=1{,}52$); a_2 — импульсный отклик электронного микроскопа в режиме ДФК при расфокусировке и сферической аберрации $\Delta_M=(1{,}42/4)\lambda$ и апертуре $\alpha=1{,}52(\lambda/C_s)^{1/4}$; $б_1$ — ЧКХ в режиме ДФК по методу Хоппе, $D=\sqrt{9{,}42}$ ($\alpha_N=2$); $б_2$ — импульсный отклик в режиме ДФК по методу Хоппе, $D=\sqrt{9{,}42}$ ($\alpha_N=2$); $в_1$ — ЧКХ голографически восстановленной микрограммы в режиме ДФК, $D=\sqrt{9{,}42}$ ($\alpha_N=2$); $в_2$ — импульсный отклик голографически восстановленной микрограммы в режиме ДФК, $D=\sqrt{9{,}42}$ ($\alpha_N=2$); $г_1$ — ЧКХ размытой микрограммы в режиме ДФК, $D=\sqrt{9{,}42}$ ($\alpha_N=2$); $г_2$ — импульсный отклик размытой микрограммы в режиме ДФК при расфокусировке и сферической аберрации $\Delta_M=(9{,}42/4)\lambda$ и апертуре $\alpha\simeq2\times(\lambda C_s)^{1/4}$.

пии) отсутствует контраст при пространственных частотах, близких к нулевой, как это видно для всех случаев рис. 5. Однако оказывается, что голографическим методом можно обрабатывать расфокусированные электронные микрограммы (в них контраст намеренно введен с помощью дефокусировки) так, как будто бы они сфокусированы, в то же время сохраняя, а фактически улучшая контраст!

Это становится ясным из рассмотрения рис. 5. На рис. 5, *а* показана частотно-контрастная характеристика электронного микроскопа, работающего на пропускание, с малой апертурой (отношение диаметра к фокусному расстоянию объектива равно $6/10^3$). Видно, что частотно-контрастная характеристика ограничена областью от нуля до первого минимума. Соответствующий импульсный отклик показан ниже. Все импульсные отклики на рис. 5 нормированы, так что повышение их остроты представляет действительную ситуацию.

Кривые на рис. 5, *б* соответствуют методу Хоппе, в котором маска в виде зонной пластинки помещается в апертуру объектива для подавления всех отрицательных частей в передаточной функции. Это приводит к подавлению инверсий контраста, вызванных отрицательными частями функции. В результате оказывается возможным заметно открыть апертуру и улучшить импульсный отклик. Однако контраст все еще вызван дефокусированным фазовым контрастом, и изображение, таким образом, остается размытым.

В нашем методе [7] (см. рис. 5, *в*) берется расфокусированное изображение с какой угодно большой апертурой (например, как показано на рис. 5, *г*) и улучшается контраст изображения, как это продемонстрировано на рис. 5, *в*. Это достигается модификацией передаточной функции, которая приводит к более высокому и узкому импульсному отклику.

Оптическое вычисление в сравнении с цифровой обработкой изображений. Следует отметить, что при использовании ЦВМ для улучшения оптических изображений требуется значительная предварительная обработка (начиная с размытого транспаранта). Процесс устране-

ния размытия оптическим компьютером сводится к простой операции. Для этого достаточно поместить снимок в лазерный пучок, и улучшенное изображение мгновенно появляется на матовом стекле. Это изображение можно сфотографировать на пленку типа Поляроид, которая обычно используется в наших исследованиях. При обработке на ЦВМ требуется сначала провести поточечное сканирование размытого транспаранта с последующим применением аналого-цифрового преобразования для кодирования изображения. После предварительной обработки требуется много времени для вычисления.

Например, время вычисления матрицы, состоящей из $n \times m$ элементов при использовании мощного алгоритма Кули — Таки, пропорционально

$$n \log_2 m \times m \log_2 n$$

или

$$n \log_{10} m \times m \log_{10} n \times (\log_{10} 2)^{-2}$$

и, наконец,

$$10 n \lg m \times m \lg n.$$

Характерный пример изображений, которые улучшались цифровыми методами [8, 9], включает 32×128 элементов, в то время как изображения, которые улучшались голографическим методом, могут состоять из 250×250 или более элементов. Время обработки на ЦВМ изображения из 250×250 элементов возросло бы по сравнению с временем обработки изображения из 32×128 элементов в соответствии с формулой в $2 \times 62{,}3 = 125$ раз (множитель 2 учитывает двойное преобразование Фурье). Если время вычисления на быстродействующей ЦВМ для изображений из 32×128 элементов положить равным одной минуте, то мы увидим, что оно возрастает более чем до двух часов для изображений из 250×250 элементов, которые восстанавливаются оптически за секунды. Фактически ранние оценки [10] подразумевали, что ЦВМ потребуется десятки часов для обработки изображений в рассмотренных случаях. Другие отмечали [11], что для картины, состоящей из 1025 элементов в одной линейке, общий объем памяти быстро переполняется. Это оказывается справедливым даже для самых мощных машин, которые могут работать лишь с фрагментами изображения, а целое изображение получают последовательными частями. В [11] время обработки фотографии, состоящей из 1024×1024 элементов, оценивается в один час (время вычисления). Это было выполнено на ЦВМ по обработке лунных фотографий.

Ломан [9] указывает, что для обработки изображений на ЦВМ требуется 4—8 мин для вычисления (синтезированные голограммы) и 40 мин для вывода результатов. В других случаях [12] требуется время порядка 30 мин на обработку изображений. На вывод данных уходит один час.

Наконец, при сравнении обработки изображений с помощью ЦВМ и оптического компьютера нужно помнить, что фотометрирование размытого транспаранта при машинном методе вводит дополнительные ухудшения изображения даже по сравнению с уже размытой фотографией. Например, сканирование фотографии с амплитудным пропусканием $g(x, y)$ сканирующей функцией (комплексной) $s(x, y)$ приводит к интегралу свертки

$$s \otimes g$$

или

$$|s|^2 \otimes g.$$

Этот интеграл свертки существует даже при самых благоприятных условиях сканирования, например при сканировании лучом лазера. Соответственно спектр $G(u, v) = \mathbf{F}[g(x, y)]$ ($\mathbf{F}$ — пространственное пре-

образование Фурье размытой фотографии) дополнительно ухудшается передаточной функцией $S(u, v) = FT[s(x, y)]$. Например, в первом случае $G(u, v)S(u, v)$ представляет собой изображение, которое должно быть улучшено ЦВМ. Это различие практически может быть ощутимым. Известны и другие ухудшения, возникающие из-за определенного отношения диаметра сканирующего «пятна» к размеру зерна пленки, апертурных углов линз, используемых при формировании $s(x, y)$ и т. д. Все эти эффекты, включая частичную когерентность излучения, могут влиять на качество изображений, восстановленных при помощи ЦВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. W. M. Brown and L. J. Porcllo. An Introduction to Synthetic.— Aperture Radar.— IEEE Spectrum, 1969, v. 6, № 12.
2. G. W. Stroke. An Introduction to Coherent Optics and Holography, 2nd ed. New York: Academic, 1969.
3. G. W. Stroke. Image Deblurring and Aperture Synthesis Using a Posteriori Processing by Fourier — Transform Holography.— Optica Acta, 1969, v. 16, № 4.
4. G. W. Stroke. Diffraction Gratings.— Handbuch der Physik, v. 29, S. Flügge, ed. Berlin and Heidelberg: Springer Verlag, 1967, pp. 426—754.
5. G. W. Stroke and M. Halioua. A New Holographic Image Deblurring Method.— Phys. Letters, 1970, v. 33A, № 1.
6. G. W. Stroke and M. Halioua. A New Method for Rapid Realization of the High — Resolution Extended — Range Holographic Image — Deblurring Filter.— Phys. Letters, 1972, v. 39A, № 4.
7. G. W. Stroke and M. Halioua. Image Improvement in High — Resolution Electron Microscopy With Coherent Illumination (Low Contrast Objects) Using Holographic Image — Deblurring Deconvolution, III.— Optik, 1972, v. 35, 36.
8. A. W. Lohmann and D. P. Paris. Binary Fraunhofer Holograms Generated by Computer.— Appl. Opt., 1967, v. 6, № 10.
9. B. R. Brown and A. W. Lohmann. Computer — Generated Binary Holograms.— IBMJ. Res. Develop., 1969, v. 13, № 2.
10. R. W. Gerchberg and W. O. Saxton. Phase Determination From Image and Diffraction Plane Pictures in the Electron Microscope.— Optik, 1971, v. 34, July, pp. 275—284.
11. F. C. Billingsley. Image Processing for Electron Microscopy: II. A Digital System.— In Advances in Optical and Electron Microscopy, v. 4. R. Barer and V. E. Cosslett, eds. New York: Academic, 1971, pp. 127—160; see also Nathan R., "Image processing for electron microscopy: I. Enhancement procedures", p. 85—126.
12. L. B. Lessem and P. M. Hirsch. Computer Synthesis of Holograms for 3 — D Display.— Commun. ACM, 1968, v. 11, Oct., pp. 661—674.

Поступила в редакцию 16 апреля 1973 г.

УДК 772.99; 681.327.5

И. С. ГИБИН, М. А. ГОФМАН, Е. Ф. ПЕН,
П. Е. ТВЕРДОХЛЕБ
(Новосибирск)

АССОЦИАТИВНАЯ ВЫБОРКА ИНФОРМАЦИИ В ГОЛОГРАММНЫХ ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ

По принципу организации выборки информации известные запоминающие устройства (ЗУ) делятся на адресные и ассоциативные. Считывание информации в адресных ЗУ осуществляется путем обра-