

ДЖ. СТРОУК
(Нью-Йорк, США)

ОПТИЧЕСКАЯ И ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ *

Основные вопросы и некоторые ответы.

— Почему обращаются к «оптическим вычислениям» в 1976 г.?

— Зачем вообще «оптические вычисления»?

— Огромный успех цифровых ЭВМ продолжает расти и давать еще более удивительные результаты: появились микро-ЭВМ, библиотеки предварительно запрограммированных алгоритмов для наиболее массовых применений и т. д.

Казалось, что ответы на эти и другие родственные с ними вопросы никогда не будут ясны.

— «Оптические вычисления» — технология в поиске применений (или можно предложить что-то другое)?

— Почему не сделать это цифровым методом?

— «Оптические вычисления»: для оптических задач — да, ... но что хорошего даст это в других случаях?

— Почему этот, а не другой способ, например, цифровой или «гибридный» цифрооптический (оба этих метода рассматривались в большинстве подходов к «оптической цифровой машине» с самого начала ее короткой истории [1])?

Эти и многие другие вопросы являются насущными. Нередко спрашивают, когда же появятся реальные результаты «оптических вычислений», дающие часто единственно практическое или наилучшее в данный момент решение некоторых специальных задач, которым предшествовали годы исследований, разработок и попыток применения. И нередко подобные вопросы задают вначале специалисты, сторонники возможного альтернативного подхода, который, вероятно, еще далек от того, чтобы дать какие-либо сравнимые результаты.

Зачастую новые методы расцениваются как «невозможные» или «слишком сложные», а когда новые методы дают преждевременные реальные результаты, они расцениваются как «неверные». И наконец, когда все принимают новые методы как естественный подход, то разработка их расценивается как «тривиальная» в том смысле, что это было известно ранее.

— Какой точки зрения мы будем придерживаться в оценке «оптических вычислений»? Является ли это новой областью?

— Где же «оптические вычисления» имеют наибольший успех?

— Почему?

— Каковы истинные преимущества по сравнению с чисто «цифровыми» методами?

— И каковы перспективы на будущее?

— Должны ли мы переименовать область из-за нашего обычного применения «гибридного» цифрооптического подхода?

— Или нам следует подтверждать мнение, широко распространенное среди многих из нас, о том, что даже одна система, в которой применяются линзы, — наш главный элемент (вместе с голограммами) для важной группы двумерных пространственных преобразований

* Материалы статьи докладывались на Советско-американском семинаре по оптической обработке информации (Новосибирск, 10—16 июля 1976 г.).

2, 6] от Фурье и Аббе до лорда Релея, Майкельсона, Дюффо, Марешаля и Жакино. Вклады Рэстлера, Таунса, Басова и Прохорова в развитие оптической накачки и лазера, В. Л. Брэгга и Д. Габора в создание оптических преобразований и голографии являются главным краеугольным камнем большей части наших последних достижений. Мы должны также оценить значительный вклад смежных областей: электронной микроскопии (Руска фон Арден и недавно Оутли, Никсон, Пис и Крю), радиоастрономии (с принципами синтеза апертуры сэра Мартина Райли, перенесенными в оптику [7], следует назвать еще многих других выдающихся пионеров, включая Рона Брайсвелла [8]...), рентгеновской кристаллографии, получение изображений с помощью радара (см. [9, 10]), телевидения (Отт Х. Шэйд старший [11], А. Роуз [12]...) и, наконец, теории информации с ее бесчисленными ответвлениями и средствами, включая дистанционную связь и цифровую вычислительную технику [13, 14]. Недавний обзор [15] иллюстрирует применение многих из этих методов оптических вычислений совместно с новыми результатами решения реальных задач улучшения изображений и трехмерного восстановления в электронной микроскопии и рентгеновской кристаллографии.

Порядки величин. Какой параметр мог бы быть единственным, предусматривающим оптические вычисления или, в более широком смысле, некоторые аспекты «оптической обработки» (включая сбор данных, хранение, обработку, дистанционную связь и воспроизведение...) почти как необходимость?

Бесспорно, требуется огромное количество элементов изображения для достоверного получения высококачественного оптического изображения (оригинального документа, пейзажа или фотографии).

Легко можно показать, что нам необходимо, по крайней мере, 1000×1000 элементов (для сравнения скажем, что примерно 200 000 соответствует американскому стандарту телевизионного вещания) с 8 битами для передачи уровней яркости (256 уровней серого), чтобы дать хорошее изображение, т. е. примерно около 10^7 бит. Действительно, 1000×1000 элементов едва хватает, чтобы воспроизвести обычную машинописную страницу (всего 1 бит на элемент (черный или белый)), особенно, если мы включаем сюда не только очень высокий контраст, но и документы или пейзажи с более обычной средой, слабым контрастом и шумом. Последний опыт продемонстрировал, что требуется по крайней мере 1,5 млн. ($1,5 \times 10^6$) бит черных и белых данных (1 бит на элемент), чтобы воспроизвести машинописную информацию на странице $8,5 \times 11$ дюймов. Можно также сказать, что 100 млн. бит (10^8 бит) свидетельствуют о количестве информации, необходимой для верного описания высококачественного изображения или фотографии.

Между прочим, старая поговорка «одна картинка стоит тысячи слов» может показаться преуменьшением, поскольку 1000 слов в смысле теории информации не сделает картинки. Например, из 26 букв английского алфавита возможность получения $1/26$ буквы составит — $\log_2 1/26 = \log_2 26 = 3,332$ $\log_{10} 26 = 4,7$, т. е. 4,7 бит/буква (в среднем, скажем, 4 бит/буква). Если возьмем всего 25 бит/слово, то 1000 слов будет соответствовать 25 000 бит, что, в свою очередь, для черно-белого документа (1 бит на элемент) дает в среднем всего 160×160 элементов (это никак не соответствует 1000×1000 элементов, как упо-

миналось выше) или, если принять 8 бит/элемент для полутонового изображения, 1000 слов даст всего 56×56 элементов изображения, что воспроизведет малую часть картинки.

А как будет в случае «обработки» любых высококачественных 10^8 -битовых изображений? Рассмотрим, например, вид десверток для восстановления изображений в электронной микроскопии, где характер образцов и электронного микроскопа приводит к необходимости в качестве обычного метода работы получать изображения вне фокуса на расстоянии от 25 000 до 50 000 длин волн [1, 15, 16]. Это соответствует расфокусировке в 1 дюйм, равный 25,4 мм, в оптическом высоко-разрешающем микроскопе (!). Подобный режим работы известен как «расфокусированный фазовый контраст» и реализуется при использовании очень тонких образцов (порядка 5 нм) и напряжении электронного микроскопа от 100 до 125 кВ. Такой режим требуется для верного воспроизведения методом голографической десвертки «расшифрованных» изображений биологических образцов, таких как вирусы и т. д. Не следует удивляться, услышав, что изображения, полученные в совершенных электронных микроскопах, при такой огромной расфокусировке характеризуются полностью неразборчивым воспроизведением с размытием обычно хуже 2 нм; такие микроскопы способны при оптическом восстановлении [15, 16] давать изображения с дифракционными ограничениями по разрешению 0,24 нм.

Какова же скорость обработки и вывода изображений для оптических вычислительных машин (рис. 1)? Даже при $1000 \times 1000 = 10^6$ элементов с 8 битами уровней серого каждый оптическая вычислительная машина, которую мы применяем для обработки изображений с таким количеством информации, работает с удивительной ско-

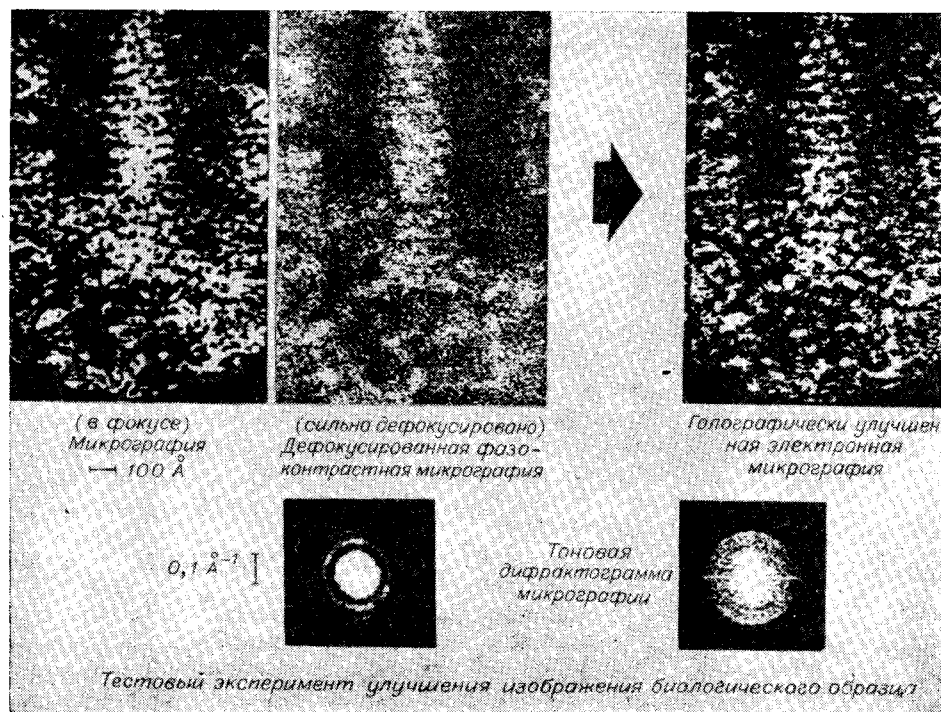


Рис. 1. Ранний пример голографического улучшения электронной микрографии биологического контрольного образца [1, 9, 15].

ростью обработки 600 Тбит/с (600×10^{12} бит/с) и со скоростью фотопечата-ния окончательно обработанных изображений, начиная с ввода, лучше чем 0,24 Гбит/с ($0,24 \times 10^9$ бит/с). Насколько известно, сейчас не только не существует, но даже нет проектов цифровой вычислительной машины, рассчитанной на такие скорости. И это не только хорошо известная возможность параллельной обработки, но и быстрое действие оптических линз, которые сами по себе обеспечивают фантастическую скорость обработки по сравнению с цифровыми методами.

Ключевым фактором мощности оптической вычислительной машины как системы является огромная и все-таки сравнительно дешевая способность фотографических эмульсий (пленок, пластинок) к хранению информации. Когда мы рассматриваем некоторые из наиболее усовершенствованных систем «массовой памяти» на магнитных кассетах (например, IBM 3850 или „Control Data 38 500“ с максимально возможной емкостью памяти 472 биллиона байтов (примерно 4×10^{12} бит), которые бы соответствовали несжатому хранению 2,5 млн. «черно-белых» машинописных страниц при стоимости 3 млн. долларов), тогда мы должны рассмотреть тот удивительный факт, что всего несколько „Mikroform Data Systems“ «ультраполосных» микрофишей могут хранить такое же количество информации об изображении при более низкой стоимости в виде микрофильма с возможностью хранения 2000 черно-белых страниц размером $8,5 \times 11$ дюймов на площади 1×5 дюймов, т. е. около $3 \cdot 10^9$ бит черно-белого изображения хранятся на одной такой ультраполоске. Уже самые первые системы обеспечивают автоматический машинный поиск и воспроизведение изображений с кассет, имеющих до 80 ультраполосок, т. е. 160 000 страниц, а совсем недавно появившиеся варианты, имеющие 1000 ультраполосок в двух вращающихся плоских каруселях, обеспечивают хранение порядка 2 млн. (2×10^6) страниц при стоимости полностью автоматических систем поиска и воспроизведения с индексным накоплением около 500 000 долларов, включая процесс автоматического микрофильмирования документов, по сравнению с тем, что одна только подобная система памяти с большой емкостью на магнитных дисках стоит около 3 млн. долларов.

Мы не можем представить здесь полного сравнительного анализа, касающегося таких систем с автоматическим хранением, поиском и отображением изображений, направленного на окончательное определение того, что может быть названо «автоматическими электронными файловыми и поисковыми системами», так как этот анализ, выполненный недавно коллективными усилиями, еще не опубликован. В качестве примера можно сказать, что среди многих сравнительных параметров полезной является способность полного хранения информации в несжатой форме, а также полная стоимость приобретения. Например, среди информации упомянутого типа, усовершенствованная система памяти на лазерном луче, созданная фирмой „Precision Instruments“, накапливающая информацию путем испарения родия, нанесенного на специально обработанную майларовую (пластиковую) ленту, может хранить в виде цифровых разрядов около 100 000 страниц (несжатых) на 80 лентах (до 300 000 страниц). В таком случае соотношение сжатия 3:1 можно было бы считать допустимым на практике, т. е. совокупность $1,3 \times 10^{11}$ бит можно было бы принять за основу для полностью «автоматической электронной файловой системы» (в этот термин входит сбор изображений, обработка, хранение некоторых теле-связей, поиск и воспроизведение) при стоимости, значительно меньшей 1 млн. долларов, в отличие от микрофотографической системы, например упомянутого типа, которая требует мокрой (химической) обработки пленок. Систему памяти на лазерном луче с необходимыми внеш-

ними устройствами ввода и вывода можно считать верным примером одной из нескольких, используемых в данный момент «электрооптических» автоматических электронных файловых систем, начиная от их лазерно-лучевых (или с помощью фотодиодных матриц) методов ввода документов сканированием и до высокоразрешающих дисплеев на ЭЛТ (электронно-лучевых трубках), пригодных для отображения изображений (и/или выдачи твердых копий). Для сравнения даже наиболее мощные дисковые системы емкостью 1 миллиард байт, появившиеся раньше, таких как IBM „Beamos“. Еще более подходящим, за исключением хорошо известных электромеханических проблем, были бы накопители на магнитных лентах, способные хранить до 60 000 нежатых страниц на одной кассете.

Короче, имея дело с данными в виде оптического изображения, необходимо хранить огромное число бит. Их последовательная обработка будет на несколько порядков медленнее, чем параллельная в случае применения линз.

Вопрос, следовательно, в том, какой из двух методов — «электрооптический» или «магнитный» — может быть более приемлемым или более полезным для решения такой задачи, как автоматическое электронное составление файла в ряде некоторых специальных приложений?

Ответить на этот вопрос нелегко с технической, рабочей или финансовой точек зрения, поскольку для этого надо рассмотреть все эти и многие другие параметры (включая человека-оператора и его мастерство). И окончательные технологические ответы, даже среди доступных уже, еще не все рассмотрены или приняты к рассмотрению. Например, микрофильм можно воспроизводить в непосредственном виде, но его также можно считывать с помощью специальных видиконов с высокой разрешающей способностью или высокоскоростными сканирующими лазерными устройствами, особенно принимая во внимание телесвязь и дистанционное отображение с помощью промежуточных цифраторов потоков данных. Наконец, по-видимому, будет мало сомнений о возможности решать одну и ту же проблему путем множества разных конкурирующих подходов и технологий: надежность, простота, размеры, стоимость, безопасность и многие другие сравнимые рабочие характеристики, включая коэффициент готовности, должны иметь, вероятно, гораздо более сильное определяющее значение, чем умозрительная или техническая утонченность. Кроме того, главным критерием будет постоянно оставаться способность решать требуемую задачу или выполнять необходимые операции.

Вероятно, именно с этой точки зрения «оптические вычисления» всегда останутся методом, который следует считать важным там, где надо записывать, хранить, обрабатывать, передавать или воспроизводить информацию в виде изображения.

И часто новые теоретические и/или экспериментальные достижения могут вызвать появление такого метода, как оптические вычисления, и дать возможность достичь более правомочного решения в тех областях, для которых он когда-то предназначался (можно сказать преждевременно), но не применялся, потому что не был полностью осуществим в то время.

Трехмерное восстановление — последнее применение оптических вычислений. Типичный пример можно найти в новом голографическом решении «оптических вычислений» для все еще достаточно сложной вычис-

лительной задачи цифрового преобразования Фурье и трехмерного восстановления в рентгеновской кристаллографии. Хотя восстановление распределения плотности электронов с атомными разрешениями в первой молекуле протейна, миоглобина (Кендрю и др.) заняло около 10 лет работы, увенчавшейся Нобелевской премией, и около 25 лет работы для связанного гемоглобина (Перуту), до сих пор существуют сотни таких макромолекул или «молекул жизни», представляющих биологическую важность для каждого человека, существенных для многих функций и структура которых, т. е. в конечном счете трехмерное оптическое изображение, остается неизвестной и недостижимой для современной науки и техники даже при использовании наиболее мощных цифровых ЭВМ.

Сейчас возможен новый шаг [15, 17] благодаря применению голографических методов хранения и вычисления, что позволяет сократить время вычисления и, кроме того, привести к непосредственному «оптическому» отображению атомов в трехмерной восстановленной структуре таких молекул в отличие от электронно-плотностных карт, которые для их получения требуют, как правило, от 6 мес. до одного года работы.

Трехмерное восстановление представляет большой интерес среди огромного множества различных областей [6, 18—29]. Рентгеновская кристаллография и электронная микроскопия являются двумя областями, где трехмерное восстановление является наиболее важным.

Можно показать, что восстановление трехмерных структур в рентгеновской кристаллографии и в электронной микроскопии [17] имеет некоторые основные сходства, которые можно использовать для уменьшения трудностей вычисления трехмерного Фурье-преобразования и проблем отображения путем сведения к серии двумерных оптических преобразований Фурье.

Это позволит получить некоторую практическую пользу, включая возросшую скорость восстановления и непосредственное воспроизведение «оптических изображений атомов» в структуре (в отличие от контуров плотности электронов), которую можно наблюдать посредством одной голограммы [15].

Верится, что метод голографического трехмерного отображения — главная ступень в оптическом восстановлении, начиная с работы В. М. Брэгга [30] и М. Дж. Бюргера [31], которые ввели его в кристаллографию, где, как мы показали [17], традиционные трудности, связанные с так называемыми оптическими преобразованиями [30—39], теперь можно преодолеть путем голографического построения сначала проекций в области Фурье, а из них (используя, если можно так выразиться, для удобства «теорему проектирования в Фурье-области» [17]) мы затем восстанавливаем нужные разъединенные участки в области реального пространства.

Нужные проекции в области Фурье записываются в виде голограмм (голограммы проекций в области Фурье [17]), которые можно создать цифровым вычислением в виде цифровых голограмм из обычной трехмерной рентгеновской дифракции и фазовых данных, имея в виду двумерное оптическое восстановление участков структуры, особенно параллельных участков, соответствующих «обобщенным проекциям» (так называемым «первым суммам Фурье» [17—15]), определенным ниже в уравнении (3). Альтернативно используя те же самые цифровые вычисления проекций голограмм в области Фурье из данных, полученных с помощью дифрактометра, связанного с ЭВМ, и определенных фазовых данных, можно создать нужные голограммы проекций в области Фурье с помощью гибридных цифровых или только оптических средств.

В рентгеновской кристаллографии имеется следующее соотношение трехмерного преобразования в области Фурье между распределением

плотности электронов в структурной области $\rho(x, y, z)$ и спектральным «коэффициентом» в Фурье-области $F(h, k, l)$:

$$\rho(x, y, z) = \sum_h \sum_k \sum_l F(h, k, l) e^{i2\pi(hx+ky+lz)}, \quad (1)$$

где структурно-пространственные оси (x, y, z) не прямоугольны, а оси области Фурье (h, k, l) тоже в основном не прямоугольные, а «взаимные», так что точка M в области структуры и точка P в области Фурье определяются векторами \overline{OM} и $\overline{O'P}$:

$$\overline{OM} = x\bar{a} + y\bar{b} + z\bar{c}; \quad (2)$$

$$\overline{O'P} = h\bar{a}^* + k\bar{b}^* + l\bar{c}^*,$$

где $\bar{a}\bar{a}^* = 1$, $\bar{b}\bar{b}^* = 1$, $\bar{c}\bar{c}^* = 1$ и

$$\bar{a}\bar{b}^* = \bar{a}\bar{c}^* = \bar{b}\bar{a}^* = \bar{b}\bar{c}^* = \bar{c}\bar{a}^* = \bar{c}\bar{b}^* = 0.$$

Первое суммирование в (1) для определенной $z = z_i = \text{constant}$ дает обобщенную проекцию, параллельную 1-му направлению на плоскость h, k , в виде

$$P_{z_i}(h, k) = \sum_l F(h, k, l) e^{i2\pi lz_i}, \quad (3)$$

которую можно назвать «проекцией в области Фурье» [17].

Как указывалось впервые в нашей работе [17], обычное трехмерное цифровое вычисление $\rho(x, y, z)$, согласно (1), можно заменить рядом двумерных преобразований Фурье, выполненных оптически, при условии, что они хранятся в виде ряда проекций области Фурье P_{z_i} в наборе соответствующих голограмм, которые называются «голограммы проекций в области Фурье». Это справедливо, так как двумерное оптическое преобразование Фурье для голограммы проекции в области Фурье $P_{z_i}(h, k)$ дает участок структурной области $\rho(x, y, z_i)$, параллельный плоскости x, y , согласно уравнению

$$\rho(x, y, z_i) = \sum_h \sum_k P_{z_i}(h, k) e^{i2\pi(hx+ky)}. \quad (4)$$

Новый оптический метод трехмерного восстановления [17, 15] основан на трех исключительных фактах:

а) двумерное оптическое преобразование Фурье, реализуемое оптически с помощью линз [40], используется для основных непрямоугольных «взаимных» координат, определенных (2), а также для обычных прямоугольных координат x, y и u, v [6а, 40];

б) участки структурной области $\rho(x, y, z_i)$ можно получить посредством двумерного оптического преобразования Фурье из двумерных проекций $P_{z_i}(h, k)$ в соответствии с «теоремой проекций области Фурье» (3), как впервые показано в нашей работе [17] (см. также [15]);

в) и наконец, обычное трехмерное цифровое вычисление преобразования Фурье, как правило, выполняемое в кристаллографии по найденным данным $F(h, k, l)$, можно свести к упрощенному процессу, состоящему из двух стадий: первого суммирования, выполняемого цифровым способом в соответствии с (3), и двумерного преобразования Фурье, выполняемого оптически, согласно (4), при условии, что комплексные проекции области Фурье $P_{z_i}(h, k)$, полученные в соответствии с (3), вначале хранятся в виде голограмм, которые называются «голограммы проекций области Фурье» [17, 15].

Дальнейшие теоретические подробности и результаты наших экспериментов появятся отдельным изданием [41].

Наконец, в случаях, когда с самого начала имеются доступные проекции в объектной (структурной) области (как, например, в электронной микроскопии, ультразвуковом или рентгеновском воспроизведении изображений, геофизике и т. д.), т. е. начиная с ряда проекций p_i трехмерной структуры $\rho(x, y, z)$, первое двумерное оптическое преобразование Фурье производит ряд центральных участков, проходящих через начало координат, в области Фурье X, Y, Z [17], например, в виде

$$S_0(X, Y, 0) = \iint p_0(x, y) e^{-i2\pi(xX+yY)} dx dy, \quad (5)$$

полученном для случая, когда $Z=0$. Эти участки после записи в отдельных голограммах используются для записи ряда голограмм проекций области Фурье по принципу «голографии суперпозиции» [42], из которых двумерное оптическое преобразование Фурье производит ряд центральных участков в области структуры x, y, z :

$$s_0(x, y, 0) = \iint S_0(X, Y, 0) e^{i2\pi(xX+yY)} dXdY \quad (6)$$

для нужного трехмерного восстановления, полученного при $z=0$. Можно выполнить ряд обобщенных проекций в заданном направлении, чтобы образовать ряд параллельных участков, перпендикулярных направлениям проекций [17, 15].

Оптико-цифровая обработка при устранении смаза в изображениях методами десвертки. На рис. 1 показано улучшенное изображение, которое можно легко получить, используя наш «оптический голографический фурье-метод устранения смаза в изображениях» [1, 15, 16]. В настоящее время подобные результаты в реальных применениях при использовании чисто цифровых методов обработки изображений еще не получены.

Вероятно, методы оптической десвертки еще на некоторое время останутся практическим методом для работы с высокой разрешающей способностью, несмотря на все увеличивающееся применение новейших поколений цифровых вычислительных машин и новых типов внешних устройств ввода-вывода и ЗУ, содержащих лазерные сканирующие устройства с высокой разрешающей способностью и дисплеи, о которых говорилось выше.

Возможности методов оптической десвертки можно, вероятно, показать на примере следующего анализа [15].

Во-первых, можно отметить, что применяемая сейчас обработка изображений с помощью цифровых ЭВМ включает операции сканирования исходного изображения, выходного отображения, цифрового вычисления и непременно использует какую-либо память.

Во-вторых, сейчас имеются системы развертки оптического сканирования, действующие в реальном времени, которые дают в результате непосредственно требуемое улучшенное изображение (такое, как показано на рис. 1) с использованием тех же типов входных и выходных сканирующих систем без необходимости использования каких-либо арифметических логических вычислительных элементов цифровых систем или каких-либо ЗУ или буферов [43, 44]. Это замечательное свойство оптических ЭВМ стало возможным благодаря применению мощных вычислительных возможностей линзовой фурье-голограммы [1].

Фактически оптическая ЭВМ является идеальной системой параллельной обработки такого типа, который пока еще недоступен для любого чисто цифрового применения; как указывалось выше, скорости обработки в 600 Тбит/с вполне типичны для оптических процессоров в режиме обработки изображений оптической ЭВМ, работающей в ре-

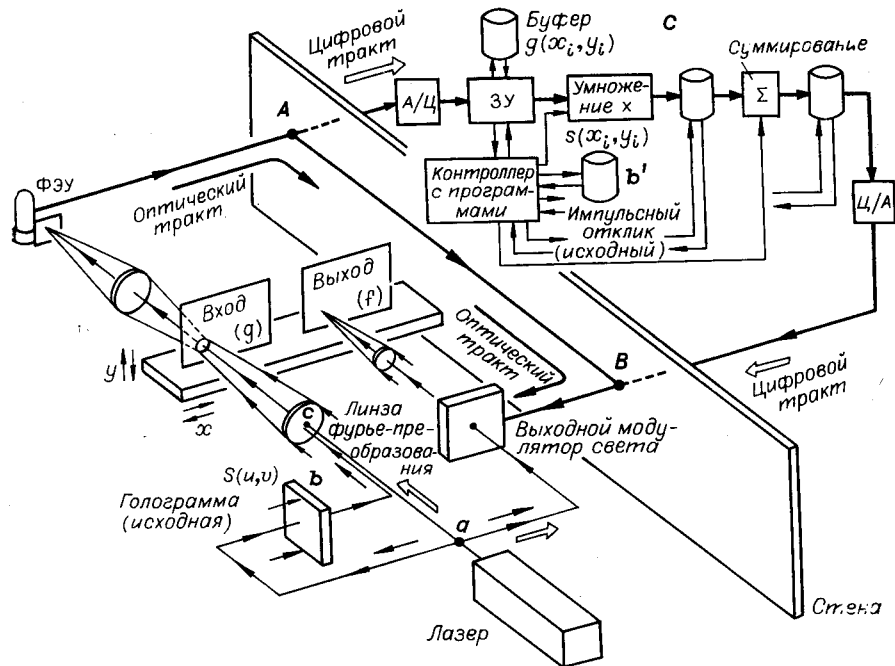


Рис. 2. Оптико-цифровая обработка изображений. (Схема служит для иллюстрации того, что процесс сканирования транспаранта (g) для А/Ц (аналого-цифрового) преобразования и цифровой обработки с A в качестве входа при освещении вдоль $a - c$ позволяет выполнить полную обработку изображений без какого-либо цифрового вычисления посредством освещения через инверсный голографический фурье-фильтр b , осуществляющий устранение смаза вдоль $a - b - c$.)

жиме сканирования; в отличие от цифровых процессоров изображений не нужна цифровая ЭВМ для выполнения десвертки в режиме "on line", т. е., в частности, не нужен ни блок арифметического логического цифрового вычисления, ни буферы, ни какие-либо другие системы памяти, которые необходимы при цифровой обработке изображений и все еще являются проблемой из-за большого числа бит, требуемых для описания оптического изображения. В оптической ЭВМ необходимые вычисления выполняются "on line" в реальном масштабе времени с помощью сканирующего лазерного луча во время его прохождения через линзу преобразования Фурье и фурье-голограмму, осуществляющую деление [1, 43, 44] без каких-либо дополнительных вычислений, т. е., по существу, с применением лишь небольшой части компонентов, необходимых в системе для цифровой обработки изображений (рис. 2).

Каким образом можно добиться этого? Наилучшим образом это можно показать с помощью нескольких простых уравнений, приведенных здесь для случая воспроизведения изображения в некогерентном режиме (например, при обычной фотографии сканирующим электронным микроскопом при работе на пропускание в режиме кольцевого детектора) [45, 15 и т. д.]. Обработка изображений в когерентном режиме, например, для электронных микрографий, записанных при расфокусировке фазового контраста в обычных отображающих электронных микроскопах с высокой разрешающей способностью (см. рис. 1), также сводится к этим уравнениям. Пусть

$$g(x', y') = \iint f(x, y) h(x' - x, y' - y) dx dy \quad (7)$$

представляет интенсивность на размытой фотографии, где $h(x, y)$ — функция размытия (импульсный отклик), а $f(x, y)$ — функция нужного

Затем сканируем фотографический транспарант, который пропускает пространственный вектор электрического поля, пропорциональный (7), с помощью бегущего когерентного луча лазера. Очертание светового пятна $s(x, y)$, образованного в фокальной плоскости линзы L_1 , можно представить как

$$s(x, y) = \text{сканирующая функция}, \quad (9)$$

так что пространственное электрическое поле, пропущенное через транспарант, будет

$$g(x, y) s(x' - x, y' - y). \quad (10)$$

Затем, используя линзу L_2 с точечной диафрагмой в фокусе и фотомножитель (ФЭУ), получают ток, пропорциональный

$$\begin{aligned} & \left[\iint g(x, y) s(x' - x, y' - y) e^{2\pi i(ux + vy)} dx dy \right]_{\substack{u=0 \\ v=0}} = \\ & = \iint g(x, y) s(x' - x, y' - y) dx dy = g \otimes s. \end{aligned} \quad (11)$$

Теперь, поскольку имеем

$$g \otimes s = f \otimes h \otimes s, \quad (12)$$

сразу же получаем нужную функцию f из уравнения

$$g \otimes s = f, \quad (13)$$

если $h \otimes s = \delta$ — функция, т. е. видно, что ток пропорционален f , как и требовалось, при условии, что выполняется уравнение (13). Следовательно, (13) определяет требуемый профиль функции сканирования $s(x, y)$, преобразование Фурье которого $S(u, v)$. Уравнение (13) можно записать в фурье-области в виде

$$HS = 1, \quad (14)$$

$$H(u, v) = \iint h(x, y) e^{2\pi i(ux + vy)} dx dy = F.T. [h(x, y)] \quad (15)$$

есть функция передачи контраста (ФПК) размытой фотографии $g(x, y)$. Другими словами, мы должны иметь

$$S(u, v) = \frac{1}{H(u, v)}. \quad (16)$$

Но оказывается, что $1/H(u, v)$ есть коэффициент пропускания голографического инверсного фурье-фильтра (holographic Fourier-transform division filter) [1]. Таким образом, видно, что требуемую функцию сканирования можно реализовать простым приемом, помещая голографический инверсный фурье-фильтр в параллельный пучок лазера, который применяется для формирования сканирующего пятна линзой L_1 (см. рис. 2) [15, 43, 44]. Как было бы в случае с цифровым дисплеем ЭВМ, фотоэлектрический ток (13) создается для того, чтобы модулировать интенсивность выходного точечного бегущего пятна одновременно с входным бегущим пятном $s(x, y)$, которое сканирует размытое изображение таким образом, что восстановленное изображение $f(x, y)$ записывается в реальном масштабе времени на выходе одновременно со входным сканированием. При этом нет необходимости в каком-либо другом вычислении или хранении, что, конечно же, потребовалось бы

(см. рис. 2) при одном и том же входном и выходном устройстве сканирования системы для цифровой обработки изображений.

Основной голографический инверсный фурье-фильтр [1, 15, 16, 40], который мы используем совместно с линзами в качестве процессора, работающего в реальном масштабе времени в режиме "on line", можно реализовать заранее в виде оптических транспарантов оптическим, цифровым или гибридным оптико-цифровым методом [1, 15, 16]. Его также можно реализовать в виде управляемой от компьютера голограммы, используя преобразователи, работающие в реальном масштабе времени, такие как „Lumatron“ (подробности о преобразователях в реальном масштабе времени см. в [1 и 4]).

Преимущества оптико-цифровых вычислений будут очевидны не только применительно к десвертке («просто никому не нужно то, что лежит за стеной, т. е. участок цифрового вычисления C » на рис. 2), но также, вероятно, будет очевидно, что существуют явные преимущества в цифровой обработке (используемой со сканирующими устройствами, бегущим пятном или матрицей и т. д.) в применении к основной области опознавания образов, включая анализ сцен, выделение особенностей и их использование в корреляциях и т. д. Например, цифровой метод оказывается хорошо подходит для решения некоторых простых задач, включая усиление [46], а также для случаев, когда сам исходный сигнал может уже быть электрическим и/или цифровым.

Таким образом, рис. 2 можно использовать для сравнения некоторых преимуществ оптико-цифровой обработки в режиме сканирования. Разумеется, оптическая обработка имеет ряд явных преимуществ, но и в чисто цифровой обработке можно выделить некоторые преимущества. Однако в отличие от широко распространенного мнения о возможностях ЭВМ среди тех, кто их использует, ясно, что преимущества чисто цифровой обработки изображений не настолько велики, как это можно предположить. Действительно, как отмечалось, из рис. 2 легко видеть, что весь участок цифрового вычисления и связанных с ним программ и ЗУ от A до B через C можно исключить, поскольку он не дает ничего участку оптической обработки от A до B . Только при условии, что ранее вычисленная голограмма b будет помещена между a и c , она соответствует ранее вычисленной цифровой функции импульсной характеристики b' .

Система на рис. 2 пригодна для выполнения в ее оптической части (в левой стороне от стены) следующих операций в пространственной области (т. е. изображения): свертки; корреляций (включая выделение особенностей); усиления края (derivations); усиления изображений (фильтрации нижних, верхних частот).

Показанная схема выполняет эти операции сканированием входного транспаранта и одновременно восстановлением выходного изображения. При этом полное время вычисления равно времени сканирования. Описанные здесь принципы позволили нам также показать теоретическую возможность реализовать двумерный оптический коррелятор, работающий в реальном масштабе времени в режиме „on line“ и способный выполнять корреляцию с помощью одной или множества хранимых двумерных стандартных функций за одно сканирование двумерной сцены бегущим пятном [15].

ПРИЛОЖЕНИЕ

Теорема отсчетов, выведенная при использовании теории оптического преобразования Фурье. Интересный пример возможности теории оптического преобразования Фурье для использования даже в неоптических задачах можно найти в применении свойства двумерного фурье-

преобразования линзы для прямого вывода известной теоремы отсчетов. Для простоты доказательство дается для одномерного случая.

Особый случай — синусоидально-модулированная функция. Пусть $F(u)$ — преобразование Фурье функции $f(x)$, т. е.

$$\int \int f(x) e^{2\pi i(ux)} = F(u),$$

которое записываем символически как

$$f(x) \longrightarrow F(u). \quad (17)$$

Это уравнение можно выполнить оптически, поместив транспарант в переднюю фокальную плоскость линзы L_1 , передавая волну с распределением пространственного вектора электрического поля $f(x)$ и наблюдая спектр $F(u)$ в задней фокальной плоскости линзы L_1 . Далее предположим, что спектр $F(u)$ «ограничен по полосе» и имеет полосу частот $2BW[F(u)]$.

Теперь пусть функция $f(x)$ модулируется синусоидальной функцией $f(x)[1 + \cos 2\pi x/X]$. Применяя преобразования Фурье (см. [6а], [8]), получаем

$$\begin{aligned} f(x)[1 + \cos 2\pi x/X] &= f(x) + 1/2f(x)e^{i2\pi x/X} + 1/2f(x)e^{-i2\pi x/X} \longrightarrow \\ &\longrightarrow F(u) + 1/2F(u-1/X) + 1/2F(u+1/X). \end{aligned} \quad (18)$$

Уравнение (18) показывает, что в задней фокальной плоскости линзы L_1 появляются три идентичных спектра $F(u)$: один, как и прежде, расположен в центре $u=0$, а два других — соответственно в $u=+1/X$ и $u=-1/X$. Ясно, что три спектра будут разделены (без перекрывания), если

$$1/X \geq 2BW[F(u)]. \quad (19)$$

Уравнение (19) — хорошо известная «теорема отсчетов». Вторая линза L_2 с ее передним фокусом, совмещенным с задним фокусом линзы L_1 , повторно изобразит исходную функцию $f(x)$ точно при условии, что центральный спектр $F(u)$ изолирован с помощью маски (блокирование двух спектров боковых полос), что можно легко реализовать, если выполняется уравнение (19).

Общий случай — дискретизация гребенкой Дирака. Здесь уравнения следующие:

$$f(x) \sum_{+\infty}^{-\infty} \delta(x - nX) \rightarrow F(u) \otimes \sum_{+\infty}^{-\infty} \delta(u - n \frac{1}{X}), \quad (20)$$

где \otimes — интеграл свертки, как и прежде (уравнение (7), (8)). Имеем (см., например, [1, 6а, 8])

$$F(u) \otimes \delta(u - \frac{1}{X}) = F(u - \frac{1}{X}). \quad (21)$$

Уравнения (20) и (21) показывают, что при дискретизации функции $f(x)$ гребенкой Дирака области Фурье получается ряд одинаковых спектров преобразования $F(u)$: один расположен в $u=0$, а другие — в $u=1/X$, $u=2/X$ и т. д. Спектры $F(u)$ будут разделяться опять при условии, что (19) выполнено.

«Теорема отсчетов», которая имеет легко выводимый двумерный эквивалент, конечно, представляет огромную важность при обработке и передаче изображений. Можно отметить, что BW есть предельная пространственная частота в оптике и что в основном 50% контраста было бы получено при $0,5 BW$, т. е. при $0,25 (1/X)$ или при $1/4$ «частоты отсчетов».

Эта работа получила поддержку от Национального научного фонда (NSF) (контракт ENG 75-20986 и MCS-76-11010) и от Национального

управления по авиации (NASA) (контракт NSG-07003). Часть этой работы является результатом совместной работы с проф. М. Галиовой, проф. В. Сринивасаном, д-ром Ф. Тони, д-ром Д. Виллахом. Последнее достижение в трехмерном восстановлении является результатом мысли, поданной д-ром Дж. Р. Пастой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Stroke G. W. Optical computing.—“IEEE Spectrum”, 1972, vol. 9, p. 24—41. (A digital Fourier transform image processing program first written by Stroke G. W. at M. I. T. in 1955 in view of the improvement of “blurred” spectra formed by imperfect diffraction gratings is described in the author’s article on “Diffraction Gratings” in the “Handbuch der Physik”, vol. 29, p. 426—754, Berlin: Springer Verlag, 1967; edited by Flügge S. It is also described in Stroke G. W. “Electronic Fourier Computing and Interferometry in Diffraction Grating Image Evaluation”, in Preprints of the Fifth Meeting of the International Commission for Optics (ISO). Stockholm, August, 1959).
2. Third international optical computing conference, Washington, D. C. 23—25, April, 1975 (Conference Digest and Proceedings available from the IEEE, IEEE Cat., N 75-CH0941-5C).
3. Kock W. E. and Stroke G. W.—“Appl. Opt.”, 1975, vol. 14, p. 2785.
4. Nesterikhin Yu. E., Stroke G. W. and Kock W. E., Editors. Optical Information processing. N. Y., Plenum Press, 1976.
5. Stroke G. W. Digital fourier-transform image processing program written in 1955 (see[1]).
- 6 a. Stroke G. W. An introduction to coherent optics and holography, Second Edition. N. Y., Academic Press, 1969.
- 6 b. Gabor D., Kock W. E. and Stroke G. W.—“Science”, 1971, vol. 173, p. 11.
7. Stroke G. W.—“Phys. Lett.”, 1969, vol. 30A, p. 485.
8. Bracewell R. The fourier transform and its application. N. Y., McGraw Hill, 1965.
9. Stroke G. W., Kock W. E., Kikuchi Y. and Tsujiuchi J., Editors. Ultrasonic imaging and holography-medical Sonar and optical applications. N. Y., Plenum Press, 1974.
10. Cutrona L. J., Leith E. N., Porcello L. J. and Vivian W. E.—“Proc. IEEE”, 1966, vol. 54, p. 1026.
11. Schade Otto H., SR. Image quality — a comparison of photographic and television systems. Princeton. N. J., RCA Laboratories, 1975.
12. Rose A. Vision-human and electronic. N. Y., Plenum Press, 1974.
13. Goldstine H. H. The computer from Pascal to von Neumann. Princeton, N. J., Princeton University Press, 1972.
14. Ulam S. M. Adventures of a mathematician. N. Y., Charles Scribner’s Sons, 1976.
15. Stroke G. W., Halioua M., Thon D. and Willasch D.—“Proc. IEEE”. (Jan., 1977) (Special issue on “Optical Computing”. Edited by S. Horvitz) (in print).
16. Stroke G. W., Halioua M., Thon F. and Willasch D.—“Optik”, 1974, Bd 41, S. 319.
17. Stroke G. W. and Halioua M.—“Trans. Amer. Cryst. Assoc.”, 1976, (in print): parts of this work were first presented by Stroke G. W. upon invitation at the Symposium on “Instrumentation for Tomorrow’s Crystallography” at the Meeting of the Amer. Cryst. Assoc. (19 Jan., 1976).
18. Farr J. B. Earth holography as a method to delineate buried structures p. 435—467 in “Acoustical Holography”. Vol. 6. Edited by Booth N. N. Y., Plenum Press, 1974.
19. Hounsfeld G. N.—“Brit. J. Radiology”, 1973, vol. 46, p. 1016.
20. Baum G. and Stroke G. W.—“Science”, 1975, vol. 189, p. 994.
21. Image processing for 2-D and 3-D reconstructions from projections: theory and practice in medicine and the medical sciences Digest. Stanford, Stanford Inst. for Electr. in Medicine and Optical Soc. Amer., 1975.
22. Budinger T. F., Krowe K. M., Cahoon J. L., Elischer V. P., Huesman R. H. and Kanstein L. L. in ref. [21].
23. Rosier D. J. De and Klug A.—“Nature”, 1968, vol. 217, p. 130.
24. Hoppe W., Langer R., Knesch G. and Poppe CH.—“Naturwissenschaften”, 1968, Bd 55, S. 333.
25. Crowther R. W., Rosier D. J. De and Klug A.—“Proc. Rev. Soc.” (London), 1970, vol. 317 A, p. 319.
26. Rosier D. J. De.—“Trans. Am. Cryst. Assoc.”, 1973, vol. 9, p. 1.
27. Hoppe W.—“Naturwissenschaften”, 1974, Bd 61, S. 239.
28. Tollin P., Main P., Rossmann M. G., Stroke G. W. and Restrict P. C.—“Nature”, 1968, vol. 209, p. 603.
29. Gabor D., Stroke G. W. et al.—“Phys. Lett.”, 1965, vol. 18, p. 116.
30. Bragg W. L.—“Nature”, 1939, vol. 143, p. 678.

31. Buerger M. J.—“Proc. Nat. Acad. Sci.” (USA), 1941, vol. 27, p. 117.
32. Buerger M. J.—“Proc. Nat. Acad. Sci.” (USA), 1950, vol. 36, p. 330.
33. Hanson A. W., Taylor C. A. and Lipson H.—“Nature”, 1951, vol. 168, p. 160.
34. Hanson A. W. and Lipson H.—“Acta Cryst.”, 1952, vol. 5, p. 362.
35. Lipson H. and Taylor C. A. X-Ray crystal structure determination as a branch of physical optics.—In: Progress in Optics. Vol. 5. Edited by Wolf E. Amsterdam, North Holland, 1966.
36. Lipson H. S., Editor. Optical transforms. N. Y., Academic Press, 1972.
37. Chaudhuri B., p. 71—113 in ref. [36].
38. Thompson B. J. The information content of optical diffraction patterns, p. 313—346 in ref. [4].
39. Taylor C. A. and Lipson H. Optical transforms— their preparation and application to X-Ray diffraction problems. Ithaca, N. Y., Cornell University Press, 1964.
40. Stroke G. W. and Halioua M. Optical foundation of digital communication and information processing, p. 281—312 in ref. [4].
41. Stroke G. W., Halioua M., Sarma R. and Srinivasan V. A hybrid optical-digital method for 3-D structure synthesis in X-Ray crystallography.—“J. Mol. Biol.” (in print).
42. Stroke G. W., p. 89—96 in ref. [6a] and Gabor D. et al in ref. [29].
43. Stroke G. W., Halioua M. and Indebetouw G.—“Phys. Lett.”, 1970, vol. 31 A, p. 341.
44. Stroke G. W., Halioua M., Indebetouw G. and Poisson F.—“Opt. Commun.”, 1970, vol. 1, p. 355.
45. Misell D. L., Stroke G. W. and Halioua M.—“J. Phys. D: Appl. Phys.”, 1974, vol. 7, p. L113.
46. Andrews H. C.—“Appl. Opt.”, 1976, vol. 15, p. 495.

Поступила в редакцию 26 июля 1976 г.

УДК 518 : 519.2

В. ПРАТТ

(Лос-Анджелес, США)

ПСЕВДОИНВЕРСНОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ *

Введение. Цифровые методы обработки широко применяются для восстановления размытых и зашумленных изображений [1]. Трудности возникают из-за большой размерности реальных изображений. Большая размерность приводит не только к увеличению времени обработки, но и к неустойчивости численного решения. Исследования последнего времени были направлены на разработку эффективных вычислительных алгоритмов, которые позволяют сократить время вычисления и преодолеть неустойчивость численного решения. Пратт и Давариан [2] предложили быстрый алгоритм для псевдоинверсного восстановления изображений, который дает значительное сокращение времени. Эндриус и Паттерсон [3—6] ввели разложение матриц по собственным векторам (SVD) как средство для выполнения псевдоинверсного восстановления изображений. С помощью этого метода путем последовательной процедуры восстановления можно избежать вредного влияния неустойчивости численного решения. Однако для вычислений необходимо большое время. В данной статье описывается быстрый SVD-алгоритм для восстановления изображения.

Псевдоинверсное восстановление изображений. Процесс формирования размытого изображения при наличии аддитивного шума моделируется системой

$$g = Bf + n, \quad (1)$$

* Материалы статьи докладывались на Советско-американском семинаре по оптической обработке информации (Новосибирск, 10—16 июля 1976 г.).