

Удаление частей диффузной голограммы приводит к совершенно иному эффекту. На рис. 15, а, б представлены модуль изображения исходного предмета и действительная часть, которая подтверждает диффузный характер освещения предмета. На рис. 15, в дан квадрат модуля преобразования Френеля. Характер искажений при удалении различных частей голограммы иллюстрирует рис. 15, г, д. Здесь, как и приводит к его большому мультиплицированию (см. рис. 7, г). Качество восстановленных картин при этом не ухудшается. Мультиплицирование слова SOS дано на рис. 16, в.

Эффект, к которому приводит нелинейное искажение, проиллюстрирован рис. 17. Эта картина получена по голограмме, значения в каждой точке которой заменены арифметическими значениями их квадратичного корня.

Примеры восстановления по голограммам, полученным при малых значениях координат (x_r, y_r) источника опорной волны, даны на рис. 18, 19. В этих случаях возникают искажения за счет наложения изображений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. Е. Вакман, Р. М. Седлецкий. Вопросы синтеза радиолокационных сигналов. М., «Сов. радио», 1973.
2. L. B. Lisen, P. M. Hirsh, J. A. Jordan. The kinoform: a new waveform reconstruction device.—“IBM Res. Dev.”, 1969, vol. 13, p. 150—154. («Зарубеж. радиоэлектроника», 1969, № 12, с. 41—49.)
3. D. Kermsch. Image reconstruction from phase information only.—“J. Opt. Soc. Amer.”, 1970, vol. 60, p. 15—17.
4. А. Папулис. Теория систем и преобразований в оптике. М., «Мир», 1971.
5. Т. Хуанг. Цифровая голография (обзор). Применение голографии. М. «Мир», 1973.

Поступила в редакцию 19 ноября 1976 г.

УДК 621.315.592 : 772.99

**В. П. КОРОНКЕВИЧ, А. Е. МЕЕРСОН, В. Г. РЕМЕСНИК,
Г. П. ЧЕИДО, А. М. ЩЕРБАЧЕНКО**
(Новосибирск)

СИНТЕЗ КИНОФОРМОВ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ

Киноформ — фазовый элемент переменной оптической толщины, преобразующий падающий на него волновой фронт света по заданному закону для получения изображения с минимальными потерями световой энергии. Изменения оптической толщины в киноформе не превышают длины волны и в общем случае рассчитываются с помощью ЭВМ. Для изготовления киноформа [1] фаза рассеянной волны вычисляется по модулю 2π и записывается на транспарант в виде изменения оптической плотности с помощью многоградационного самописца. Затем

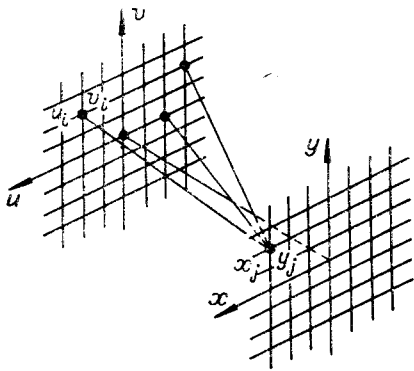


Рис. 1. Схема расчета киноформа.

Сильное изменение n позволяет получать в свете, прошедшем пленку, фазовые сдвиги до 2π при толщине слоя 8—10 мкм. Высокая разрешающая способность пленок дает возможность передавать тонкую структуру фазового рельефа. Фазовый рельеф можно создавать, перемещая пленку относительно лазерного пучка при помощи управляемого от вычислительной машины точного координатного стола. Все операции, связанные с уменьшением транспаранта и превращением амплитудного рельефа в фазовый, отпадают. Следовательно, рутинная работа по изготовлению киноформных элементов полностью осуществляется вычислительной машиной и многоградационным лазерным фотопостроителем.

Наши эксперименты были стимулированы задачами сейсмографии. Все математические модели приближены к ситуациям, имеющим место в практике сейсморазведки. В работе применялись модели расчета киноформов, дающих изображения в плоскости Фурье и области Френеля.

При расчете киноформов Фурье исходные объекты моделировались плоскими транспарантами с бинарным пропусканием и случайным распределением фазы, что в оптике соответствует освещению через матовое стекло. Как известно, распределение комплексной амплитуды поля в плоскости x, y (рис. 1), параллельной транспаранту, расположенному в плоскости u, v , с точностью до множителя представляет собой пространственный спектр Фурье функции объекта, вычисленный по координатам ξ, η в масштабе $\xi = x/\lambda z$, $\eta = y/\lambda z$, где ξ, η — пространственные частоты, λ — длина волны, z — расстояние от плоскости объекта до киноформа.

Сформировав исходный транспарант с помощью генератора случайных чисел и наложив условия на шаги дискретизации по координатам, рассчитывались действительная и мнимая части комплексной амплитуды с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье [2]. Вычисленная фаза поля, рассеянного транспарантом, выводилась на перфоленду для управления многоградационным лазерным фотопостроителем. В соответствии с определением киноформа амплитуды не учитывались.

Для моделирования киноформов Френеля применялась методика, предложенная в [3]. Все параметры расчета взяты из реальной задачи сейсморазведки. Объект представлялся в виде набора точечных источников, находящихся в земле на определенной глубине и излучающих монохроматические расходящиеся сферические волны. Поле от такого объекта вычислялось простым суммированием в плоскости киноформа

запись фотографически уменьшается и полученное фотоизображение отбеливается для получения фазового рельефа. Запись, фотографирование, проявление и отбеливание тщательно контролируются, для того чтобы изменения оптической толщины соответствовали вычисленным значениям фазы.

Многоступенчатый процесс изготовления киноформов может быть значительно упрощен, если использовать в качестве материала для записи тонкие пленки халькогенидных стеклообразных полупроводников. Под действием излучения в пленках происходит изменение показателя преломления на величину порядка $\Delta n = 0,1$.

(см. рис. 1). Набег фаз от i -го излучателя вычислялся по формуле

$$\varphi_j = R_i \pi + k r_{ij},$$

где R_i — случайное число из отрезка $(0, 1)$; $k = 2\pi f/v$ — волновое число (f — частота излучения, равная 50 Гц, $v = 2$ км/с — скорость распространения волн); r_{ij} — расстояние от i -го излучателя до точки (x_j, y_j) . Апертура состояла из 64×64 элементов, что при шаге между отсчетами $\Delta x = \Delta y = 15$ м соответствует размеру на местности 945×945 м; расстояние до исходного точечного объекта равно 750 м.

В третьем примере моделируется наиболее интересный для практического использования случай — дифракция сейсмических волн на ребре [4]. Сейсморазведка геологических структур типа выклинивающихся слоев и примыкающий различных границ имеет большое значение для поиска полезных ископаемых. Простейшими примерами таких структур являются клиновидные однородные среды с различными упругими свойствами, имеющими общую вершину (дифрагирующее ребро). В модели (рис. 2) на поверхности земли расположен источник сейсмических волн (источником может служить, например, взрыв). На глубине H находится выклинивающийся слой с хорошо отражающей горизонтальной верхней границей. Амплитуда и фаза отраженных и дифрагированных сейсмических волн регистрируется на поверхности набором сейсмодатчиков. Как и в предыдущих примерах, амплитуда поля при записи киноформов не учитывается.

Согласно представлениям, развитым в [4, 5], волновую картину для модели на рис. 2 можно рассматривать как наложение геометрооптических волн, осуществляющих перенос энергии в соответствии с классической лучевой теорией, и дифрагированных волн, возникающих за счет поперечной диффузии от границ тени геометрооптического поля. Каждая геометрооптическая волна (прямая, отраженная, проходящая) может быть представлена нулевым приближением лучевого ряда [6] и будет отлична от нуля только в своей «освещенной» области, которая отделена от остальной части пространства резкой границей тени. С каждой границей тени связана дифрагированная волна, которая компенсирует разрыв соответствующей части поля на этой границе.

При расчете киноформов мы использовали программу, реализующую частный случай алгоритма [4, 5] для определения поля дифракции сферической волны на идеально-отражающей границе в стационарном случае, когда коэффициенты отражения не зависят от угла. В точках пространства, удаленных от ребра, волновое поле может быть представлено в виде суммы

$$f = f_{\text{пад}} + f_{\text{отр}} + f_{\text{диф}} + f_{\text{фон}}, \quad (1)$$

где $f_{\text{пад}}$ — поле волны, излучаемой источником; $f_{\text{отр}}$ — поле отраженной волны; $f_{\text{диф}}$ — часть поля дифрагированной волны, компенсирующая разрыв отраженной волны на границе геометрической тени; $f_{\text{фон}}$ — часть поля дифрагированной волны, непрерывная на границе тени.

Киноформы получены для случаев, когда суммируются все члены формулы (1) и два первых члена не учитываются. Размер апертуры в расчетах $64 \times 64 = 1260 \times 1260$ м; частота $\Omega = 62,5$ Гц; скорость распространения волн $v = 2500$ м/с; глубина ребра $H = 500$ м; расстояние между сейсмодатчиками $\Delta x = \Delta y = 20$ м.

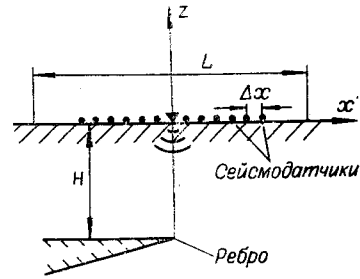


Рис. 2. Модель среды (вертикальный разрез). Черный треугольник — источник, расположенный в начале координат.

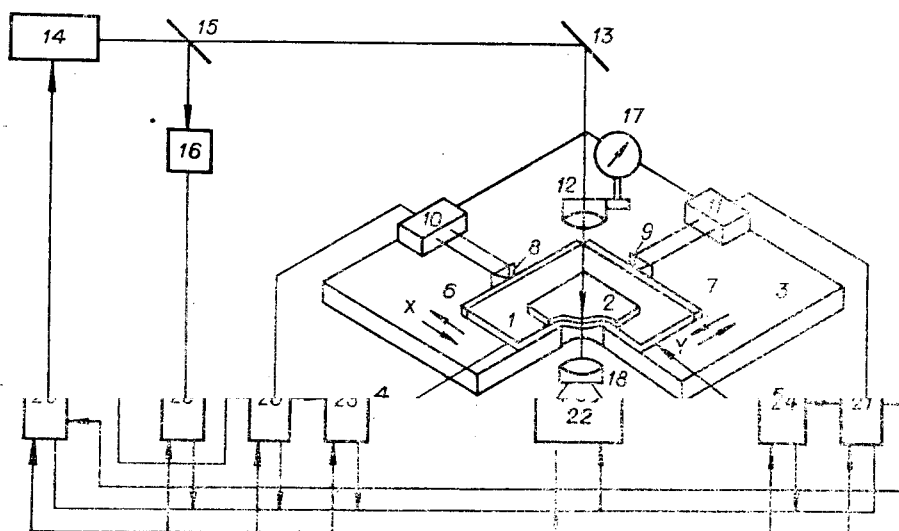


Рис. 3. Структурная схема многоградационного лазерного фотопостроителя.

Запись киноформов осуществлялась с помощью многоградационного лазерного фотопостроителя. Принцип записи основан на перемещении светочувствительного материала (халькогенидной пленки) относительно сфокусированного лазерного пучка. Управление перемещением пленки и интенсивностью пучка лазера осуществляется с помощью ЭВМ.

Основу многоградационного лазерного фотопостроителя составляли механические, электронные и оптические блоки разработанного в Институте автоматики и электрометрии СО АН СССР фотограмметрического автомата [7]. Фотопостроитель (рис. 3) содержит каретку 1 с установленным на ней светочувствительным материалом 2, которая перемещается в горизонтальной плоскости по направляющим, смонтированным на массивном основании 3. Каретка приводится в движение двумя электродвигателями постоянного тока 4, 5. Вдоль двух сторон каретки закреплены измерительные направляющие 6, 7, с которыми контактируют угольковые отражатели 8, 9 двух лазерных интерферометров 10, 11. Оси интерферометров, вдоль которых перемещаются угольковые отражатели, направлены по нормали к измерительным направляющим. Оптическая система 12 с помощью зеркала 13 фокусирует пучок аргонового лазера 14 на поверхность халькогенидной пленки. Для контроля мощности часть излучения ответвляется светоделителем 15 на фотоприемник 16. Система 12 установлена на воздушных подшипниках, обеспечивающих перемещение ее вдоль визирной оси. Специальная оправа объектива через воздушную подушку опирается на пластинку 2 со светочувствительным материалом. Следящая система, содержащая пневматический усилитель, обеспечивает поддержание заданного расстояния между объективом и материалом. Контроль перемещения оптической системы вдоль оптической оси производится по микронному индикатору 17. Изображение светового пятна лазера

через систему 18 проектируется на экран 19. Перемещение каретки 1 с помощью лазерных интерферометров 10, 11 и блоков 20, 21 преобразуется в цифровой двоичный код. Каждый из блоков преобразования величины перемещений в цифровой код содержит три реверсивных счетчика. Первый счетчик фиксирует код положения каретки относительно нулевой реперной точки, второй — код величины перемещения каретки относительно координаты, регистрируемой первым счетчиком, и, наконец, третий — квантует величину перемещения с заданным шагом дискретизации. ЭВМ «Минск-22» производит запись и считывание кодов из первого и второго реверсивных счетчиков и задает требуемый коэффициент деления для третьего счетчика. Блоки преобразования величины перемещения в цифровой код 23, 24 подключены к блокам управления электродвигателями, на которые поступают сигналы величины рассогласования и сигналы лазерных интерферометров, пропорциональные скорости движения каретки.

Блоки управления электродвигателями осуществляют перевод каретки в любое заданное положение в двух режимах: режиме движения с постоянной скоростью и в режиме позиционирования. В режиме позиционирования перевод каретки в заданное положение производится с погрешностью 0,32 мкм.

Режим движения каретки с постоянной скоростью реализуется вычислительным устройством пропорционального управления. Скорость движения каретки соответствует коду числа, поступающего от ЭВМ во второй реверсивный счетчик, который в этом режиме является регистром, так как его код заблокирован. Остановка каретки производится по команде ЭВМ, которая во время движения осуществляет опрос счетчиков, фиксирующих код координат каретки, и вычисляет значение величины перемещения относительно исходной точки, принятой за начало координат.

Блок управления модулятором лазера 25 работает в непрерывном или импульсных режимах. Число уровней квантования интенсивности равно 1024. Максимальная частота включения лазера 5 кГц. Блок 26 преобразует сигнал излучения лазера, воспринимаемый фотоприемником 16, в цифровой код. Число уровней квантования равно 128. Максимальное быстродействие 20 кГц. Погрешность преобразования 1%.

Для записи фазового рельефа светочувствительный материал закрепляется на каретке, которая выводится в заданную точку, принимаемую за начало отсчета координат. В этой точке производится установка всех счетчиков блоков 20, 21 в исходное состояние, затем по программе ЭВМ каретка начинает движение с постоянной скоростью в направлении оси X (см. рис. 3). При движении каретки по строке через заданные приращения длины по координате X производится импульсное включение лазера, интенсивность излучения которого задается ЭВМ. После экспозиции очередной строки каретка перемещается вдоль оси Y в режиме позиционирования. Затем при выключенном лазере каретка возвращается по оси X в начало следующей строки. Время записи фазового рельефа с числом элементов 64×64 при размере одного элемента 20×20 мкм² составляет 3 мин.

Светочувствительным материалом для записи служили тонкие пленки халькогенидных стеклообразных полупроводников, которые ранее уже применялись для записи киноформных оптических элементов [8, 9]. Пленки готовились электронно-лучевым испарением в вакууме предварительно синтезированного материала As_2S_3 на подложки из полированного стекла. Толщина напыленных пленок равнялась 10 нм. При экспонировании пленок излучением аргонового лазера ($\lambda = 0,51$ мкм) в пленках происходят фотоструктурные изменения. В результате наблюдается сдвиг края основного поглощения в длинноволновую сторону и значительное увеличение показателя преломле-

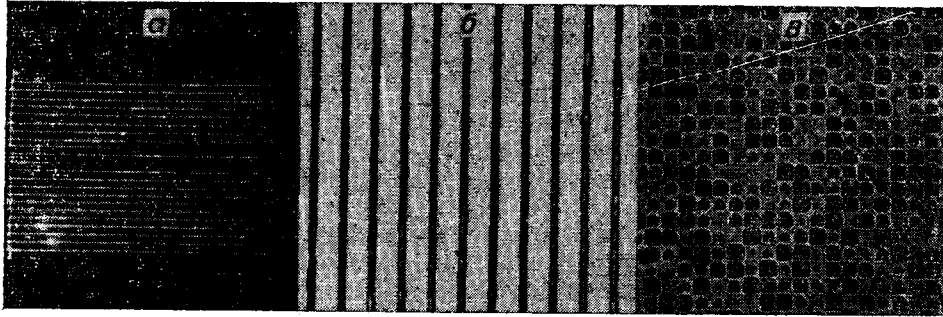


Рис. 4. Микрофотография объектов, записанных с помощью фотопостроителя: *a* — амплитудная решетка, записанная испарением алюминия, напыленного на стекло (шаг решетки 20 мкм); *b* — фазовая решетка на халькогенидной пленке (шаг решетки 5 мкм); *v* — фрагмент дискретной фазовой записи на халькогенидной пленке (размеры элементов 20×20 мкм; сдвиг фазы в элементах от 0 до 2π).

ния ($\Delta n \sim 0,1$) в широкой области спектра [9]. Для излучения He-Ne лазера ($\lambda = 0,63$ мкм) пленки прозрачны и в записанных участках наблюдается практически чисто фазовая модуляция. Так как фотоструктурные изменения происходят непосредственно в процессе экспонирования, пленки не требуют дополнительной обработки, т. е. позволяют работать в реальном масштабе времени.

Для определения характеристики фотоотклика пленок измерялся получаемый сдвиг фазы в зависимости от величины экспозиции. При постоянной длительности записывающего импульса строилась зависимость величины сдвига фазы от интенсивности записывающего пучка, которая задавалась управляющим напряжением от ЭВМ. Сдвиг фазы определялся при помощи микроинтерферометра. Полученная зависимость аппроксимировалась функцией

$$\varphi = A_0 [1 - \exp(\alpha - \beta U)], \quad (2)$$

где φ — сдвиг фазы в облученном участке; A_0 , α , β — константы; U — напряжение управляющего кода.

Многоградационный лазерный фотопостроитель позволяет с высокой точностью осуществлять непрерывную и дискретную запись оптической информации. В качестве иллюстрации на рис. 4, *a* показана микрофотография решетки, записанной на тонком слое алюминия, напыленном на стеклянную подложку. Запись осуществлялась испарением алюминия с помощью сфокусированного луча аргонового лазера. Шаг решетки 20 мкм. По фотографии виден характер передвижения образца: движение по строке, возвращение и переход на следующую строку. Прерывистость линий зависит от равномерности передвижения стола и стабильности фокусировки записывающего луча.

На рис. 4, *b* приведена микрофотография участка халькогенидной пленки с записанной на ней фазовой решеткой. Запись производилась в режиме равномерного движения образца. Шаг решетки 5 мкм. Толщина пленки 6 мкм. Ширина фазовых штрихов не превышает 1,5 мкм.

В режиме дискретной записи можно синтезировать фазовые голограммы и киноформы. На рис. 4, *v* показана микрофотография халькогенидной пленки с дискретной фазовой записью. Для этого на пути пучка аргонового лазера (см. рис. 3) помещается маска с квадратным отверстием. Изображение квадрата проектируется с уменьшением на халькогенидную пленку. Контроль фокусировки осуществляется по изображению на экране 19. Размеры записываемых квадратов составляли 10, 20 и 40 мкм. Сдвиг фазы в квадрате задается ЭВМ и варьируется от 0 до 2π.

Для проверки правильности фазового рельефа при синтезе киноформ на пленке записывался тестовый фазовый треугольник. При идеальной записи фаза в треугольнике должна линейно возрастать и резко обрываться при достижении 2λ . На рис. 5, *a* приведена микрофотография одного из экспериментальных тестовых треугольников, полученная с помощью шпринг-микробиинтерферометра.

В качестве первого объекта для синтеза Фурье-киноформа использовалось изображение, показанное на рис. 5, *b*, которое состояло из массива 64×64 точек. На рис. 5, *в* приведено обратное восстановление объекта только по фазе, выполненное на ЭВМ. Микрофотография внешнего вида синтезированного Фурье-киноформа, состоящего из 64×64 элементов, приведена на рис. 5, *г*. Размеры киноформа $0,64 \times 0,64$ мм². Восстановление изображения при освещении киноформа гелий-неоновым лазером дает размноженное изображение (см. рис. 5, *д*). Размножение возникает за счет дифракции света на мозаичной структуре киноформа. Фрагмент восстановленного изображения приведен на рис. 5, *е*.

Рис. 6, *a—в* иллюстрирует изображение другого объекта. Число элементов при расчете и записи Фурье-киноформа равно 64×64 . На рис. 7, *a, б* показан результат машинного восстановления изображения по фазе и оптического восстановления изображения для Фурье-киноформа, состоящего из 128×128 элементов.

Восстановление изображения в области Френеля приведено на рис. 7, *в*. Модель расчета соответствовала реальным условиям сейсморазведки. Объект состоит из 32 точечных излучений, число элементов киноформа равно 64×64 , расстояние от апертуры до объекта порядка размеров апертуры.

На рис. 8 приведены результаты оптического восстановления изображений по модели дифракции акустических волн на ребре, представляющей интерес для длинноволновой голографии. Апертура киноформов равнялась 64×64 элементов. При восстановлении изображений применялась линза, позволяющая получать на экране увеличенное мнимое изображение, формируемое киноформами. Изображение в плоскости, соответствующей расположению ребра, показано на рис. 8, *a*. На двойной глубине восстанавливается изображение мнимого источника (см. рис. 8, *б*), возникающее за счет зеркального отражения от границы раздела. Обе фотографии относятся к случаю, когда учитываются все члены формулы (1). Рис. 8, *в* иллюстрирует оптическое восстановление, когда не учитываются прямая и отраженная волны. Наблюдается раздвоенное изображение, возникающее в дифракции Зоммерфельда на ребре. Отсутствие этого раздвоения на рис. 8, *a* объясняется тем, что $f_{отр} \gg f_{диф}$. На двойной глубине при отбрасывании прямой и отраженной волн вместо мнимого источника наблюдается каустика дифрагированной волны (см. рис. 8, *г*).

Для сравнения на рис. 9, *a—г* приведены результаты численного восстановления изображения по амплитуде и фазе для модели дифракции на ребре, любезно предоставленные нам В. Г. Хайруковым и Г. М. Цибульчиком. Как видим, наблюдается большое сходство численного и оптического восстановлений изображения.

Переходя к обсуждению представленной работы, хочется подчеркнуть, что предложенный метод синтеза киноформов новый и нами приняты лишь первые пробные эксперименты в этом направлении. В работе рассмотрены изображения, восстановленные с киноформов, состоящих из 64×64 элементов, и только в одном случае апертура составляла 128×128 . Несмотря на отсутствие избыточности в наших киноформах, качество восстановленных изображений вполне приемлемо. Для сравнения напомним, что, например, в работе [1] при синтезе киноформа вводилась избыточность, равная 2500. Следует отметить,

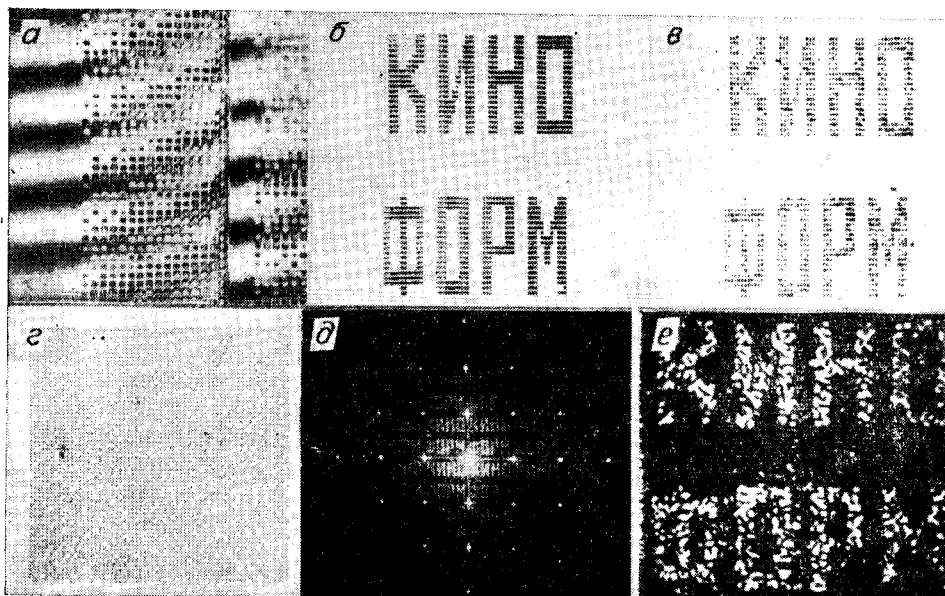


Рис. 5. Синтез киноформа на халькогенидной пленке:
a — микрофотография участка пленки с записанным тестовым треугольным профилем для контроля фазовой записи (сдвиги интерференционных полос соответствуют сдвигам фазы); *б* — исходное изображение из 64×64 элементов; *в* — численное восстановление изображения по фазе; *г* — киноформ на халькогенидной пленке, состоящий из 64×64 элементов; *д* — оптическое восстановление изображения; *е* — фрагмент оптического восстановления.

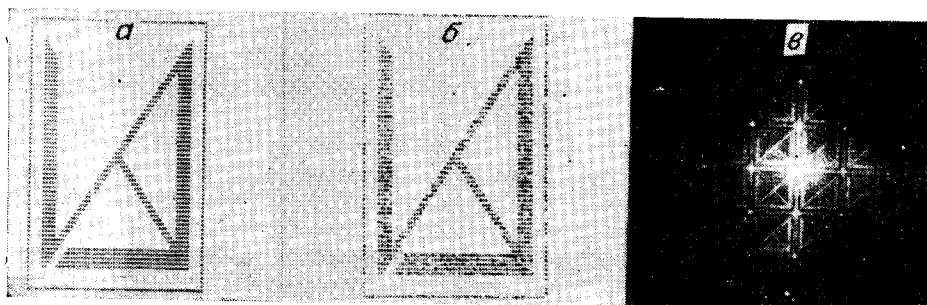


Рис. 6. Фурье-киноформ из 64×64 элементов:
a — исходное изображение; *б* — численное восстановление по фазе; *в* — оптическое восстановление изображения.

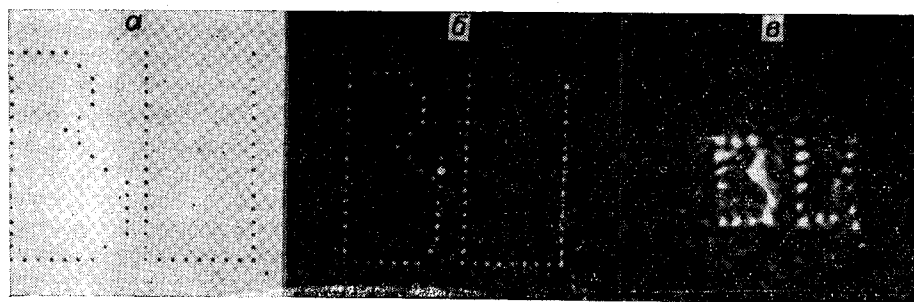


Рис. 7. Изображения, восстановленные с киноформов:
a — численное восстановление изображения по фазе с Фурье-киноформа из 128×128 элементов; *б* — оптическое восстановление изображения с Фурье-киноформа из 128×128 элементов; *в* — оптическое восстановление изображения с киноформа Френеля апертуры 64×64 . Исходный объект расположен на глубине порядка размеров апертуры.

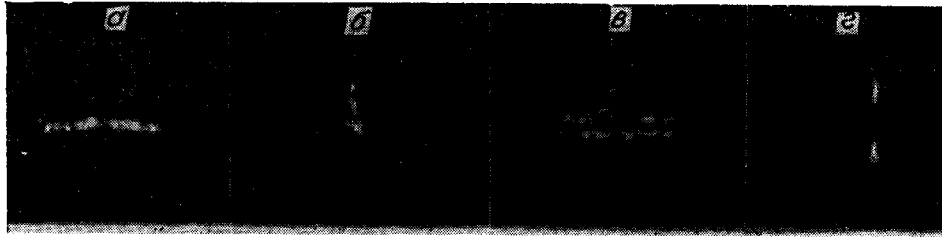


Рис. 8. Оптическое восстановление изображения по модели дифракции акустических волн на ребре:

a — дифрагирующее ребро; *б* — мнимый источник, возникающий на двойной глубине из-за отражения от границы раздела; *в* — дифрагирующее ребро в случае, когда не учитываются прямая и отраженная волны формулы (1). Раздвоение соответствует дифракции Зоммерфельда на ребре; *г* — каустика дифрагированной волны, возникающая на двойной глубине вместо мнимого источника в случае неучета прямой и отраженной волн.

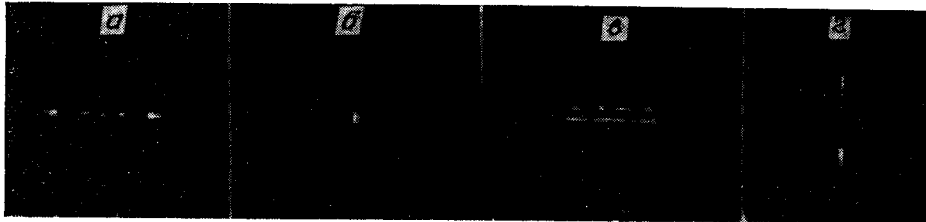


Рис. 9. Численное восстановление изображения, соответствующее рис. 8.

что по ряду причин нам не удалось «выдержать фазу» при записи киноформов (см. рис. 4, *a*), хотя эта часть вполне контролируема.

В последнее время среди исследователей, занимающихся задачами формирования в оптических изображениях, получает распространение мнение о бесперспективности оптического восстановления по сравнению с численным. Думается, что этот пессимизм связан с технологическими трудностями регистрации синтезированных фазовых голограмм на известных средах. Вместе с тем, общеизвестны и бесспорны преимущества оптического восстановления перед численным. К ним следует отнести возможность получения трехмерных изображений, что является необходимым во многих задачах, например при индикации трехмерных изображений на выходе ЭВМ; возможность обработки больших массивов информации, что при численном восстановлении ограничивается памятью и быстродействием современных вычислительных машин; возможность гибко сочетать синтез голограмм и киноформов с последующей оптической обработкой. В задачах сейсмо- и акустоглографии при условии регистрации волновых полей на достаточно большой апертуре и использовании достаточно коротких длин волн оптическое восстановление может быть просто незаменимым. Хочется надеяться, что эта работа приведет к некоторому прогрессу в области оптической обработки неоптической информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. L. B. Lesem, P. M. Hirsch, J. A. Jordan, Jr. The kinoform: a new wavefront reconstruction device.— "IBM J. Res. and Develop.", 1969, vol. 13, № 2, p. 150.
2. J. W. Cooley, J. W. Tukey. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series.— "Math. Comput.", 1965, № 19, p. 297.
3. А. Е. Меерсон, Г. М. Цибульчик. Некоторые численные эксперименты по синтезу сейсмических голограмм.— В кн.: Акустические методы и средства исследования океана. Владивосток, Изд. ДВПИ, 1974.

4. К. Д. Клем-Мусатов, Г. Л. Ковалевский, В. Г. Черняков, Л. Г. Максимов. Математическое моделирование дискретного автомата. — «Автометрия», 1974, № 4, с. 83.
8. V. P. Koronkevich, G. A. Lenkova, I. A. Mikhaltsova, V. G. Remesnik, V. A. Fateev, V. G. Tsukerman. Kinoform optical elements. — In: Optical Information Processing. Eds. Yu. Nesterikhin, G. W. Stroke, W. E. Kock. N. Y. and London, Plenum Press, 1976, p. 153.
9. В. П. Коронкевич, В. Г. Ремесник, В. А. Фатеев, В. Г. Цукерман. Киноформные оптические элементы на пленках халькогенидных стеклообразных полупроводников. — «Автометрия», 1976, № 5, с. 3.

Поступила в редакцию 18 ноября 1976 г.
