

Б. Ф. ФЕДОРОВ Л. М. ЦИГУЛЬСКИЙ

Голография



ББК 22.343.4

Ф 33

УДК 778.38

Рецензенты: Л. Д. Бахрах, член-корр. АН СССР, Л. П. Лазарев, профессор,
д-р техн. наук

Федоров Б. Ф., Цибульский Л. М.

Ф 33 Голография. — М.: Радио и связь, 1989. — 144 с.: ил. —
(Межизд. серия "Научно-популярная библиотека школьника")
ISBN 5-256-00229-5.

В доступной форме излагаются основы физической и цифровой голографии, история возникновения, техника получения физических голограмм, методы расчета на ЭВМ синтезированных голограмм, а также практическое применение голографии в различных сферах человеческой деятельности.

Для школьников старших классов.

2302030100-146
Ф 046 (01)-89 92-89

ББК 22.343.4

ISBN 5-256-00229-5

© Издательство "Радио и связь", 1989.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Около пятнадцати лет назад в одном из павильонов ВДНХ СССР посетители любовались шапкой Мономаха и бесценными сокровищами Московского Кремля, находящимися в большой золотой чаше. Зрителям были представлены не сами сокровища, а их голограммы. Качество изображения, объемность и цвет были настолько реальны и впечатляющи, что многие из посетителей пытались потрогать "экспонаты" руками. Каково же было их удивление, когда они видели свою руку в золотой чаше, но ничего не осязали!

Голография позволила продемонстрировать многим тысячам людей скифское золото, крупнейшие алмазы, драгоценности, уникальные изделия старинных мастеров из серебра и хрусталя. Простое тиражирование голограмм дало возможность одновременно демонстрировать сокровища в разных уголках нашей страны.

История развития голографии прошла три этапа. Начало первого относится к 1948 г., когда Деннис Габор, венгр по национальности, работая в английской фирме над усовершенствованием электронного микроскопа, открыл принципы голографии — двустадийной записи и воспроизведения изображения, для чего требовался монохроматический источник света, в качестве которого использовали ртутную дугу высокого давления. Ее излучение не отличалось высокой когерентностью, и поэтому восстановленное изображение было низкого качества. В научной статье Д.Габор четко изложил принципы голографии.

Второй этап развития голографии связан с созданием в 1960 г. газового лазера видимого излучения с высокой степенью когерентности. Два инженера — И. Лейт и Ю. Упатниекс, используя принципы однополосной модуляции в технике связи, применили наклонный пучок света, создающий когерентный фон, чем полностью устранили недостатки первоначального эксперимента Д. Габора. С помощью двухлучевой голограммы они продемонстрировали высококачественное трехмерное изображение предметов, подтвердив предсказание Габора. Качество изображения было таким высоким, а объемность была настолько реальной, что для того, чтобы подробнее рассмотреть левую или правую сторону предмета, достаточно было сместить голову в этом направлении. Приоткрывалась другая, невидимая ранее, сторона предмета. Это очень впечатляло! Многие ученые и инженеры увлеклись голографией, началось ее победное шествие по многим лабораториям мира. С помощью голографии надеялись решить многие проблемы: автоматическое распознавание, объемное кино, объемное телевидение. Сенсационным статьям журналистов (далеких от подлинной науки) не было конца. Прогнозы — один заманчивее другого! А широкое внедрение голографии задерживалось из-за ряда технических трудностей. Не было еще лазеров с высокой степенью когерентности, не было фотоматериалов с высочайшей разрешающей способностью при

требуемой чувствительности, не было управляемых транспарантов (пространственно-временных модуляторов света).

Открытие Юрием Николаевичем Денисюком трехмерной голографии позволило записывать голограмму как по поверхности, так и в глубину фотоматериала, что дает только одно изображение предмета в белом свете. Даже это открытие, способствовавшее увлечению голографией, не привело к решению тех проблем, о которых говорили. И все же был получен первый практический результат – появилось голографическое "изобразительное искусство".

Отсутствие хорошей элементной базы затруднило дальнейшее развитие голографии и ее практическое применение. Понадобились значительные усилия оптиков, физиков, химиков и инженеров, чтобы создать необходимые условия для внедрения голографии в промышленных масштабах.

В середине 70-х годов начался третий этап в истории развития голографии. К этому времени значительно возросло качество лазеров, появились работающие в режиме реального времени управляемые транспаранты. Подобно тому, как развитию электроники способствовало изобретение транзисторов, так и для развития оптических методов получения и обработки информации необходим был эффективный управляемый транспарант. Появилась надежда на создание голографических запоминающих устройств, объемных кино и телевидения.

В 1976 г. вышла монография авторов Б. Ф. Федорова и Р. И. Эльмана "Цифровая голография" – первая книга, в которой были изложены методы синтеза голограмм на ЭВМ и воспроизведения с них изображения машинным и оптическим методами. Появлению этой книги способствовал Ю. Н. Денисюк, на семинарах которого авторы докладывали результаты своей работы. Он отметил тогда, что цифровая голография как метод моделирования голографии физической может явиться стимулом в ее развитии. Стало возможным создание искусственных объемных картин, рожденных с помощью ЭВМ. Получили дальнейшее развитие когерентные оптические методы распознавания.

К настоящему времени опубликовано много статей и книг по голографии, но все они предназначены специалистам с высоким уровнем физико-математической подготовки. Популярных работ, рассчитанных на широкого читателя, на тех, которые независимо от профессии и возраста интересуются новейшими достижениями науки и техники, пока мало.

В предлагаемой книге авторы стремились передать читателю свою увлеченность голографией. Они популярно, но в то же время достаточно полно рассматривают широкий круг вопросов от современных представлений о природе света, принципов работы лазера до физических основ голографии с ее достоинствами и недостатками, возможностями ее использования сегодня и в ближайшем будущем.

В книге отражен большой вклад советских ученых в развитие голографии. Рассмотрены важнейшие области применения голографии.

Авторы выбрали методику изложения материала "от простого к сложному", от "очевидного к невероятному". Это поможет лучше представить себе физику рассматриваемых явлений.

Авторы наглядно иллюстрируют излагаемый материал, прослеживая историю возникновения физической и цифровой голографии, а также путей их использования в науке и технике.

Некоторая перегруженность отдельных глав формулами весьма понятна – ведь речь идет о цифровой голографии, использующей формулы для обработки их на ЭВМ, о науке, сложившейся из математики, моделирования и разработки алгоритмов. При первом знакомстве с книгой можно не осмысливать формульное содержание, а только попытаться понять цифровую модель. Хорошо подготовленный читатель, знакомый с соответствующими разделами физики и информатики, может сразу же приступить к самостоятельному моделированию, как машинному, так и оптическому, используя эти алгоритмы и синтезированные голограммы.

Книга позовет молодого читателя в увлекательный мир голографии. И те, кто заинтересуется ею, найдут себе дело по душе. Может быть они смогут принять участие в развитии когерентной оптической техники. Ведь, как справедливо отмечают авторы, юность – пора творческая!

Член-корреспондент АН СССР

Л. Д. Бахрах

ВВЕДЕНИЕ

История научных открытий дает нам немало примеров развития новых направлений в науке и технике. Отличаясь индивидуальной спецификой, эти направления проходят ряд общих стадий разработки проблемы: рождение идеи, детальное исследование, создание новых технических устройств и, наконец, внедрение их в практику. Такая стадийность развития свойственна и очень близким направлениям — фотографии и голографии. Их развитие и становление имеют много общего. Даже зарождение идеи и ее дальнейшее развитие как в фотографии, так и в голографии повторяют друг друга.

Одним из создателей фотографии считают Нисефора Ньепса, который первый настойчиво исследовал "светописное" изображение. В 1829 г. он записал: "Открытие, которое я сделал и которое обозначено названием "гелиография", состоит в том, чтобы воспроизводить самостоятельно, действием света изображения, получаемые в камере-обскуре, со всеми градациями теней, от черного до белого... при этом свет, действуя на тела химически, поглощается и сообщает им новые свойства, соответственно продолжительности воздействия."

Нисефор Ньепс привлек к своей работе Жака Дагера, который занимался усовершенствованием открытия, причем продолжал свои опыты и после смерти Н. Ньепса. Дагер заимствовал от гелиографии систему "металл-покрытие", но пришел совсем к другим результатам — он открыл "серебряную" фотографию. Именно он открыл способ усиления первоначально слабого изображения, нашел способ фиксации полученного изображения. Дагер довел свой метод до практического результата. И хотя дагеротипия просуществовала сравнительно короткое время, именно она проложила путь фотографии.

В 1949 году Д. Габор показал, что фотографическая запись картины интерференции произвольного волнового поля излучения, рассеянного объектом, и волнового поля референтной волны обладает свойством восстанавливать волновое поле объекта, если на такую запись-голограмму направить референтную волну. Чтобы получить изображение, нужно записать голограмму и восстановить с нее изображение. Это показал и сделал впервые Д. Габор. Однако 15 лет этого открытия никто не замечал. О нем не знали, не было практического результата. У голограммы Габора был ряд недостатков, ограничивающих возможности этого способа регистрации, и он был на продолжительное время забыт.

В 1962 — 1964 гг. Е. Лейт и Ю. Упатниекс использовали так называемую внеосевую референтную волну и показали, что ограничения характера регистрируемого объекта и искажения отнюдь не свойственны методу. Ими были получены такие высо-

кокачественные изображения, что в голографию поверили и признали ее огромное значение не только для получения портретов, но и для науки и искусства. Уникальный характер голографии как фактически единственного способа объективной записи информации о форме и структуре предметов предопределил широкий диапазон ее практических приложений, простирающийся от тяжелого машиностроения до исследований в области термоядерной плазмы и лингвистики. С течением времени выявляется, что в основе всей этой области оптики лежат общие закономерности волновых полей.

Большой вклад в развитие голографии сделал и Ю. Н. Денисюк. В 1962 г. он обнаружил, что сама двумерная голограмма в действительности представляет собою лишь только частный случай общего явления. Оказалось, что существенно более полный комплекс отображающих свойств заключен в объемной интерференции — стоячей волне. Трехмерная материальная модель такой волны однозначно воспроизводит амплитуду, фазу и спектральный состав записанного на ней излучения. В дальнейшем Денисюк показал, что отображающими свойствами обладают не только стоячие, но и бегущие волны, что это явление распространено и на поляризацию. Одним из первых направлений приложения трехмерной голографии, открытой Денисюком, послужила изобразительная голография, другим — нанесение отражающих, фокусирующих покрытий, третьим — создание устройств оптической памяти сверхвысокой емкости.

Ни одно имя тех, кто внес вклад в развитие голографии, не забыто. И сейчас в ней появляются новые направления — динамическая голография, резонансная голография и т.п., появляются новые имена, но имя советского ученого, ныне члена-корреспондента Академии наук СССР Юрия Николаевича Денисюка будет всегда стоять в ряду первооткрывателей голографии.

Сейчас эта область оптики вышла из стадии исследований, идет проектирование ряда технических систем, внедрение в практику физических измерений во многих научных направлениях, в том числе и в космическом. Однако и до настоящего времени голография — это тонкий эксперимент, требующий уникального оборудования и большого мастерства, поскольку слишком много факторов влияют на ход процесса получения изображения и его качество. К таким факторам можно отнести неравномерность потока лучей, фазовые неоднородности деталей оптической системы, дефекты фотослоя, неодинаковость протекания фотохимического процесса по площади фотослоя, вибрация узлов установки. Совокупное действие всех этих факторов приводит к тому, что искажается микроструктура голограммы, теряется часть информации, снижается качество изображения. Ключ к решению проблемы повышения качества голографирова-

ния лежит в установлении характера и степени подверженности рисунка голограммы действию разрушающих факторов. В современной практике, когда сложность и взаимосвязанность физических процессов не позволяют анализировать протекание одного из них в чистом виде, используют математическое моделирование. В этом случае путем разумного пренебрежения несущественными факторами можно выделить нужный процесс и проследить его ход. Это позволяет сделать цифровая голография, которую можно рассматривать как метод моделирования голографии физической.

Цифровая голография дает большие возможности мощного и гибкого машинного анализа процесса формирования голограммы и возможность органической стыковки вычислительного звена модели с реальными физическими звеньями на уровне исходного изображения, голограммы и воспроизведенного изображения.

Из публикаций по цифровой голографии отметим работы Т. Х. Хуанга и Дж. Гудмена в 1971 – 1973 гг., а первая монография "Цифровая голография" вышла в 1976 г. в издательстве "Наука". Таким образом, и здесь имеется определенный приоритет советской науки.

К настоящему времени определены направления, на которых применение цифровой голографии дало определенные результаты, – это изучение голографического процесса во всех его звеньях; расчет на ЭВМ голографических фильтров, необходимых для пространственной фильтрации; восстановление изображений с голограмм, полученных неоптическими (акустическими, радиолокационными) средствами; визуализация условных изображений несуществующих предметов и т.п.

Специфика цифровой голографии такова, что обойтись без использования некоторых формул при изложении ее сущности невозможно. Однако авторы предлагают при первом прочтении опускать эти формулы, а тем, кого заинтересует цифровая голография и они захотят попробовать свои силы в создании синтезированных голограмм на персональных компьютерах, воспользоваться этими формулами для получения голограмм.

Предложенные в конце книги синтезированные голограммы простейших объектов могут быть использованы при соответствующем их уменьшении для восстановления изображений оптическим путем. Авторы уверены, что некоторые сложности не оттолкнут, а еще более заинтересуют любознательного читателя открывающейся возможностью творчества.

1.1. В ЦАРСТВЕ СВЕТА

Что такое свет? Этот вопрос продолжает волновать многих, однако ответить на него непросто.

С древних времен и до наших дней, когда города утопают в сиянии огней, свет очаровывает человека. Сейчас, щелкнув выключателем, можно осветить большое пространство, и все же свет представляется большинству людей неразрешимой загадкой. Ни один свой секрет природа не хранила так тщательно, как то, что же представляет свет в действительности.

Скрывая свою природу, свет тем не менее позволил человеку с помощью зрения познать окружающий мир в такой большой степени, в какой не смогли обеспечить другие органы чувств. Более 90% информации об окружающем мире человек получает с помощью зрения. Но если нет света, зрение беспомощно и никакой обостренный слух, осязание и обоняние не в силах компенсировать человеку эту потерю.

Возможно, глаз природа создала только потому, что был солнечный свет. И не только создала, но и настроила его максимум чувствительности на солнечное излучение.

Природе света многие ученые уделяли пристальное внимание. Они издавна пытались получить ответы на такие вопросы, как горяч или холоден свет? Имеет ли он массу? С какой скоростью распространяется? Почему не проходит через тонкий лист бумаги, но проходит через толстое стекло? И что такое цвет света?

Наиболее ранняя теория света была выдвинута древними греками. Согласно ей, свет представляет собой нечто такое, что истекает из наших глаз подобно воде из шланга, при этом предполагалось, что мы видим предметы, направляя на них поток света. Человек узнает, как выглядит вещь, будто ошупывая ее. Глаза слепого не испускают света, поэтому он не может видеть. Против этой теории не было существенных возражений до эпохи Возрождения.

Другая теория света, более фундаментальная, подтверждаемая наблюдениями и экспериментами, была разработана Ньютоном. К тому времени были предложены две гипотезы: по одной – свет это вещество, по другой – волновая энергия. Ученый отдавал предпочтение первой гипотезе. Он полагал, что свет состоит из малых частиц (корпускул) вещества, испускаемых во всех направлениях по прямым линиям или лучам светящимся телом, например Солнцем, свечой или другим источником (рис. 1). Если эти лучи, состоящие из корпускул, попадают в наш глаз, то мы видим их источник. Вторую гипотезу Ньютон отвергал на том основании, что свет, по его мнению, не способен огибать препятствия, хотя он и знал о способностях звуковых и водяных волн огибать небольшие предметы.

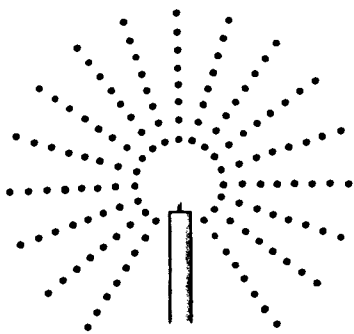


Рис. 1. Распространение света по корпускулярной теории

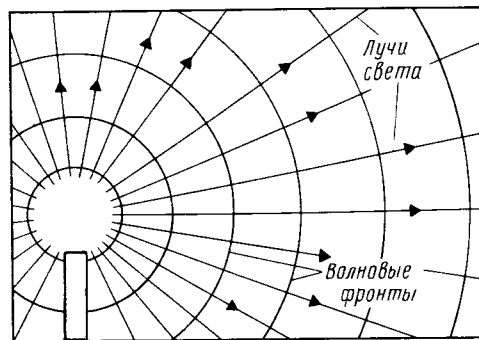


Рис. 2. Распространение света по волновой теории

Одновременно с Ньютоном голландский физик Гюйгенс выдвинул волновую теорию света. На рис.2 показано, каким образом источник излучает свет согласно волновой теории. Хорошо видно, что есть лучи и волновые фронты, образованные сферическими поверхностями. Чем дальше волновой фронт от источника, тем более плоским он становится. На большом расстоянии от источника мы имеем дело с плоскими фронтами. Световые волны, приходящие непосредственно от источника или от отражающего их объекта, вызывают ощущение видения, т.е. те же ощущения, которые Ньютон приписывал корпускулам.

Ньютон выдвинул возражение против волновой теории. Он говорил, что всякая волна должна иметь среду, в которой она распространяется. Свет распространяется в пустоте, а звук нет. Корпускулы же, как и брошенные мячи, не нуждаются в среде для распространения, а волны нуждаются. Поэтому волны не смогли бы распространяться в пустоте, например при пересечении пространства между Солнцем и Землей.

И тогда Гюйгенс, чтобы успокоить критиков, предположил существование некоего вещества – эфира, заполняющего все пространство и проникающего во все материальные вещи.

А Ньютон ставил все новые вопросы: почему нельзя видеть, осязать, чувствовать эфир? Остается ли он неподвижным или перемещается? Обладает ли он трением? Ответить на эти вопросы тогда было невозможно. Ньютон был самый большой научный авторитет своего времени, и поэтому восторжествовала его теория. Однако в дальнейшем в ней стали обнаруживаться неточности. Так, например, самым основополагающим в теории было то, что свет распространяется по прямой линии. Впоследствии было доказано, что это не так. Эксперименты Майкельсона показали и отсутствие какого бы то ни было эфира, предполагаемого Гюйгенсом.

Обладает ли свет массой и количеством движения? Окончательный выбор между корпускулярной и волновой теориями мог быть разре-

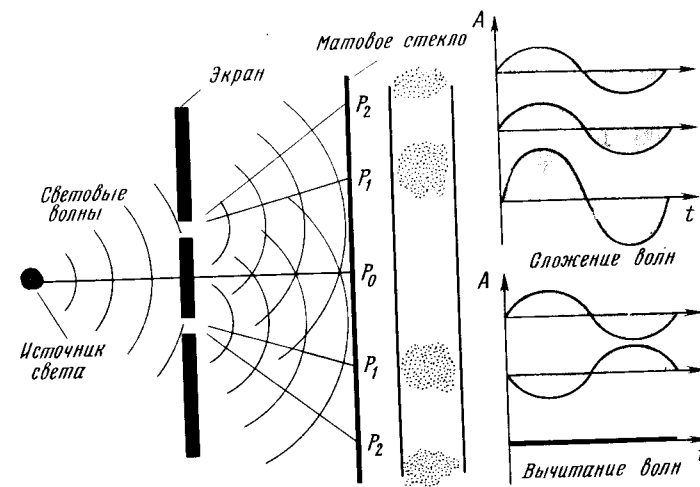


Рис. 3. Схема эксперимента Юнга по интерференции

шен только по получении новых экспериментальных данных, подтверждающих положения той или другой теории. А пока в царстве света имелось очень много темных пятен.

Но вот в 1801 г. молодой английский физик Томас Юнг выполнил эксперимент, который потряс ученых мира. Сущность этого эксперимента поясняется рис. 3. Перед экраном с двумя очень узкими щелями, отстоящими одна от другой на 2 мм, установлен источник света. За экраном помещено матовое стекло, на котором наблюдают получающуюся картину – несколько светлых и темных полос. Удивительным является то, что прямо против промежутка между щелями появляется светлая полоса. Это доказывает, что свет огибает препятствие, как и предсказал Гюйгенс. В то же время по теории Ньютона на матовом стекле должны были появиться только две светлые полосы. Чем же объяснить появление нескольких светлых линий? Это поясняет правая часть рис. 3. Светлые линии образуются в результате сложения волн, падающих на стекло в одной фазе, а темные – в противоположных фазах.

Появление полос легко объяснить, если допустить, что свет имеет волновую природу. Светлые полосы образуются в результате подсветки поля от волн, исходящих из одной щели, волнами, исходящими из другой щели. Две волны, падающие на стекло в противофазе, взаимно уничтожаются, образуя темные полосы.

Это явление получило название *интерференции света*. Поскольку корпускулярная теория Ньютона не могла объяснить явления интерференции, а волновая теория объясняет все другие явления так же хорошо, как и корпускулярная, Юнг ожидал, что волновая теория будет окончательно признана. Но этого не произошло. Многие газеты

выступили против работы Юнга, считая ее "ничтожной и бес-
содержательной".

Последующие эксперименты вновь подтвердили волновую природу
света. Теперь оставалось решить вопрос о скорости света. Аристотель
считал, что свет распространяется мгновенно от точки к точке. Ньютон
и Гюйгенс были с этим не согласны, ибо они не считали возможным
мгновенное распространение ни для частиц, ни для волны. Первый
эксперимент по определению скорости света выполнил еще Галилей.
Для этого он использовал двух наблюдателей, расположив их на
расстоянии в несколько километров друг от друга. В их руках были
фонари и секундомер. В некоторый момент первый наблюдатель
открывал свой фонарь и в тот же момент запускал секундомер. Второй
наблюдатель, увидев свет фонаря первого, открывал свой фонарь.
Первый, заметив свет фонаря второго, тотчас останавливал секундо-
мер. Скорость света определяли путем деления двойного расстояния
между наблюдателями на учтенный промежуток времени. Полученные
экспериментальные результаты были настолько различными, что не
могли дать надежного значения скорости света.

Однако идея Галилея была использована впоследствии французски-
ми физиками Фуко и Физо, которые вместо наблюдателей исполь-
зовали вращающийся зеркальный многогранник. Суть этого метода
поясняет рис. 4, на котором показана схема установки американского
физика Майкельсона, аналогичная установкам французских физиков.
Свет от источника направляли на вращающееся восьмигранное зерка-
ло, с него — на зеркало, установленное на горе Вильсон, а затем — на
горе Сан-Антонио. Затем в обратном направлении на восьмигранное
зеркало и к наблюдателю. Общее расстояние было равно 70 км. Зная
угловую скорость вращения зеркального барабана, можно определить

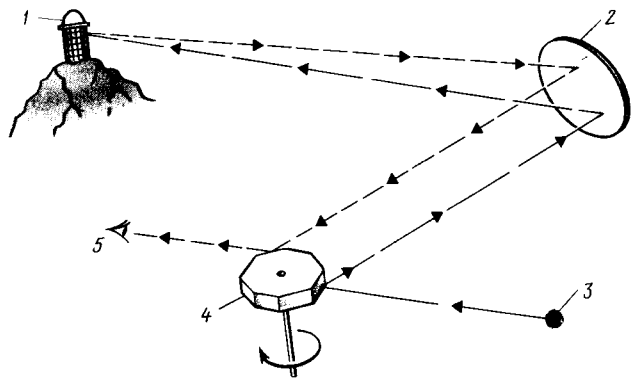


Рис. 4. Схема эксперимента Майкельсона:

1 — зеркало на горе Сан-Антонио на расстоянии 35,2 км; 2 — зеркало на горе
Вильсон; 3 — источник света; 4 — зеркальный вращающийся восьмигран-
ник; 5 — наблюдатель

время, затрачиваемое светом на прохождение этого пути, а следова-
тельно, узнать и скорость света. Наиболее надежным значением
скорости света считают число, полученное Майкельсоном. Оно
равно 229 700 км/с.

Майкельсон подверг сомнению и наличие эфира. Он, как и боль-
шинство физиков того времени, поначалу считал, что эфир — это
единственная среда во Вселенной, остающаяся неподвижной. Он
полагал, что движение Земли должно создавать кажущееся движение
эфира, параллельное направлению движения Земли. Вместе с физиком
Морли в 1881 г. он попытался измерить скорость света относительно
эфира, засекая время прохождения светом определенного расстояния
вверх по эфиру и в обратном направлении и время прохождения того
же расстояния перпендикулярно к потоку и обратно. Ясно, что если
эфир существует и он неподвижен, то время, необходимое свету для
прохождения расстояния вдоль потока туда и обратно, должно быть
больше, чем поперек. Выяснилось, что в обоих случаях время со-
вершенно одинаково. Эксперимент повторили многократно. Резуль-
таты подтвердились. Это было удивительное открытие. Результаты
противоречили физике того времени, опровергая существование
эфира.

Другим загадочным открытием было то, что, когда в опыте поль-
зовались светом от Солнца или другой звезды, то время, необходимое
свету для прохождения расстояния вдоль потока эфира, было числен-
но равно времени, необходимому для прохождения поперек его,
независимо от того, совпадало ли направление вращения Земли с
движением прибора по направлению к источнику света или с движе-
нием его в противоположном направлении.

Это было парадоксально, равносильно тому, что две летящие на-
встречу птицы имеют относительную скорость, равную не сумме их
скоростей, а другую — меньшую.

Таким образом, свет по-прежнему оставался загадкой.

1.2. ВОЛНЫ ВОКРУГ НАС

Слово "волна" возникло очень давно, задолго до того, как родилась наука. Этим словом обозначали чере-
дование расходящихся по воде впадин и горбов. Волны легко вызвать,
наверно, каждый из вас бросал в пруд камень или палку и наблюдал,
как они распространяются. В физике волной называют всякое
изменяющееся со временем чередование максимумов и минимумов
любой физической величины, например напряженности электри-
ческого поля, температуры или освещенности на поверхности экрана.

Волнами заполнены поверхности морей и океанов, атмосфера, без-
воздушное пространство. Понятие "волна" охватывает широкий круг
явлений. Нас интересуют главным образом электромагнитные волны
(радиоволны, свет), но для наглядности будем пользоваться и упру-
гими волнами на поверхности жидкости.

Представим, что в нашем распоряжении есть две лодки, оснащенные приспособлениями в виде выступающей вперед стрелы, на которой оборудован барабан с запасом рыболовной лески. Только вместо крючка привязан небольшой камень. В тихую погоду, когда нет волн, выйдем на озеро для проведения экспериментов.

Первый из них такой. Уроним камень в воду и на поверхности увидим ряд кругов, расходящихся от точки падения. Эта картина хорошо всем знакома.

Для второго эксперимента следует расположить лодки недалеко одну от другой. Затем одновременно сбросить в воду камни. Образуются два ряда кругов, расходящихся от мест падения камней. Обратим внимание на то, что волны проходят "одна сквозь другую" безо всяких взаимных влияний (рис. 5). Каждая волна распространяется так, как будто другой не существует. Есть научное выражение для такого явления. Оно называется *суперпозицией*. Смещение частиц воды в каждой точке есть сумма смещений, которые создавались бы от каждого источника волны в отдельности. Ну, а если в процессе проводимых экспериментов пойдет дождь, то вы сможете наблюдать очень сложный случай суперпозиции волн на поверхности озера.

Теперь проведем третий эксперимент. Постараемся одновременно опускать и поднимать в воду оба камня. Вот здесь пригодится барабан с леской (например, от спиннинга). Барабан надо поворачивать на половину оборота то в одну, то в другую сторону. Картина, которая будет наблюдаться на поверхности воды, показана на рис. 6. Можно заметить, что при одновременном действии двух волн в некоторых местах вода будет спокойной, поскольку здесь суперпозиция волн двух источников привела к отсутствию колебаний ее поверхности. В других местах, наоборот, суперпозиция привела к тому, что поверхность воды колеблется сильнее, чем в случае с одним источником, т. е. наблюдается усиление волн. Как говорят бывалые моряки, видны "полосы штиля" и "полосы бури". Вот это явление и называют *интерференцией волн*. Именно это явление и наблюдал Юнг в своем эксперименте со световыми волнами.

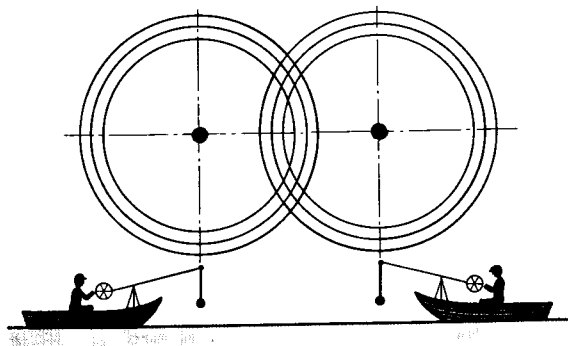


Рис. 5. Суперпозиция волн

Проведем четвертый эксперимент. Подплывем к торчащей из воды свае и создадим на поверхности волну (рис. 7, а). Когда она достигнет сваи (рис. 7, б), то от нее начнет расходитьсся как от нового источника новая, более слабая круговая волна (рис. 7, в). Это явление называют *рассеянием первоначальной волны*.

Эти эксперименты позволяют сделать определенные выводы для случая волн на водной поверхности, но, как станет ясно в дальнейшем, какова бы ни была природа волн (механическая, электромагнитная), при наличии нескольких источников, колеблющихся с одинаковой частотой, возбуждаемые ими волны в одних местах усиливаются, а в других — ослабляются. При этом степень усиления и ослабления зависит от расположения источников. Где происходит усиление и где ослабление, также определяется расположением источников.

Другой важный вывод состоит в том, что рассеяние на препятствиях — это тоже свойство волн любой природы, при этом препятствия становятся новыми источниками волн. Эти волны накладываются одна на другую, а также на первоначальную волну.

Проведем еще один эксперимент, для этого заменим камни на леске пластиной, прикрепленной соответствующим образом к стрелам обеих лодок. С помощью барабанов с леской можно заставить колебаться пластину так, как это показано на рис. 8. Волновая картина несколько изменится, волны уже будут не круговые, а плоские. Их линии впадин и горбов не окружности, а прямые. Если на пути таких волн встречается длинная прямая доска, торчащая из воды, как плотина, то можно заметить, что от нее также отражаются плоские волны. Меняя угол падения волны на доску, можно изменить угол между падающей и отраженной волнами. Легко видеть, что угол падения (между направлением распространения первоначальной волны и нормалью к

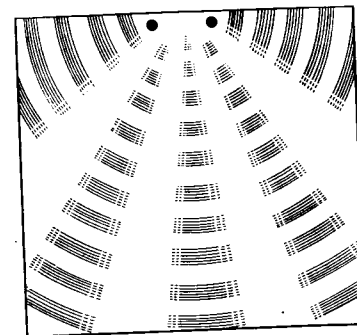


Рис. 6. Интерференция волн

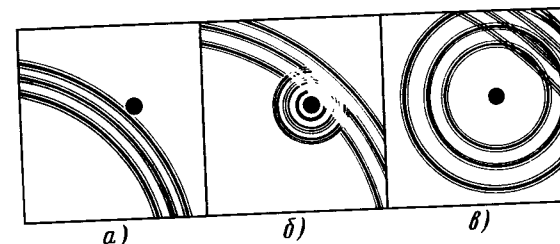


Рис. 7. Рассеяние волн на препятствии

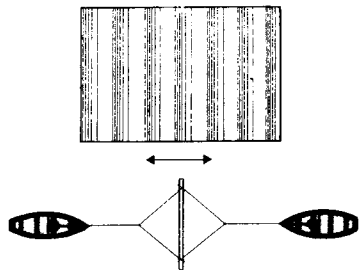


Рис. 8. Волны, создаваемые гармоническими колебаниями пластины

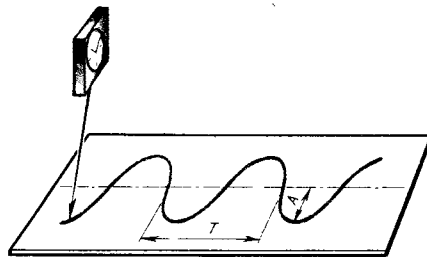


Рис. 9. Схема получения параметров колебания маятника

доске) равен углу отражения (между этой нормалью и направлением распространения отраженной волны).

Все эти эксперименты и их результаты пригодятся нам для понимания принципов физической и цифровой голографии. Перейдем теперь к количественной оценке волн, для чего используем такое понятие, как колебания. Каждый хорошо знаком с колебаниями маятника, струны или камертона. Прикрепим к концу маятника кисточку с темной краской, а под ней расположим лист чистой бумаги (рис. 9). Зададим колебания маятнику, а лист бумаги будем равномерно двигать в направлении, перпендикулярном к плоскости качания маятника. Кисточка вычертит кривую, которая может многое рассказать о маятнике.

Из курса физики известно, что эта кривая по форме очень близка к синусоиде, описываемой уравнением

$$y = A \cos kx,$$

где A и k — постоянные. Значениям y соответствуют смещения маятника относительно среднего положения в определенные моменты t ; значения x соответствуют положениям листа бумаги в те же моменты. Если перемещение бумаги равномерно, то можно записать, что

$$x = vt,$$

где v — скорость перемещения бумаги. Тогда зависимость смещения маятника во времени будет выглядеть так:

$$y = A \cos \omega t,$$

где $\omega = kv$. Движение, описываемое последней формулой, где A и ω — постоянные, принято называть *гармоническими колебаниями*. Их характеризуют два параметра: период (или частота) и амплитуда. Амплитуда A — это наибольшее отклонение маятника, период T — продолжительность одного полного колебания (после которого все движение повторяется), а частота $\nu = 1/T = \omega/2\pi$ — число полных колебаний за одну секунду. Величину ω называют *круговой частотой*; это число полных колебаний, происходящих в течение 2π единиц времени.

Если время измеряют в секундах (с), то частота есть число полных колебаний в секунду. Физической единицей частоты служит такое

колебание, период которого равен одной секунде. Для этой единицы частоты принято название герц (Гц). Если маятник имеет период, равный 2 с, то частота равна 0,5 Гц. Периоду 10^{-3} с соответствует частота один килогерц (кГц), периоду 10^{-6} с частота один мегагерц (МГц).

Если амплитуда все время уменьшается, то можно считать, что маятник скоро остановится, его колебания прекратятся (затухнут). Когда амплитуда колебаний остается неизменной, говорят, что колебания носят незатухающий характер.

Мы рассмотрели механические колебания. Электромагнитные колебания могут быть получены, если собрать электрический контур из конденсатора, катушки, выключателя и соединительных проводов (рис. 10). Если предварительно зарядить конденсатор и замкнуть контакты выключателя, то конденсатор начнет разряжаться через катушку. Разрядный ток создаст в катушке магнитное поле. По мере разрядки конденсатора ток в катушке увеличивается, и как только напряжение на нем станет равным нулю, ток достигнет максимального значения; максимального значения достигнет и магнитное поле катушки. В этот момент энергия, запасенная в конденсаторе, полностью перейдет в энергию магнитного поля катушки.

Далее ток через катушку начнет уменьшаться, а катушка в соответствии с законом электромагнитной индукции будет поддерживать этот ток. Энергия поля катушки будет уменьшаться, а ток будет заряжать конденсатор. В момент, когда ток станет равным нулю, а значит, уменьшится до нуля и энергия поля катушки, конденсатор окажется вновь заряженным, но в противоположной полярности.

Затем конденсатор снова начнет разряжаться, и весь процесс повторится в прежней последовательности. Таким образом, ток в контуре будет попеременно протекать в противоположных направлениях. Иначе говоря, в контуре возникают *электрические колебания*, связанные с возникновением и исчезновением магнитного поля. Это приводит к появлению *электромагнитных колебаний*. Колебания в электрическом контуре могут совершаться с различной частотой, зависящей от емкости конденсатора и индуктивности катушки. При уменьшении емкости конденсатора и индуктивности колебания учащаются, а их период уменьшается. Частота колебаний в контуре может быть очень большой: $f = 10^8$ Гц и более.

Теперь представим себе, что мы раздвигаем пластины конденсатора при одновременном увеличении их размеров (для сохранения той же

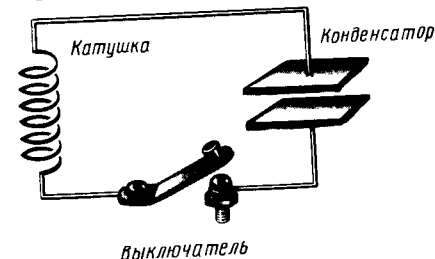


Рис. 10. Схема и основные элементы колебательного контура

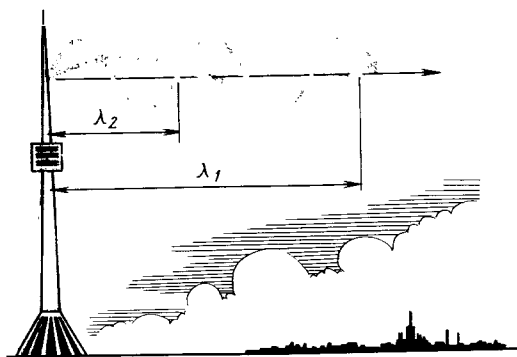


Рис. 11. Зависимость длины волны от частоты

емкости, а значит, и частоты контура). В результате мы получим так называемый открытый колебательный контур. Он обладает тем замечательным свойством, что способен создавать в окружающем пространстве электромагнитные волны. Энергия, которая ранее была сосредоточена в контуре, начнет излучаться в пространство. Носителем этой энергии будет электромагнитное поле, которое также имеет волновой характер. И эти волны характеризуются теми же параметрами, что и волны, создаваемые механическими колебаниями.

Если колебательный контур не подпитывать энергией извне, то колебания довольно быстро затухнут. Подпитывают контур с помощью электронной лампы (или транзистора), в анодную цепь которой и включают колебательный контур. В цепь сетки лампы включают еще одну катушку, индуктивно связанную с контурной.

Известно, что электромагнитные волны распространяются в пространстве со скоростью около 300 000 км/с (равной скорости света). Энергия распространяется от источника радиально во все стороны. Само слово "радио" обязано своим происхождением латинскому слову "радиус", что означает "луч".

Если частота f колебаний равна 10^6 Гц, то все эти волны за одну секунду заполнят в пространстве, считая по прямой от источника излучения, расстояние в 300 000 км. На долю каждой волны придется отрезок, равный $V/f = 3 \cdot 10^8 / 10^6 = 300$ м, где $V = 3 \cdot 10^8$ — скорость света. Расстояние, которое успеет пройти энергия, излучаемая источником электромагнитных колебаний за один период, получило название *длины волны*. Ее обозначают буквой λ . На рис. 11 показано, как укорачивается длина волны с ростом частоты.

Для полной характеристики колебательного процесса необходимо усвоить и понятие фазы. В оптических явлениях, рассматриваемых в нашей книге, соотношения фаз отдельных участвующих в них гармонических колебаний играют решающую роль. Что же такое фаза гармонического колебания и какова ее зависимость от выбора начала счета времени?

Формула $S = A \cos \omega t$ означает, что при $t = 0$ $S = A$. Положим, мы наблюдаем колебания маятника, отсчитываемые по секундомеру. Наша запись означает, что секундомер пущен в один из тех моментов, когда маятник занимает крайнее положение, т. е. текущая величина S проходит через один из максимумов функции.

Будем теперь понимать под t время, отсчитываемое по секундомеру, пущенному в ход в произвольный момент. Тогда колебание может быть записано таким образом

$$S = A \cos \omega(t - t_m),$$

где t_m — показание секундомера в момент прохождения отклонения S через максимальное значение. Введя обозначение $\varphi = \omega t_m = 2\pi \frac{t_m}{T}$, можем записать

$$S = A \cos(\omega t - \varphi).$$

Постоянную φ называют фазой гармонического колебания, точнее, *начальной фазой*. Эта величина выражается в долях радиана. При произвольном, но фиксированном выборе начала счета времени различные колебания одинаковой частоты могут иметь различные фазы.

С другой стороны, фаза колебания зависит от выбора момента начала счета времени. Одно и то же значение фазы может соответствовать различным началам счета времени, отстоящим одно от другого на целое число периодов. Отсюда следует, что при фиксированном начале счета времени фаза не определена однозначно, а лишь с точностью до целого кратного числа 2π .

Теперь можем подвести итог сказанному. Рассмотрев различные по своей физической основе явления, мы заметили, что для колебаний и в механике, и в акустике, и в оптике, и в радиотехнике действует одна математическая закономерность. Она связывает параметры колебаний (волн). Волны всегда есть вокруг нас, хотя мы порою их не замечаем. В настоящее время невозможно заниматься акустикой, оставляя в стороне ультразвук — акустические колебания с частотой более высокой, чем звуковые, и поэтому не слышимые человеком. Невозможно заниматься оптикой, не уделяя внимания ультрафиолетовому и инфракрасному излучениям, игнорируя радиоволны и рентгеновское излучение. Все эти не воспринимаемые человеческим глазом виды излучений отличаются от света лишь большей или меньшей частотой колебаний электромагнитного поля. Их часто называют невидимым светом.

Таким образом, посмотрев внимательнее вокруг себя и проанализировав увиденное, можно отметить поразительную общность многих закономерностей, характерных для звука и света, механических и электромагнитных колебаний. Эти закономерности проявляются в колебаниях и волнах, описываемых едиными уравнениями для различных физических сред.

Материалистическое обоснование единого подхода к колебаниям и волнам различной физической природы состоит в том, что общие зако-

ны, характеризующие как механические, так и электромагнитные колебания и волны, являются отражением многочисленных общих черт, объективно присущих этим процессам.

1.3. СОЛНЦЕ И ЛАЗЕР

Повсюду мы встречаемся с источниками излучения видимого, инфракрасного и ультрафиолетового диапазонов. Такими источниками являются Солнце, лампы накаливания, люминесцентные лампы, лазерные источники излучения и др. Даже хорошо нам знакомый паяльник является источником излучения. Он излучает тепло, а это и есть инфракрасные волны. Физики еще в прошлом веке установили основные законы излучения.

Вспомним: чем сильнее нагрет гвоздь, тем больше он отдает тепла, и рука ощущает это тепло с большего расстояния. Если нагревать гвоздь еще, он приобретает малиновый цвет, красный, далее красный цвет переходит в желтый, а затем в ослепительно белый. Таким образом, гвоздь начинает излучать не только инфракрасные, но и видимые глазом лучи. Но для этого нужно нагреть гвоздь до температуры, близкой к 1000°C . А как узнать более точно? Для этого нужен образцовый стандартный источник света. Оказалось, что им может быть так называемое абсолютно черное тело. Что это такое? Представим себе полый шар с маленьким отверстием (рис. 12). Если в это отверстие попадает под некоторым углом луч света, то, многократно отразившись от стенок, он так и не выйдет из шара, растеряв всю свою энергию. Отверстие этого простого устройства поглощает падающее на него излучение полностью. Даже самый черный бархат часть света отражает, а вот такое отверстие "чернее" самого черного бархата.

Было установлено, что такое устройство обладает замечательным свойством. Нагретое до определенной температуры отверстие само становится источником излучения электромагнитных волн инфракрасного и видимого диапазонов. Чем выше температура, тем сильнее излу-

чение. Кроме того, абсолютно черное тело (АЧТ) излучает при определенной температуре сильнее всех других тел, поэтому остальные тела условно называли серыми. Учеными была выведена закономерность излучательной способности АЧТ (закон Стефана-Больцмана). Она говорит, что излучательная способность АЧТ пропорциональна четвертой степени его температуры:

$$R(T) = \sigma T^4,$$

где σ — универсальная постоянная Стефана.

Таким образом, если повысить температуру АЧТ лишь втрое, то излучение будет интенсивнее почти в 100 раз!

Другой закон носит название Голицына-Вина. Его действие мы уже наблюдали. Этот закон говорит о том, что с повышением температуры тела длина волны, соответствующая максимуму излучения, уменьшается, спектр смещается от инфракрасной к ультрафиолетовой области (рис. 13). Штриховая линия на рисунке показывает характер этого изменения.

Попытка объединить эти два закона в единый едва не кончилась "ультрафиолетовой катастрофой"! Согласно единому закону интенсивность излучения, испускаемого нагретым телом, прямо пропорциональна его абсолютной температуре и обратно пропорциональна квадрату длины волны испускаемого света, что справедливо для зеленых и желтых лучей, но безгранично нарушается при приближении к ультрафиолетовой области. По закону выходило, что интенсивность излучения при переходе к более коротким волнам должна расти бесконечно. Но такого не могло быть! Это приводило к краху всей теории излучения. Факты не укладывались в теорию. Физики растерялись.

Выход из тупика был найден немецким физиком Максом Планком. Он вывел сложную формулу, которая хорошо описывала рассмотренные законы. Но в ней были выражения, не имеющие очевидного физического смысла. Это показалось представителям классической физики странным. Результаты, полученные по формуле, хорошо совпадают с экспериментом, а формула не выводится из законов классической физики, основанных на положении о непрерывности излучения, непрерывности энергии.

Это понимал и сам Планк, очень консервативный ученый, воспитанный на этих законах. Он понимал и потребность решения данного парадокса. И пошел на очень смелый по тем временам шаг. Планк допустил, что излучение энергии прерывисто. Это было сделать нелегко. Как представить, что Солнце, свеча, костер, лампа накаливания, испускающие энергию казалось бы равномерно, на самом деле испускают ее прерывисто — импульсами, порциями?

И величайшей заслугой Планка было то, что он сделал это. Он вывел ныне хорошо известное каждому школьнику, а тем более студенту соотношение между частотой и энергией единичной порции, названной квантом:

$$E = h\nu,$$

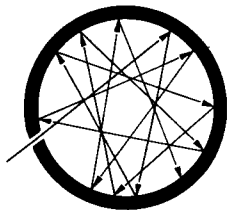


Рис. 12. Модель абсолютно черного тела

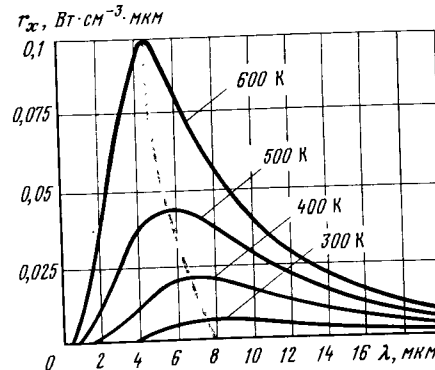


Рис. 13. График распределения энергии в спектре АЧТ

где E – энергия, заключенная в кванте; ν – частота излучения кванта; h – постоянный коэффициент. Полученный коэффициент называют *постоянной Планка*.

Этот закон говорит о том, что чем больше частота, тем больше порция энергии. Однако энергия, заключенная в кванте, очень мала. Такой незначительный источник, как лампа накаливания мощностью всего в 25 Вт, на "желтой" волне испускает $6 \cdot 10^{19}$ квантов в секунду. Следовательно, глаз не в состоянии уловить это мелькание и мы наблюдаем излучение как непрерывное.

Позднее эту идею поддержал и развил автор теории относительности – Альберт Эйнштейн. Он сделал предположение, что свет не что иное, как поток квантов энергии, причем для той или иной длины волны все его кванты несут одинаковые порции энергии. Кванты световой энергии стали называть фотонами. И вновь встал вопрос: свет – это волна или частица? Почему тела испускают свет?

Трудами Планка и Эйнштейна уже было доказано, что излучение имеет электромагнитную природу, является одной из форм существования энергии и обладает квантово-волновыми свойствами. Квантовый характер излучения проявляется при испускании и поглощении энергии света, при взаимодействии излучения и вещества, а волновой характер – в явлениях интерференции и дифракции.

Сейчас хорошо известно, что атомы состоят из ядра и электронов. А не участвуют ли электроны в излучении видимых и инфракрасных волн? Откуда берется излучаемая энергия? Известно, что электроны движутся в атоме не как попало, а по строго определенным вокруг ядра орбитам. Имеются как близкие к ядру орбиты, так и относительно далеко отстоящие. Чем ближе электроны к ядру, тем большей энергией они должны обладать, чтобы не упасть на ядро. Отсюда можно сделать вывод, что электроны подразделяются на группы по энергии. Иными словами, каждая группа имеет свой *энергетический уровень*.

Пока электрон находится на орбите, он не излучает энергии. Теперь представим себе, что электрон перескочил на соседнюю орбиту, расположенную несколько дальше от ядра, т. е. на другой, меньший энергетический уровень. Куда исчезла разность энергии? Она выделилась в виде фотона электромагнитной энергии. И теперь электрон движется по новой орбите, не излучая энергии. Если зарегистрировать фотон с помощью фотопластинки или фильтров, то можно определить его частоту. По формуле Планка можно вычислить и энергию фотона. Она равна разнице энергий электрона на старой и на новой орбитах в атоме. Степень почернения фотопластинки говорит о числе упавших на нее фотонов.

Мы рассмотрели процесс возникновения излучения атома. А теперь введем понятие о *микросистеме*, под которой будем понимать систему, состоящую из молекул, атомов, ионов и электронов. Очевидно, что их движение и ориентация соответствуют дискретному ряду по количеству энергии – энергетическим состояниям или уровням. Внутрен-

няя энергия микросистемы квантована. При переходе с одного энергетического уровня на другой происходит изменение от одного значения внутренней энергии к другому, соответствующему иной ориентации частиц. Если конечное значение внутренней энергии системы больше начальной, то разница должна восполняться поглощением энергии внешнего поля. И наоборот, если энергия отдается внешнему полю, значит, система излучает и конечное ее состояние должно соответствовать меньшей энергии, чем начальное.

Взаимодействие света с веществом можно представить следующим образом. Сталкиваясь с микросистемой, квант света возбуждает ее атомы и молекулы. Наиболее сильное взаимодействие происходит тогда, когда частота колебаний кванта света совпадает с одним из значений собственной частоты колебаний электронов микросистемы. В этом случае атомы и молекулы, находясь в возбужденном состоянии, могут стать вторичными излучателями квантов. При взаимодействии микросистемы и света происходит обмен энергией, при котором рождаются одни и исчезают другие кванты света. По закону о сохранении энергии сумма энергий квантов и микросистемы до столкновения должна быть равна такой же сумме энергий после него. Как было показано Эйнштейном, в соответствии с этим законом могут иметь место три случая взаимодействия кванта света с веществом:

полное поглощение энергии кванта света микросистемой – энергия микросистемы возрастает;

частичное поглощение энергии кванта микросистемой – происходит рассеяние энергии;

поглощение энергии кванта света с последующим испусканием лучей – наблюдается излучение света.

Характеристики излучаемого света будут определяться тем, как была организована микросистема. Для начала допустим, что она имеет лишь два энергетических состояния – верхнее и нижнее и нет препятствий для перехода из одного в другое. При этом соотношение числа частиц верхнего и нижнего уровней определяется выражением:

$$N_2/N_1 = \exp [-(E_2 - E_1)/(k T)],$$

где N_1 и N_2 – число частиц на верхнем и нижнем уровнях; k – постоянный коэффициент; T – абсолютная температура; E_1 и E_2 – значения энергией электронов на соответствующих уровнях.

Если система находится на верхнем уровне и число ее частиц больше, чем на нижнем (неравновесное состояние), то имеется определенная вероятность, что через некоторое время она перейдет в другое состояние (равновесное) и произойдет излучение энергии. Эта вероятность имеет две составляющие: постоянную и переменную. Постоянная составляющая вероятности аналогична вероятности распада радиоактивного вещества и зависит от свойств системы и самого перехода и не зависит от внешних факторов. Переменная составляющая линейно зависит от плотности энергии поля на частоте перехода, действующего на систему извне. Наличие поля на частоте перехода

повышает вероятность излучения системой, находящейся в неравновесном состоянии.

Если поле, действующее на систему извне, отсутствует, то процесс перехода системы в равновесное состояние, сопровождаемый излучением и характеризуемый постоянной составляющей вероятности перехода, называют *спонтанным излучением*. Если же на квантовую систему действует внешнее поле на частоте перехода, то возможность спонтанного излучения остается, однако внешнее поле на частоте перехода повышает его вероятность, вызывая излучение, находящееся в определенных соотношениях с этим полем. Поэтому такое излучение называют *стимулированным излучением*. На рис. 14 показаны характеристики поглощения и излучения средой (на рисунке она заштрихована) с различной заселенностью энергетических уровней, где n_1 и n_2 — число частиц на нижнем и верхнем уровнях, а T — абсолютная температура.

Для количественной оценки процесса можно использовать простейшее выражение:

$$I = I_0 e^{-\alpha l},$$

где I — интенсивность света после прохождения им пути в среде, характеризуемой коэффициентом α ; I_0 — интенсивность света, падающего на среду; α — коэффициент поглощения (усиления); l — путь, проходимый излучением в среде.

Для равновесной системы амплитуда падающей волны уменьшается по экспоненциальному закону. По этому же закону увеличивается амплитуда неравновесной системы.

Коэффициент α зависит от того, сколько частиц микросистемы (среды) находится на верхнем и нижнем энергетических уровнях, т. е. от заселенности уровней. При малой заселенности верхнего уровня наблюдается поглощение, при большой — излучение. Принцип получения стимулированного излучения, лежащий в основе работы лазеров, поясняет рис. 15. Слева на систему, находящуюся в неравновесном состоянии (1), упал квант света с частотой перехода с верхнего уровня E_2 на нижний E_1 . Этот квант мог бы сообщить системе дополнительную энергию. Но система уже имеет избыточную энергию, так как на верхнем уровне значительно больше частиц, чем на нижнем, т. е., верхний уровень перезаселен, и поэтому дополнительная энергия

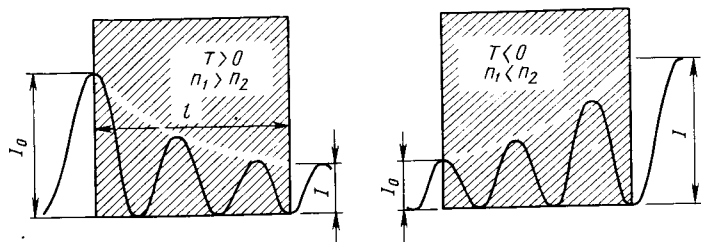


Рис. 14. Схема взаимодействия излучения со средой

вынудит частицы, находящиеся на верхнем уровне, отдавать свою энергию (2). Можно сказать, что с верхнего уровня сорвется один или несколько электронов и окажутся на нижнем уровне. Они выделяют электромагнитную энергию, частота которой совпадает с частотой излучения, упавшего на систему кванта. Направление и фаза (начало колебаний) выходящих волн (а их будет несколько) будут совпадать с направлением и фазой падающей волны. Это приводит к взаимному усилению амплитуды колебаний. Возникают резонансные колебания, приводящие, в свою очередь, к тому, что в процесс излучения энергии окажутся втянуты все электроны, расположенные на верхнем уровне.

Процесс нарастания энергии носит лавинообразный характер. Энергия выходной волны быстро увеличивается при сохранении прежней частоты колебаний. Таким образом, неравновесная система стала усилителем электромагнитной энергии оптического диапазона. Впервые на возможность и способ получения неравновесных состояний указал еще в 1940 г. в докторской диссертации советский физик В. А. Фабрикант, который в 1951 г. с группой сотрудников создал усилитель света.

Такой источник света имеет существенные отличия от обычных, хорошо известных источников. Одно из исследований коснулось спектрального состава солнечного излучения — распределения излучения по длине волны. С помощью спектрометров получили зависимость, которая показана на рис. 16. Хорошо видно, что спектр представляет собой непрерывную полосу с ярко выраженным горбом. Эта полоса простирается от ультрафиолетовой области до инфракрасной, включая видимую часть спектра. Максимум излучения (горб) лежит в видимой области на волне около 0,6 мкм, что соответствует температуре АЧТ, нагретого до 6000 К. Значит, в излучении принимают участие электроны, атомы, молекулы, находящиеся на самых различных энергетических уровнях, причем каждое элементарное излучение не связано с другим ни по фазе, ни по частоте, оттого и получился широкий спектр излучения. Такое излучение называют некогерентным. В нем нет ярко выраженной связи между отдельными типами колебаний.

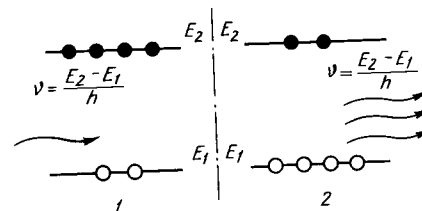


Рис. 15. Двухуровневая энергетическая система

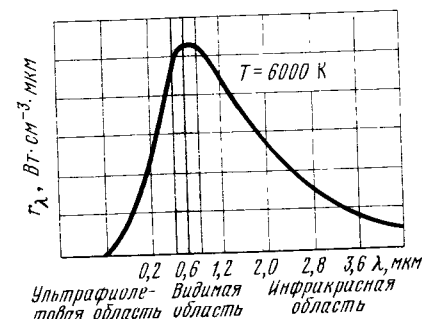


Рис. 16. Спектральный состав солнечного излучения

Такое излучение еще носит название *белого шума*, если использовать понятия радиотехники.

Таким образом, Солнце, лампа накаливания – это не генераторы излучения. Кроме того, свет от таких источников распространяется во всех направлениях равномерно. Чтобы получить параллельный пучок света, необходимо сфокусировать излучение оптической системой, состоящей из линз и зеркал. Но при этом только незначительную часть энергии можно сосредоточить в параллельном пучке. Следовательно, применение обычных источников света ограничено следующими недостатками:

их энергия распределена в широком спектральном интервале. Источников с узкой полосой излучения, обладающих значительной мощностью, не существует;

излучаемая энергия, как правило, распределена в широком телесном угле; концентрация ее в узкий параллельный пучок связана с большими потерями энергии.

Новый тип источников излучения – лазеры, появившийся на глазах нашего поколения, не имеет этих недостатков: их спектральное распределение излучения сосредоточено в узкой линии, а пространственно оно сосредоточено в узком телесном углу. Рассмотрим особенности лазеров как источников излучения.

К основным достоинствам лазеров следует отнести высокую степень когерентности, точную направленность излучения, монохроматичность, значительную спектральную яркость.

Когерентность излучения. В известных ранее источниках излучения отсутствовала взаимосвязь между отдельными типами колебаний, почти полностью отсутствовала когерентность между световыми волнами, вышедшими из различных точек излучения. Лазерное же излучение пространственно когерентно потому, что волновые фронты плоски и перпендикулярны направлению распространения волн. Оно когерентно и во времени, так как имеется строгое фазовое соответствие между излучаемыми волнами. Чем точнее волна сохраняет заданную частоту, тем более отчетливо проявляется свойство временной когерентности.

Такое когерентное излучение оптическая система способна сфокусировать в пучок сечением в несколько раз меньшим, чем у паутины. Причем чем выше степень когерентности, тем меньшего сечения пучок может быть получен. Следовательно, яркость светового пятна получается намного большей яркости самого источника. От некогерентных источников добиться такого эффекта невозможно. Простой расчет по формуле $E = \Phi S / \lambda^2 f^2$ (где Φ – плотность лучистого потока лазера; S – входная площадь оптического канала; λ – длина волны излучения; f – фокусное расстояние оптики), который вы можете выполнить сами, показывает, что облученность в сфокусированном пятне может достигать $10^{10} \dots 10^{12}$ Вт/м². Под воздействием столь значительной облученности испаряются самые твердые металлы. Таким потоком энергии можно

обрабатывать алмазы. Интересно, что потока с удельной энергией такого значения нельзя получить ни от Солнца, ни от вольтовой дуги, какой бы совершенной ни была оптическая система.

Для сравнения: если взять лазер мощностью всего в 10 Вт и сфокусировать его луч на площади в 2 мкм², то плотность потока будет равна 10^{12} Вт/м². Солнце же имеет плотность потока на своей поверхности всего $7 \cdot 10^7$ Вт/м², т. е. меньше почти в 10 000 раз. Сфокусировать излучение Солнца на площадь малых размеров не удастся, потому что оно не является точечным источником излучения. Его угловой размер около половины градуса, и, следовательно, в фокальном пятне не может быть получена плотность потока больше, чем на самом источнике.

Высокая направленность излучения. Для получения высокой направленности лазерного пучка и для вовлечения в процесс излучения всех возбужденных частиц, находящихся в микросистеме, ее располагают между двумя зеркалами. Одно из них делают полупрозрачным, а другое – с почти максимальным коэффициентом отражения (*глухое зеркало*, как его называют оптики). На рис. 17 показано шесть стадий излучения. На первой стадии все атомы активного вещества, кроме двух, находятся в нормальном (невозбужденном) состоянии. На второй стадии излучения микросистема, которую для краткости будем называть средой, подвергается воздействию электромагнитного поля – оно обозначено стрелками. Это приводит к тому, что часть энергии передается атомам системы – число возбуждаемых частиц теперь превышает число невозбужденных. Среда перешла в неравновесное состояние.

На третьей стадии излучения три частицы самопроизвольно излучили энергию, но две из них сделали это под углом к оптической оси

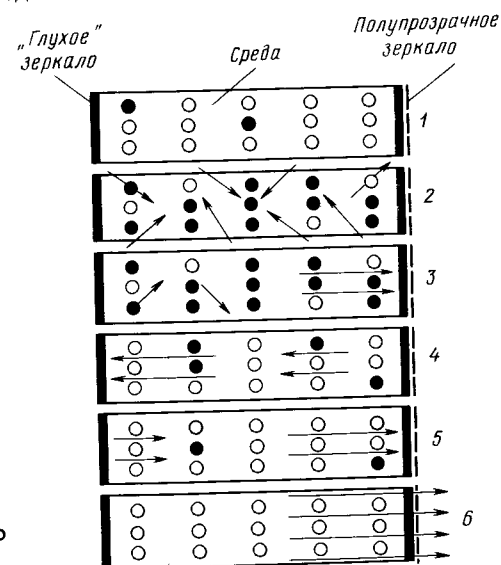


Рис. 17. Принцип работы зеркального резонатора

системы. Это излучение покинет среду, не получив значительного усиления. А вот то излучение, направленное по оси оптической системы, стимулирует к излучению другие частицы, встретившиеся на пути. Усиленное излучение отразится от зеркала и снова пройдет через среду, в которой остались еще не излучившие частицы.

Четвертая, пятая и шестая стадии излучений: идет процесс нарастания плотности потока и выход стимулированного излучения через одно из зеркал открытого резонатора. Хорошо видно, что волнам, направленным под углом к оптической оси резонатора, созданы неблагоприятные для усиления условия. И наоборот, волны, перпендикулярные зеркалам, получают значительное усиление, получив которое, световая волна покинет среду, причем вся энергия будет сосредоточена в узком пучке. Этот пучок будет иметь высокую направленность, так как волны могли многократно пройти вдоль оптической среды резонатора, не отклонившись от нее. Таким образом, на выходе резонатора образуется почти параллельный световой поток. Теоретически ширину θ расхождения луча определяет выражение

$$\theta = 1,22 \lambda/d,$$

где d — диаметр резонатора из активного вещества. Расчеты показывают, что ширина луча равна примерно 10^{-4} рад. А это очень малый угол. Чтобы получить такой угловой раствор луча в диапазоне сантиметровых радиоволн, нужны антенны диаметром в десятки метров. В лазере же самой его структурой заложена принципиальная возможность концентрации излучения в узкий, почти параллельный пучок.

Направленность излучения имеет большое значение для связанных и локационных систем, работающих на больших расстояниях. Плотность потока в обычном луче убывает пропорционально квадрату расстояния от источника. С увеличением расстояния в 100 раз плотность потока в луче падает в 10 000 раз. Поэтому конструкторы идут на использование громоздких антенн для того, чтобы обеспечить высокую направленность излучения. Диаметр этих антенн достигает 5 ... 10 м, что позволяет сконцентрировать радиоизлучение в угле 3 ... 10°.

Для получения направленности излучения в угле 1 ... 2° для лазера, изготовленного с использованием стеклянного активного вещества, нет необходимости в применении дополнительной оптической системы. И без нее открытый зеркальный резонатор длиной около 1 м и с диаметром зеркал около 50 мм обеспечивает такой угол.

Высокая монохроматичность. Так называют свойство излучать в очень узкой частотной полосе. Оно обусловлено тем, что стимулированное излучение лазера представляет собой результат резонансного процесса и в силу этого более узкополосно, чем излучение, спонтанно излучаемое средой. Излучение на предпочтительной частоте, в свою очередь, возбуждает излучение на той же частоте. Относительная ширина линии спектра излучения равна $10^{-6} \dots 10^{-10}$ ед.

Ее интересно сравнить с шириной используемого до последнего времени оптического монохроматического стандарта, в качестве которого

служила лампа с парами натрия. Относительная ширина ее спектра — около 10^{-5} . Высокая монохроматичность лазерных источников позволяет использовать их для получения высококачественных голограмм, создания связанных и локационных систем, отличающихся высокой помехозащищенностью.

Значительная спектральная яркость. Этот параметр тесно связывает между собой плотность потока энергии, телесный угол, в котором она распространяется, и ширину спектра излучения, в котором сосредоточена эта энергия. Если сравнивать между собой по яркости когерентные и некогерентные источники, то видно, что температурные источники значительно проигрывают. Дело в том, что все источники излучения независимо от их температуры не могут излучать сильнее идеального излучателя — АЧТ — при той же температуре. Даже Солнце, которое нам кажется самым ярким источником, имеет такую же яркость, как и АЧТ при температуре 6000 К. По формуле Планка подсчитано, что полная мощность излучения Солнца (т. е. мощность по всему спектру излучения) не превышает 7000 Вт с каждого квадратного сантиметра поверхности. Это мощностной порог Солнца. Большого мы получить не можем. Цифра эта сама по себе очень значительна. Но вспомним о том, что вся энергия распределена в широком интервале длины волны. Один только видимый участок имеет протяженность 3,5 · 10⁸ МГц. А если подсчитать, какая же доля от всей этой энергии приходится на полосу в 1 МГц? Оказывается, в этой полосе на длине волны в 0,55 мкм квадратный сантиметр Солнца излучает мощность 10⁻⁵ Вт. А это очень незначительная мощность. Обычный радиопередатчик в этой же полосе обладает мощностью до 10 кВт.

Лазерные источники имеют значительно большую мощность. Для сравнения на рис. 18 показаны значения спектральной яркости различных источников излучения. У газового и рубинового лазеров мощность такова, что при попытке получить в этом участке длин волн аналогичную мощность от АЧТ потребовалось бы его нагреть до температуры большей, чем 10¹⁸ К. Чтобы показать это преимущество лазеров,

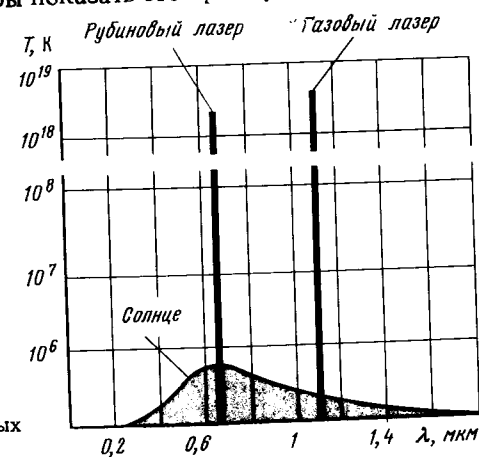


Рис. 18. Спектральные яркости различных источников излучения

на рисунке пришлось сделать разрыв по вертикальной оси. Со всей очевидностью понятно, что если бы удалось создать оптические фильтры для лазерных источников излучения с очень узкой щелью, то это дало бы возможность построения аппаратуры, работающей в условиях солнечного освещения. Солнце не мешало бы его работе.

Очевидно, что Солнце как источник излучения во многом проигрывает лазеру — генератору когерентного, монохроматического, высоконаправленного излучения со значительной спектральной яркостью.

1.4. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Для пояснения сути этого явления рассмотрим, что же произойдет, если совместить две световые волны, распространяющиеся совместно в одном направлении. Пусть это будут волны A и B , имеющие одинаковые амплитуду, частоту, фазу. С точки зрения голографии нас интересуют больше всего два крайних случая соотношения фаз этих волн (рис. 19). В левой части рисунка показаны эти волны в фазе, гребни волн совпадают, разность их фаз равна нулю. Возникает волна большей амплитуды.

В правой части рисунка изображены волны в противофазе, поскольку разность их фаз равна половине длины волны. Эти волны гасят одна другую во всех точках. Если это световые волны, то в первом случае получим результирующую волну большей яркости, а во втором случае — темноту. Между этими двумя крайними случаями лежат все возможные остальные.

Таким образом, можно дать следующее определение интерференции — это процесс сложения двух волн, в результате которого образуется новая волна. Сложение волн, совпадающих по фазе, приводит к усиливающей интерференции, тогда как при сложении волн, находящихся в противофазе, возникает ослабляющая интерференция.

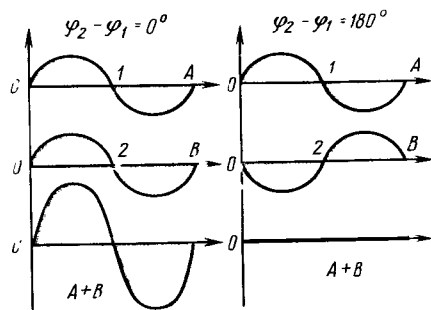


Рис. 19. Сложение волн

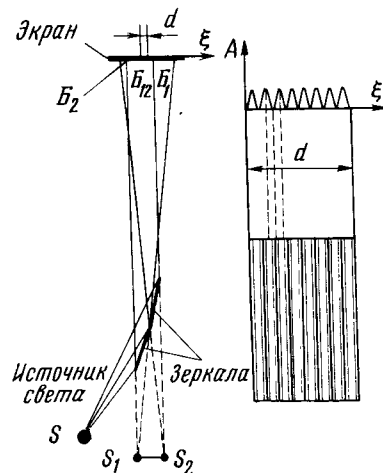


Рис. 20. Эксперимент Френеля

Вот один из опытов осуществления интерференции света, проделанный Огюстеном Френелем (рис. 20). Свет от источника S , пущенный через узкую щель и светофильтр, отражается от двух соприкасающихся ребром плоских зеркал, угол между которыми близок к 180° . Ребро, образованное зеркалами, параллельно щели. Свет, отраженный от зеркал, образует два пучка, накладывающихся один на другой. На пути света установлен матовый экран с высоким коэффициентом отражения. Части B_1 и B_2 экрана освещены светом, отраженным только от первого или только от второго зеркала. На часть B_{12} экрана падает свет от обоих зеркал. Освещенность поверхности экрана тем больше, чем больше энергии падает на единицу площади.

По корпускулярной теории энергия, приходящаяся на единицу площади, пропорциональна числу световых частиц, падающих на нее. На участок B_{12} их падает вдвое больше, чем на B_1 и B_2 , поэтому он должен иметь всюду вдвое большую освещенность. На самом же деле наблюдается картина, представленная на правой части (внизу) рисунка. Видно, что эта часть экрана покрыта равноотстоящими темными и светлыми полосами, параллельными ребру между зеркалами. Зависимость освещенности в какой-либо точке от положения ее на экране имеет вид, показанный на рисунке справа вверху. Если перекрыть дополнительным экраном свет, отраженный от одного из зеркал, освещенность выравнивается: в наиболее светлых местах уменьшается, а в наиболее темных — увеличивается, т. е. экран оказывается освещенным равномерно.

Следовательно, результат опыта находится в полном противоречии с корпускулярной теорией. Но его можно объяснить, если принять, что свет после светофильтра есть синусоидальная волна, причем освещенность в каждой точке пропорциональна квадрату амплитуды этой волны. Это можно понять из следующих простых рассуждений. Излом зеркала нужен для того, чтобы получить два световых потока, исходящих как бы от двух источников S_1 и S_2 сферических волн. Пусть эти источники излучают волны равномерно во всех направлениях с одинаковой амплитудой A , частотой ω и фазой, т. е. A зависит только от расстояния r , а не от направления. Тогда создаваемые источниками волны могут быть описаны уравнениями

$$S_1 = \frac{A_0}{r_1} \cos(\omega t - kr_1); \quad S_2 = \frac{A_0}{r_2} \cos(\omega t - kr_2).$$

Разность фаз в некоторой точке P :

$$k(r_2 - r_1) = k\Delta; \quad \Delta = r_2 - r_1$$

где Δ — разность хода волн, приходящих в точку P . Рассмотрим суперпозицию $S_{12} = S_1 + S_2$ волн S_1 и S_2 . Согласно теории суперпозиции результирующая интенсивность в точке P (квадрат амплитуды A результирующего колебания) существенно зависит от разности фаз $k\Delta$ в этой точке

$$A^2 = A_0^2 \left(\frac{1}{r_1^2} + \frac{1}{r_2^2} + \frac{2}{r_1 r_2} \cos k\Delta \right).$$

В тех точках, где

$$k\Delta = \pm 2n\pi, \text{ т. е. } \Delta = \pm n\lambda (n = 0, 1, 2, \dots),$$

амплитуда результирующего колебания будет равна сумме $\frac{A_0}{r_1} + \frac{A_0}{r_2}$

амплитуд колебаний S_1 и S_2 . В тех точках, где $k\Delta = \pm (2n+1)\pi$, т. е. $\Delta = \pm (2n+1)\frac{\lambda}{2}$ ($n = 0, 1, 2, \dots$),

амплитуда результирующего колебания равна разности или, если условиться считать амплитуду существенно положительной (относя знак к фазе), абсолютной величине $\left| \frac{A_0}{r_1} - \frac{A_0}{r_2} \right|$ этой разности.

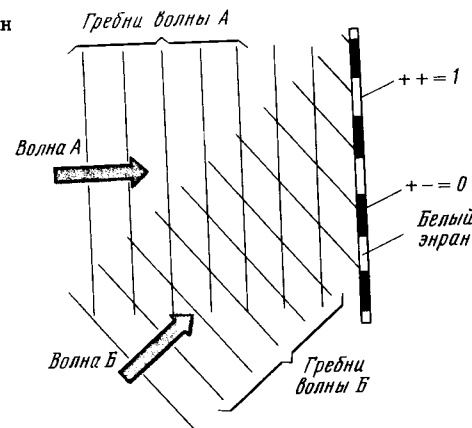
Геометрическим местом точек, для которых $\Delta = \text{const}$, является в случае $\Delta = 0$ плоскость, перпендикулярная отрезку S_1S_2 и делящая его пополам, а в случае $\Delta \neq 0$ — гиперboloид вращения, ось которого проходит через точки S_1S_2 . Плоскость $\Delta = 0$ и гиперboloиды $k\Delta = \pm 2n\pi$ являются геометрическим местом максимумов амплитуды, а гиперboloиды $k\Delta = \pm (2n+1)\pi$ — минимумов. Общее число гиперboloидов, соответствующих максимумам амплитуды, равно, очевидно, целой части от числа полувольт, содержащихся в отрезке $(S_1S_2)/2$, или целой части m от числа длин волн, укладывающихся в отрезке S_1S_2 .

Наличие темных полос, т. е. мест, где "свет + свет = темнота", является наиболее замечательным подтверждением волновой теории света. Эти яркие и темные линии, образующие интерференционную картину, называют интерференционными полосами. Расстояние между ними, как мы теперь знаем, зависит от характеристик интерферирующих волн. Если, например, расстояние между гребнями волн увеличивается, т. е. свет будет иметь большую длину волны, то возрастает и расстояние между интерференционными полосами. Таким образом, свет разного цвета будет создавать интерференционные картины с различным расположением полос. Кроме того, если угол между направлениями прихода двух плоских волн изменяется, то это также приводит к увеличению или к уменьшению расстояния между полосами. Если же с плоскими световыми волнами интерферируют сферические световые волны, то на экране возникает картина, состоящая из чередующихся светлых и темных концентрических колец.

Мы рассмотрели только плоские и сферические волны, однако существуют и другие типы волн в волновыми фронтами иной формы. Но в любом случае две простые волны, складываясь, создадут на экране единственную в своем роде, присущую только этой паре волн интерференционную картину, которая зависит исключительно от параметров формирующих ее световых волн.

Черно-белая фотопластинка реагирует на действие света таким образом, что ее участок, на которой попал свет, после проявления становится темным и в дальнейшем не пропускает света, и наоборот. Поэтому мы можем зафиксировать интерференционную картину, возникающую при сложении двух волн, просто используя фотопластинку как экран и облучая ее соответствующим светом. Тогда после проявления мы получим негатив подлинной интерференционной картины.

Рис. 21. Интерференция двух плоских волн



Пример получения простейшей фотографической решетки показан на рис. 21. В результате сложения двух волн, направленных под углом одна к другой, возникает интерференция. На фотопластинке в правой части рисунка будет виден набор горизонтальных линий. Происходит сложение волн, либо взаимно усиливающих (когда гребни волн А и Б совпадают, на рис. $++=1$), либо взаимно ослабляющих (когда гребень волны А совпадает с впадиной волны Б, на рис. $+-=0$). Фотопластинку проявляют и закрепляют. На ней полосы имеют вид прямых линий (к этой пластинке мы вернемся в следующем параграфе, а к результирующим цифрам 1 и 0, что указаны справа от нее — в главе о цифровой голографии).

На рис. 22 показано, каким образом происходит интерференция плоской и сферической волн. В этом случае вместо системы параллельных полос мы видим кольцевую картину. Как и в предыдущем случае, плоские волны движутся слева направо и интерферируют со сферическими волнами, исходящими из источника Р. Здесь также имеются участки, где волны складываются ($++=1$) и гасятся ($+-=0$). Разница лишь в том, что в случае интерференции плоских и сферических волн с увеличением расстояния от центральной оси ширина полос и расстояние между ними уменьшаются. Такую картину, зафиксированную на фотопластинке, называют зонной пластинкой.

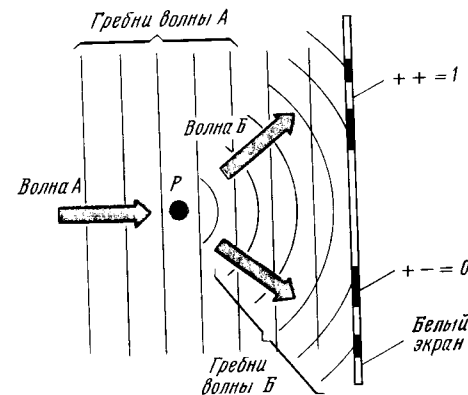


Рис. 22. Интерференция плоской и сферической волн

1.5. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

По определению, данному в учебниках физики, *дифракция света* – это нарушение законов геометрической оптики, наблюдаемое в местах резкой неоднородности среды. Отклонение распространения света от прямолинейного, "огибание" препятствий световыми лучами происходит вблизи краев непрозрачных тел. Оно обусловлено волновой природой света. Как выглядит дифракция у прямолинейного края непрозрачного экрана, иллюстрирует рис. 23. Если осветить экран параллельным пучком света, состоящим из плоских волн, то в области геометрической тени интенсивность света не равна нулю. Она постепенно уменьшается в сторону тени, а в освещенной области возникают полосы максимумов и минимумов освещенности, параллельные краю экрана.

Наблюдаемую картину можно построить, основываясь на волновой теории света и принципе Гюйгенса. Каждую точку среды, которую достигла волна, можно рассматривать как источник вторичных сферических волн, распространяющихся со скоростью, свойственной среде. Огибающая поверхность, касающаяся сверх сферических вторичных волн в том положении, которого они достигнут к моменту t , и представляет собой волновой фронт в это время. К этому принципу французский физик Френель применил рассмотренные нами ранее законы интерференции. Согласно Френелю правило построения огибающей должно быть заменено расчетом взаимной интерференции вторичных волн.

Объяснение дифракции света по Френелю может быть сделано с помощью рис. 24. Это отступление от законов прямолинейного распространения света, но оно является естественным следствием волновой

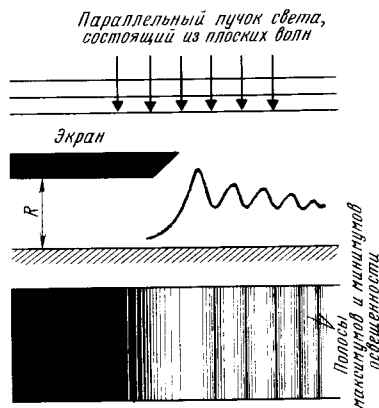


Рис. 23. Дифракция у края экрана

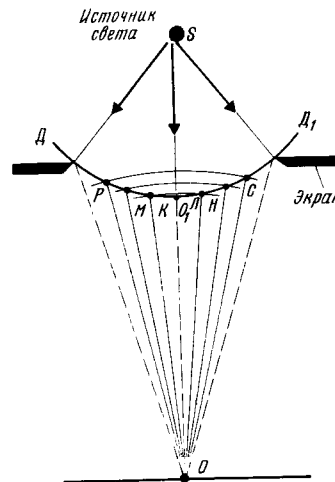


Рис. 24. Объяснение дифракции по Френелю

теории. Действительно, наблюдаемое в каждом случае распределение света есть результат интерференции вторичных волн.

Пусть свет проходит через круглое отверстие в экране. Для того чтобы рассчитать интенсивность света в точке O , применим следующий вспомогательный прием. Проведем из точки O конические поверхности с образующими OKL , OMH , OPC и т. д. до пересечения с поверхностью сферической волны DO_1D_1 . Длину образующих выберем так, что $OL = OO_1 + \lambda/2$, $OH = OL + \lambda/2$ и $OC = OH + \lambda/2$ и т. д. Другими сло-

вами, расстояние от точек O_1, L, H, C, \dots до точки O возрастает на длину полуволны света $\lambda/2$, падающего на отверстие. Поверхность DO_1D_1 разобьем на кольцевые зоны. Площади этих зон практически одинаковы, ибо OO_1 значительно больше $\lambda/2$. Но действие их в точке O различно. Действительно, разность хода до точки O между какой-либо точкой первой зоны и соответствующей точкой второй зоны равняется $\lambda/2$. Поэтому световые волны от первой и второй зон, дойдя до точки O , будут взаимно ослабляться так, что в этой точке действие первой зоны практически уничтожается действием второй.

Подобное рассуждение покажет, что в точке O действия третьей зоны противоположно действию второй, действие четвертой – противоположно действию третьей и т. д., и вообще, действие соседних зон уничтожают друг друга. Если отверстие таково, что в нем умещаются всего две зоны, то в точке O почти не будет света, ибо две соседние зоны взаимно ослабляют одна другую. Большая часть света будет распределена вокруг точки O , так что мы увидим темное пятно, окруженное светлым кольцом. При размере отверстия в три зоны в точке O будет свет, ибо третья зона ослабит действие второй, и центральная точка будет освещена из-за отсутствия ослабляющего действия первой зоны. Светлая центральная точка будет охвачена темным кольцом, за которым вновь будет видно просветление.

Вообще, при четном числе зон в центре будет темное пятно, окруженное чередующимися светлыми и темными кольцами; при нечетном числе зон – в центре светлое пятно, а ближайшее кольцо – темное и т. д. Размеры этих колец тем меньше, чем больше диаметр отверстия, так что при большом диаметре темные и светлые кольца около центра чередуются настолько часто, что мы перестаем различать их и практически не замечаем явления дифракции. Следует отметить, что расчет зон Френеля зависит от длины волны света, поэтому и вид картины от этого сильно зависит.

Точности ради можно отметить, что дифракция имеет место и при отражении экраном света. В отраженной волне, распространяющейся в обратном направлении, возникают сложение и гашение волн. Это существенно при более внимательном рассмотрении работы открытого зеркального резонатора, который используют в лазере. Из-за дифракции на краях зеркал свет возвращается внутрь резонатора, что обеспечивает сравнительно небольшие потери энергии.

Но явление дифракции приносит и огорчения оптикам. Всякий оптический инструмент, и глаз в том числе, снабжен линзами или зеркалами, которые всегда ограничивают волновой фронт, следовательно, при получении изображения мы будем иметь дифракционную картину. И действительно, если взять источник излучения и удалить его в бесконечность, то можно считать, что лучи его параллельны. Поставив на их пути линзу или объектив, заметим, что изображение светящейся точки будет представлять собою не яркую точку на темном фоне, а довольно сложную систему светлых и темных колец, переходящих одно в другое и постепенно сливающихся с окружающим темным фоном. Характерно, что чем больше диаметр объектива, тем мельче дифракционная картина.

Никакие конструктивные объективы не помогают избавиться от этого недостатка, так как он обусловлен самой волновой природой электромагнитных колебаний. И именно он определяет одну из основных характеристик оптических приборов — их разрешающую способность, т. е. способность различать две близко расположенные светящиеся точки (например звезды). Это явление, ухудшающее разрешающую способность электронных микроскопов, заставило Денниса Габора задуматься над тем, как можно устранить последствия дифракции. И он предложил способ, в котором были заложены основные принципы голографии. Но об этом немного позже.

На рис. 25 показано, каким образом, возникает дифракционная картина, если источник удален в бесконечность. В этом случае плоская падающая волна B_1 преобразуется в сферическую волну B_2 , центр которой S' представляет собою геометрическое изображение бесконечно удаленного источника. На самом деле структуру изображения S' точечного источника S определяет явление дифракции. По принципу Гюйгенса — Френеля каждая точка поверхности волнового фронта B_2 может быть рассмотрена как вторичный источник. Разные точки одного волнового фронта ведут себя как когерентные синхронные вибраторы, и испускаемые ими волны могут интерферировать. В некоторую точку P_1 плоскости Π , проходящей через геометрическое изображение S' источника, придут колебания, дифрагированные всеми точками волновой поверхности B_2 . На рисунке показаны два луча, дифрагированных точками M_1 и M_2 , тогда интенсивность света в точке P_1 представляет собой результат интерференции колебаний, дифрагированных всеми точками волновой поверхности. Рассчитав освещенность в различных точках плоскости Π в окрестности точки S' , мы получаем структуру изображения точечного источника. Его дифракционная картина зависит от оправы объектива. Исследовать структуру этой дифракционной картины — значит изучить явление дифракции в параллельных лучах, или дифракцию Фраунгофера.

В действительности чаще всего приходится сталкиваться с вариантом, когда источник находится не в бесконечности. Такой случай показан на рис. 26. Взяв поверхность волнового фронта за исходную,

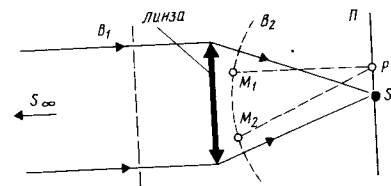


Рис. 25. Получение дифракционной картины от источника, удаленного в бесконечность

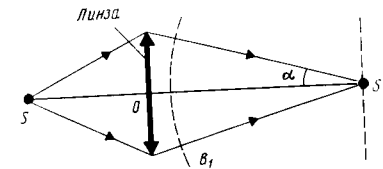


Рис. 26. Результат дифракции как преобразование Фурье распределения амплитуд по поверхности В

можно, применяя принцип Гюйгенса — Френеля, рассчитать структуру дифракционной картины изображения точечного источника. Если рассматривать слабо сходящийся поток (угол λ мал), можно показать, что принцип Гюйгенса — Френеля идентичен тому, что в математике называют преобразованием Фурье. Следовательно, мы можем называть дифракционную картину S' преобразованием Фурье распределения амплитуд и фаз на поверхности фронта волны B_1 . Соответственно можно рассчитать распределение амплитуд и фаз на поверхности волнового фронта, если известно распределение амплитуд и фаз на дифракционной картине. Распределение амплитуд и фаз на поверхности волнового фронта является обратным преобразованием Фурье распределения амплитуд и фаз в плоскости дифракционной картины. Этими двумя понятиями широко пользуются и в физической, и в цифровой голографии.

Итак, пусть за объективом установлено круглое отверстие. Тогда дифракционная картина будет иметь круговую симметрию. Светлое пятно в центре окружено системой темных и светлых колец, освещенность которых убывает по мере удаления от геометрического центра картины. Так как интенсивность колец мала по сравнению с интенсивностью центрального пятна, то оно и служит изображением точечного источника. Если угловая апертура (размер отверстия) равна 2λ (в стерadianах), то радиус r (в микрометрах) центрального пятна дифракционной картины определяется по формуле

$$r = \frac{1,22 \lambda}{2 \alpha},$$

где λ — длина волны света [мкм], испускаемого источником S .

Для объектива, у которого $2\alpha = 0,25$ рад и длины волны $\lambda = 0,6$ мкм, получим $r = 3$ мкм. Если увеличивать входное отверстие, то диаметр дифракционного пятна уменьшится, и наоборот. Образованную точечным источником дифракционную картину от идеальной оптической системы называют диском Эри. Профиль диаметрального сечения диска Эри показан на рис. 27.

Мы рассмотрели дифракцию на круглом отверстии, и она оказалась круговой. А вот дифракция на амплитудной решетке, представляющей собой экран с большим числом одинаковых параллельных щелей, равноотстоящих одна от другой, имеет иной вид. Рассмотрим решетку

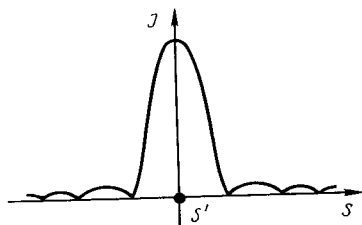


Рис. 27. Профиль диометрального сечения диска Эри

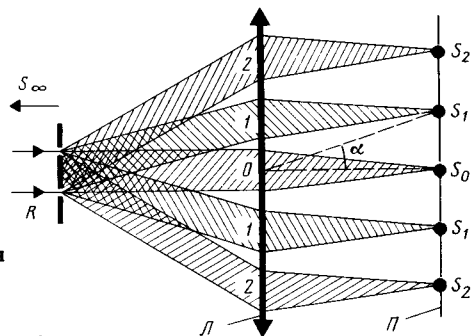


Рис. 28. Наблюдение максимумов решетки в фокусе объектива

R , освещенную параллельным пучком монохроматического света, направленным перпендикулярно к плоскости решетки (рис. 28). В результате дифракции решетка посылает пучки света в разных направлениях. Центральный пучок выглядит так, как если бы решетки не было. Сверху и снизу от него расположены два пучка, симметричных относительно центрального, затем еще два и т. д. Причем каждая следующая пара более отклонена от центрального. Но каждый из них, как и падающий пучок, параллельный. С помощью линзы L соберем дифрагированные пучки в фокальной плоскости Π . Они дают разные изображения точечного источника S . Первое пятно S_0 есть прямое изображение или максимум нулевого порядка, следующие два — это максимумы первого порядка, затем — максимумы второго и т. д. Первое изображение имеет наибольшую интенсивность, у остальных она уменьшается по мере удаления от центрального. По хорошо известным законам геометрической оптики следует, что угол, определяющий положение максимума, может быть найден из соотношения

$$\alpha = P \frac{\lambda}{a},$$

где a — период решетки, P — номер порядка.

Если же создать решетку, прозрачность которой меняется по синусоидальному закону, то при дифракции на такой решетке образуются, помимо прямого изображения, только максимумы первого порядка. Этот результат легко получить, вычислив преобразование Фурье функции $\cos^2 x$, дающей распределение амплитуд. Это и есть дифракция в параллельных лучах на синусоидальной решетке. Однако опыт показывает, что если изменение прозрачности хоть немного отстает от закона $\cos^2 x$, то сразу появляются и другие максимумы. Если заменить решетку, изменяющую амплитуду по закону $\cos^2 x$, на другую, изменяющую фазу по тому же закону, то и в этом случае получим одно прямое изображение и два максимума по его бокам.

Теперь рассмотрим круглую решетку. Ее вполне возможно изготовить самостоятельно. На белой бумаге начертим несколько концентри-

ческих окружностей радиусом, который будем менять от одной окружности к другой как квадратный корень из последовательности целых чисел $0, 1, 2, 3, \dots$. Затем нужно зачернить через один интервал промежутки между окружностями и сфотографировать полученный рисунок. Это будет так называемая *зонная решетка*. Для нее изменение коэффициента пропускания можно характеризовать зависимостью, показанной на рис. 29, а.

Осветим такую решетку параллельным монохроматическим пучком света. Через ее центральную часть пройдет прямой пучок S_0 , и на оси справа от линзы L будут расположены действительные изображения источника S_3, S_2, S_1 (рис. 29, б), а справа от линзы L будут расположены мнимые S'_3, S'_2, S'_1 (их построение показано штриховыми линиями). Из рисунка видно, что мы имеем дело как бы с многофокусной линзой.

Основная забота специалистов по голографии в том и состоит, чтобы уменьшить число таких максимумов до предельно возможного минимума, т. е. хотя бы до двух. Подобный пример, рассмотренный ранее, показывает, что для этого нужно создать круглую решетку, в которой переход от максимума к минимуму происходил бы не скачком, а плавно и коэффициент пропускания в ней должен изменяться по закону $\cos^2 x^2$. Пересняв такую решетку на фотопластинку и осветив ее параллельным пучком света, получим прямой пучок, а также действительное и мнимое изображения источника. Если и теперь на экране появятся дополнительные изображения (а это не исключено, поскольку коэффициент пропускания негатива по амплитуде не совпадает точно с заданным), нужно сделать решетку менее контрастной. Как иногда говорят специалисты по электронике и фотографы, нужно правильно выбрать рабочую точку на характеристической кривой фотоматериала.

Изготовление дифракционных решеток раньше требовало большого мастерства — ведь их делали почти вручную. Для этого тонким резцом проводили параллельные штрихи на поверхности металлического

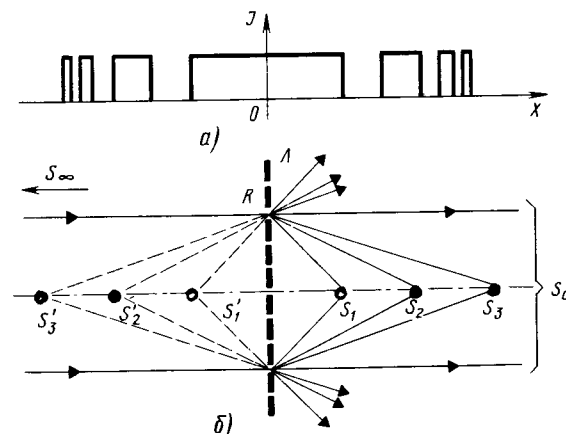


Рис. 29. Профиль круглой решетки (а) и максимумы ее (б)

зеркала, если решетка отражала световые волны, и на стеклянной пластине, если решетка пропускала их. Поскольку резец тупится, трудно обеспечить равенство ширины штрихов. А это очень важно, ибо решетки должны обладать малым периодом и большим удельным числом полос. В современных решетках это число достигает 1200 на 1 мм при ширине до 100 мм. Изготовить такую решетку под силу только первоклассной делительной машине с программным управлением.

Именно поэтому в последние годы стали производить решетки, полученные путем фотосъемки на специальные фотопластинки с высокой разрешающей способностью фотослоя интерференционной картины, возникающей при сложении двух плоских световых волн, падающих под разными углами на плоскость фотопластинки.

Теперь рассмотрим, что произойдет, если направить плоскую волну на плоское зеркало. Будет ли наблюдаться в этом случае интерференция? Оказывается, да! На рис. 30, а показано, как на плоское зеркало Π падает световая волна и отражается от него в обратном направлении. Отраженные лучи могут интерферировать с падающими. Например, луч $A_1 K_1 B_1$, отражаясь в точке B_1 , интерферирует в точке K_1 с падающим лучом. Разность хода и падающего и отраженного лучей $\delta = 2K_1 B_1$. Теперь мы знаем, что если разность хода содержит четное число полуwave, то в точке K_1 будем иметь максимум освещенности. То же самое можно сказать и про точки K_2 и K_3 . Все эти максимумы расположены в плоскости $K_1 K_2 K_3$, параллельной плоскости зеркала Π . Плоскость, где расположены максимумы освещенности, называют *плоскостью пучностей*.

Если же δ содержит нечетное число полуwave, то наблюдается минимум освещенности. Плоскость, на которой лежат такие точки, называют *плоскостью узлов*. Расстояние между двумя соседними плоскостями пучностей (или плоскостями узлов) равно $\lambda/2$, расстояние же между соседними плоскостями пучностей и узлов — $\lambda/4$.

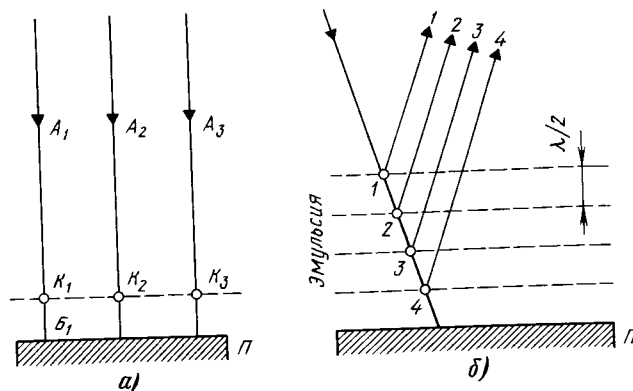


Рис. 30. Образование стоячих волн

Теперь покроем зеркало толстым слоем фотоэмульсии и не обычной, а такой, которая состоит из очень мелких зерен. Эта эмульсия имеет высокую разрешающую способность. Осветим полученную фотопластинку параллельным монохроматическим пучком света с длиной волны λ . Если толщина фотоэмульсии превышает длину волны света в несколько раз, то в ней зафиксируется картина интерференции падающих на зеркало и отраженных от него волн. После проявления фотопластинки и мы получим ряд полупрозрачных отражающих слоев серебра, отстоящих друг от друга на равных расстояниях $\lambda/2$.

Теперь осветим фотопластинку белым светом, в котором содержится широкий спектр длин волн. Присутствующие в белом свете лучи с длиной волны λ , отразившись от всех слоев серебра, окажутся в фазе. Действительно, разность хода лучей одинакова и равна $\lambda/2$ (рис. 30, б). Это относится ко всем слоям серебра. Следовательно, мы получим в отраженном свете максимум интенсивности только для длины волны λ . Именно на этом эффекте основаны голограммы Денисюка, восстанавливающие изображение в белом свете.

Для других длин волн расстояние между слоями больше или меньше $\lambda/2$. Следовательно, от полупрозрачных слоев серебра отразится множество лучей, разность хода которых принимает всевозможные значения. В результате интерференции они взаимно гасятся. Иными словами, пластинка, освещенная белым светом, работает как интерференционный фильтр, отражающий только монохроматический свет, которым был освещен при экспонировании.

Этот принцип вначале был использован французским ученым Габриелем Липманом в цветной фотографии в конце XIX века, за что в 1908 г. он был удостоен Нобелевской премии. Он вставлял специальную пластинку в кассету со ртутью, которая давала абсолютную ровную поверхность — идеальное зеркало. Свет, проходя через эмульсию, отражался от ртути и возвращался обратно. При интерференции образовывались стоячие волны, в результате чего кристаллы серебра после проявления эмульсии располагались слоями. При рассмотрении такого негатива свет отражается от него так, что изображение видно в настоящих цветах. Рассматривая отражение от пластинки в нормально падающем белом свете, мы увидим в каждой точке отражение света тех длин волн, которые попали в нее при фотографировании, т. е. получаем воспроизведение цвета. Это явление лежит в основе цветной голографии.

1.6. УДАЧА И НЕУДАЧИ ГАБОРА

Деннис Габор, венгр по происхождению, в 1927 г. окончил Высшее техническое училище в Берлине. Он поступает на службу в лабораторию фирмы "Сименс", производящей электронную технику. Работая над катодной системой электронно-лучевой трубки, он изобретает магнитную линзу. При этом Габор почти вплотную подходит к изобретению электронного микроскопа. Но этого

не случилось. Электронный микроскоп появился позже, после работ физиков Буша и Вольфа. Но именно работа над электронным микроскопом стимулировала Габора к созданию принципиально нового метода изображений.

Вот как писал Габор о своем состоянии в те годы: "В то время я очень интересовался электронным микроскопом. Это был удивительный прибор, который давал разрешение в сто раз лучше, чем оптический микроскоп и тем не менее не оправдывал надежд на разрешение атомов кристаллической решетки. Длина волны быстрых электронов (около 0,05 Å) была для этого достаточной, но электронная оптика оказалась довольно несовершенной. Наилучшая электронная линза, которая могла быть изготовлена, по оптическим характеристикам была сравнима с дождевой каплей, а не с объектом оптического микроскопа и никогда не могла быть усовершенствована. Теоретический предел электронного микроскопа оценивался в то время в 4 Å , что было в два раза хуже величины, требуемой для разрешения атомов кристаллической решетки. На практике же достижимый предел не превышал 12 Å . Эти пределы вытекали из необходимости ограничивать угловую апертуру электронной линзы до нескольких миллирадиан. При такой апертуре сферические aberrации равнялись дифракционному пределу разрешения. Увеличение апертуры вдвое приводило к уменьшению дифракционного предела в два раза, но при этом сферические aberrации возрастали в восемь раз. Регистрируемое в этих условиях изображение получалось безнадежно размытым. После длительного размышления над этой проблемой я в один из прекрасных весенних дней 1947 г. неожиданно нашел ее решение". Оно появилось из-за необходимости исправления сферической aberrации электронных линз.

В 1947 г. было сделано научное открытие, которое первоначально восприняли просто как очередное доказательство волновых свойств света, но впоследствии оказалось, что оно более фундаментально. Именно тогда была создана голография. Габор сообщил о разработанном им методе только узкому кругу специалистов. Он назвал метод *голографией*, что означает "полное (объемное) изображение". В отличие от фотографии, которая фиксирует только интенсивность света и создает плоское изображение объекта, голография регистрирует волновой фронт светового луча и воспроизводит трехмерное изображение предмета.

Габор обратил внимание на парадокс, связанный с образованием изображения в фотографии. Изображение предмета на фотопластинке получается четким только при определенном расположении предмета, объектива и фотопластинки. Хотя очевидно, что лучи света, образующие изображение в плоскости фотопластинки, не исчезают и к ним не добавляются другие лучи на всем протяжении от предмета до фотоаппарата. Поэтому нет оснований сомневаться в том, что изображение присутствует в скрытом виде в любой плоскости между предметом и объективом, в частности в плоскости, которая расположена непо-

средственно перед линзой. Разбираясь в причинах этого, Габор создал теорию образования изображения. К открытию голографии Габора привела проблема усовершенствования электронного микроскопа, которой он занимался вместе с сотрудником И. Вильямсом. В чем же заключалась проблема?

К 1946 г. закончился период систематического увеличения разрешающей способности электронных микроскопов, когда устранили астигматизм объектива и достигли разрешающей способности, лишь незначительно отличающейся от теоретического предела. Он определяется компромиссом между дифракцией и сферической aberrацией в электронных линзах. Следовательно, чтобы еще больше повысить разрешающую способность электронных микроскопов, нужно каким-то способом корректировать электронную линзу. Было выдвинуто несколько предложений, но они давали надежду лишь на незначительные успехи.

Повысить разрешающую способность в 10 раз не было никакой надежды, поскольку это потребовало бы коррекции сферической aberrации с точностью до $1/10\,000$. И если такую точность в оптике можно обеспечить, то все понимали, что скорректировать до такой степени электронную линзу едва ли когда-нибудь будет возможно. И вот Габор предложил новый метод, который представлял собою попытку обойти этот барьер, установленный природой. Он предложил двухступенчатый процесс, в котором предмет регистрируется с помощью пучка электронов, а изображение восстанавливает световой пучок. Aberrации электронной линзы можно исправить оптической системой, используемой на этапе восстановления. Если дифракционная картина, образованная при освещении предмета, фотографируется при когерентном освещении, причем к дифрагированной волне добавляется когерентный фон, то фотография будет содержать полную информацию о всех изменениях, которые претерпела волна при рассеянии на предмете. Более того, изображение предмета может быть восстановлено по этой фотографии без каких-либо расчетов. Необходимо лишь убрать предмет и осветить фотографию только одним когерентным фоном.

Одной из компонент возникающей при этом вторичной волны будет восстановленная исходная волна, рассеянная от предмета. Можно найти условия, при которых остальные компоненты могут быть в достаточной степени отделены от полезной компоненты, восстанавливающей истинное или близкое к нему изображение исходного предмета.

В оптическом диапазоне когерентный фон можно получить многими путями, однако в электронной оптике нет устройства для эффективного расщепления пучка электронов. Таким образом, единственный подходящий способ заключается в использовании в качестве когерентного фона самого освещающего пучка. Это привело Габора к способу освещения расходящейся когерентной электронной волной (рис. 31).

На рис. 31, а показана схема электронного устройства для получения голограммы, а на рис. 31, б – оптического устройства для ее восстановления. Источником света в оптическом устройстве служит ртут-

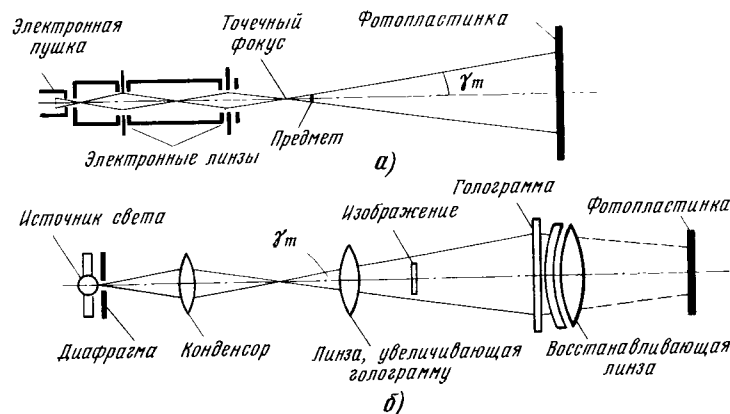


Рис. 31. Схема, показывающая принцип электронной микроскопии на основе метода восстановления волнового фронта

ная лампа. Увеличивающая линза также обеспечивает необходимую коррекцию изображения, которое регистрирует фотопластинка.

Электронное устройство по принципу работы подобно электронному теневого микроскопу, но с тем существенным отличием, что оно работает при когерентном освещении и в таких условиях, в которых теневого микроскоп не применяют, так как интерференционная картина имеет слишком мало сходства с объектом. Электронная пушка с подходящей диафрагмой и системой электронных линз создает когерентный освещающий пучок с точечным фокусом. На небольшом расстоянии от точечного фокуса за ним устанавливают объект, а на сравнительно большом расстоянии — фотопластинку. Угол расходимости пучка γ_m должен обеспечивать требуемый предел разрешающей способности d_A , который согласно формуле Аббе равен

$$d_A = \frac{\lambda}{2 \sin \gamma_m}.$$

Зафиксированная на фотопластинке картина названа Габором голограммой, и это вполне оправдано, так как фотонегатив содержит полную информацию, необходимую для восстановления изображения объекта, который может быть как двумерным, так и трехмерным. Голограмма должна быть отпечатана с негатива или получена на обратной фотопластинке и соответствующим образом проявлена. Позитив устанавливают в оптическое устройство, которое представляет собой оптический аналог электронного устройства.

Все основные его размеры, которые определяют форму волны, изменяют пропорционально отношению длины световой волны к длине электронной волны. Отношение длин этих волн равно 100 000. Поскольку фокусное расстояние электронных линз — параметр несущественный, нет необходимости изменять его в том же масштабе. Чтобы избе-

жать изменения масштаба на фотопластинке, вводят дополнительную линзу, которая увеличивает масштаб в оптическом пространстве путем увеличения фокусного расстояния. Это, как отмечено в работе Габора, означает, что голограмма отодвигается практически в бесконечность. Сферическая aberrация и неустраняемая эллиптичность электронных линз должны быть воспроизведены с большой точностью.

Если все это учтено, то нет необходимости исправлять сферическую aberrацию электронных линз. Для достижения некоторой определенной разрешающей способности нужно только воспроизвести aberrации с той самой точностью, с которой они должны быть исправлены. Но это уже решаемая практически задача, поскольку трудности переходят из области электроники в область оптики, где богатый опыт позволяет изготовить преломляющие поверхности любой формы без ограничений, накладываемых в электронике теорией электромагнитного поля.

Простейшие схемы получения голограмм по методу Габора и восстановления по ним изображения представлены на рис. 32. Эти устройства позволили Габору получить первые плоские голограммы путем сильного диафрагмирования пучка света от ртутной лампы. Диаметр отверстия диафрагмы равен 1 . . . 2 мкм, а время экспозиции — несколько часов. Были использованы коллимированный пучок света и точечный объект, который служил источником возмущения этого пучка света, т. е. источником вторичной волны (рис. 32, а). Таким образом, на фотопластинке складывались две волны, образуя интерференционную картину. Эти волны стали впоследствии называть опорной и объектной, а фотопластинку, на которой была запечатлена интерференционная картина, полученная в результате сложения этих волн, — голограммой, поскольку она несла в себе информацию не только о плоскостной форме объекта, но и о его объемности. Эта информация была заключена в фазе, которая запечатлевалась в виде плотности почернения фотоматериала.

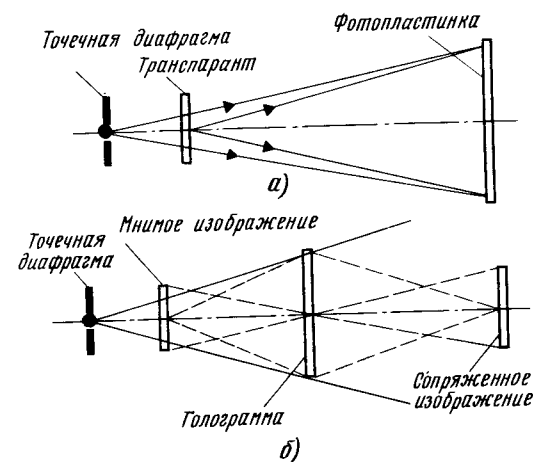


Рис. 32. Схема установок для записи и восстановления по Габору

На рис. 32, б показана схема восстановления изображения. Для этого параллельный пучок света ртутной лампы направляют на голограмму. В результате дифракции на элементах оптической неоднородности голограммы возникает изображение объекта, которое было запечатлено на голограмме. Справа от голограммы расположено действительное изображение, а слева – мнимое. Оба они находятся на одной оптической оси.

Рассмотрение математических зависимостей, описывающих процесс получения голограммы и восстановления по ней изображения, показывает наличие некоторых особенностей, на которые следует обратить внимание. Пусть имеется когерентная монохроматическая волна с комплексной амплитудой U , падающая на фотопластинку:

$$U = A \exp(i\varphi), \quad \exp(i\varphi) = \sin \varphi + j \cos \varphi$$

здесь A и φ – действительные величины – амплитуда и фаза колебаний. Амплитуду U можно разложить на опорную волну (фоновую)

$$U_0 = A_0 \exp(i\varphi_0)$$

и объектную (она может быть названа также вторичной), которая обусловлена возмущением, созданным предметом

$$U_1 = A_1 \exp(i\varphi_1)$$

Таким образом, комплексная амплитуда волны на фотопластинке равна

$$U = U_0 + U_1 = A_0 e^{i\varphi_0} + A_1 e^{i\varphi_1} (A_0 + A_1 e^{i(\varphi_1 - \varphi_0)}),$$

а ее абсолютное значение имеет вид

$$A = [A_0^2 + A_1^2 + 2A_0 A_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_0)]^{1/2}.$$

График плотности почернения фотопластинки, построенный в зависимости от логарифма экспозиции, называемый *характеристической кривой фотоматериала*, имеет вид кривой с двумя изгибами и почти прямолинейным участком между ними. Этот график хорошо знаком даже начинающему фотолобителю. На прямолинейном участке коэффициент пропускания света негативом пропорционален экспозиции, возведенной в степень Γ . Для негатива можно записать

$$\tau_n = (k_n A)^{-\Gamma_n},$$

здесь коэффициент k_n зависит от времени экспозиции. После изготовления позитива с этого негатива световой поток на его выходе пропорционален τ_n^2 , а следовательно, коэффициент пропускания позитива равен

$$\tau_n = [k_n (k_n A)^{-\Gamma_n}] = k A^\Gamma,$$

$\Gamma = \Gamma_n \Gamma_n$ – полная контрастность негатива и позитива.

Если теперь в процессе восстановления изображения осветить позитивную голограмму одним только опорным (фоновым) пучком света, то будет получена "замещающая волна", которая с точностью до постоянного множителя равна

$$U_s = U_0 \tau_n = A_0 e^{i\varphi_0} [A_0^2 + A_1^2 + 2A_0 A_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_0)]^{0,5\Gamma}.$$

Экспериментально установлено, что наиболее благоприятен для записи волны случай, когда $\Gamma = 2$, тогда

$$U_s = U_0 A^2 = A_0 e^{i\varphi_0} [A_0^2 + A_1^2 + 2A_0 A_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_0)] = A_0^2 e^{i\varphi_0} [A_0 + (A_1^2/A_0) + A_1 e^{i(\varphi_1 - \varphi_0)} + A_1^{-1} e^{-i(\varphi_1 - \varphi_0)}].$$

При сопоставлении этого выражения с исходным видно, что если $A_0 = \text{const}$, т. е. если опорный пучок равномерный, то замещающая волна содержит компоненты, пропорциональные исходной волне (это первый и третий члены в скобках). Рассмотрение этого выражения показывает, что в нем содержатся волны-двойники, которые несут одинаковую энергию, но имеют противоположные знаки фазового сдвига, относительного опорной волны. Наличие сопряженных волн приводит к серьезному искажению, если они не могут быть эффективно разделены. Действительное и мнимое изображения располагаются на одной оси и мешают наблюдателю рассматривать их отдельно.

Таким образом, можно отметить, что помимо некоторых удач Габора преследовали и неудачи. Первая из них имеет следующую физическую интерпретацию. Когда голограмму освещают монохроматическим светом того же источника, от которого она была получена, она пропускает свет только в тех местах, где располагались максимумы интерференционной картины, т. е. там, где фазы опорной и объектной волн совпадали. В этих условиях голограмма как бы "выбирает" на поверхности фронта волны источника такие места и пропускает их сквозь себя. Значит, приблизительно на половине площади голограммы будет воспроизведена объектная волна. То, что голограмма не воспроизводит поле объекта на месте темных полос картины интерференции, приводит к некоторой неоднозначности воспроизведения фазы, из-за чего появляется ложное изображение объекта. В устройстве Габора лучи, образующие истинное и ложное изображения, распространяются вдоль одной оси, и поэтому оба эти изображения искажены взаимной интерференцией.

Кроме этого, Габор предполагал начать опыты на электронном микроскопе, а пока "ловил духов", как объяснили его усилия некоторые коллеги. За это время другими методами было достигнуто улучшение изображения в электронном микроскопе. Идеи же Габора надолго остались нереализованными. Лишь через 12 лет, в 1962 г. с появлением лазеров в голографии наступила новая эра. Из лабораторного курьеза голография превратилась в метод, который с каждым годом все более широко используют в науке, практике и даже искусстве. Через 23 года после своего открытия Габор получил признание, он был удостоен Нобелевской премии по физике, избран членом Лондонского Королевского общества и почетным членом Венгерской академии наук. Но все это пришло с некоторым опозданием.

1.7. ПРИНЦИПЫ ГОЛОГРАФИИ

Получая порою неудовлетворительные результаты, Габор понимал, чем они были вызваны: это и отсутствие мощных монохроматических источников света (вспомним, время экспозиции доходило до нескольких часов) и искажение двух изображений, которые накладывались одно на другое, да и еще целый ряд искажений, на которых здесь нет возможности останавливаться, но которые становятся понятными из рассмотрения последней формулы. Ведь в ней есть еще первый и второй члены. Первый – определяет среднюю прозрачность голограммы, которая получилась бы в случае перекрывания луча от предмета, второй – характеризует дополнительную неравномерную засветку голограммы пучком от предмета. Эта составляющая содержит лишь часть информации о предмете, так как в ней отсутствует фазовый спектр. Все это вносит дополнительные сложности в проведение эксперимента.

Получив не очень обнадеживающие результаты, Габор вместе с тем реализовал идею получения пространственных изображений способом записи световых волн без преломляющих оптических приборов, идею, которая долго "витаала в воздухе" и вместе с тем казалась неосуществимой. Принципы ее были предложены и реализованы в то время Габором. Им было введено понятие и разъяснена сущность нового процесса, состоящего из двух этапов: формирования изображения и его восстановления.

На этапе формирования изображения используют две световые волны: одна облучает объект, другая служит для образования однородного когерентного фона. При взаимодействии этих волн возникает хорошо известная в оптике интерференционная картина, которая несет в себе полную запись пространственной структуры световой волны (по амплитуде и по фазе). Записанная на фотоматериал интерференционная картина – голограмма – не имеет никакого сходства с предметом и при визуальном рассмотрении кажется бессмысленной комбинацией полос и дифракционных фрагментов. Но в этой комбинации в закодированном виде содержится информация о форме и объеме объекта.

На этапе восстановления изображения используют голограмму (фотопластинку или фотопленку), освещенную когерентным пучком света, ранее используемым для ее получения. В результате дифракции на микронеоднородностях голограммы происходит перераспределение падающего на нее света и изображение восстанавливается. Таких изображений возникает два: действительное и мнимое. Действительное изображение появляется за голограммой (см. рис. 36), а мнимое – между голограммой и источником.

Процесс получения и восстановления стали называть по предложению Д. Габора и Дж. Струка, с которым он работал, *голографическим процессом*. А возникшая впоследствии наука, занимающаяся изучением этих процессов, – *голографией*. Использование вспомогательного когерентного фона (спорной волны), является характерной отличительной

чертой любой оптической схемы, применяемой в голографии.

Вот как спустя 23 года после своих первых работ высказался Габор о своей идее, ее реализации и последствиях: "Для ученого нет большей радости, чем быть свидетелем того, как одна из его идей открывает собой новую, стремительно развивающуюся отрасль науки. Мне выпало счастье высказать одну такую идею. В тот период я много занимался электронной микроскопией. Волны де Бройля были достаточно короткими для разрешения атомных решеток, но из-за несовершенства электронных линз разрешающая способность оказывалась ограниченной практически. При апертуре, обеспечивающей необходимый дифракционный предел разрешения, можно было получить только размытое изображение. Тем не менее, если исходить из принципа Гюйгенса, пучок должен содержать всю необходимую информацию. Что мешает ее расшифровать? Очевидно то, что на пластинке регистрируется только половина информации: мы пренебрегаем фазой волны. Нельзя ли ее выявить с помощью интерференции, налагая когерентный фон. Немного математики и несколько опытов позволили быстро проверить идею о восстановлении волн. Достаточно было осуществить суперпозицию комплексной волны, приходящей от объекта, с простой волной (плоской или сферической), сделать фотографию, затем, осветив ее простой волной, восстановить исходную картину. Возникающее при этом изображение было трехмерным. Мешало одно незначительное обстоятельство: одновременно восстанавливалось еще одно изображение – двойник объекта.

Пути науки часто неисповедимы. Электронная микроскопия так до сих пор и не извлекла существенной пользы из восстановления волн, тогда как модельные опыты (именно такими они были задуманы) положили начало голографии. Свое второе рождение голография пережила в 1962 г., когда Э. Лейт и Ю. Упатниекс применили лазеры. Они получили восстановленные изображения несравненно лучшие, чем я в 1948 г."

1.8. ЭКСПЕРИМЕНТ ЛЕЙТА И УПАТНИЕКСА

Физики Мичиганского университета Э. Лейт и Ю. Упатниекс, которые занимались вопросами пространственной фильтрации оптической информации, использовали методы радиолокации для обработки информации. Естествен вопрос, какое отношение к оптике имеет радиолокация, теория связи? Выяснилось, что можно назвать ряд оптических проблем, касающихся передачи, накопления и обработки информации, которые аналогичны проблемам оптической фильтрации и обнаружения, рассматриваемых теорией связи. Разница есть только в природе информации. В системах связи она имеет временную природу. Это означает, что по форме волна тока или напряжения оказывается модулированной. В оптических системах у информации пространственная природа – амплитуде и фазе света свойственно пространственное распределение. Представляя себе про-

цесс передачи сигналов в радиотехнике, легче понять процессы в голографии.

Лейт и Упатниекс посмотрели на голографический процесс с позиций теории связи. Это позволило им обнаружить сходство между габоровским процессом восстановления волнового фронта и радиолокационным методом обработки сигнала, полученного от антенны с синтезированной апертурой. Ученым было хорошо известно, что сигнал в радиотехнике передается с помощью несущей электромагнитной волны, на которую накладывают передаваемую информацию в виде модуляции несущей по амплитуде, фазе или частоте (а иногда используют и их комбинацию). Эту "смесь" излучает антенна, а затем принимает потребитель. Частота несущей должна превышать ширину полосы частот передаваемого сигнала. Из теории связи известно, что спектр такого модулированного сигнала состоит из центральной несущей и двух боковых частот, симметрично расположенных относительно нее. И радиотехника располагает способами, с помощью которых можно сравнительно просто отфильтровать полезный сигнал. Сигнал демодулируют, т. е. отделяют от несущей и направляют пользователю. Этот сигнал совершенно идентичен переданному сигналу. В голографии производится та же демодуляция, основанная на явлении дифракции, только оптическими средствами.

Сопоставляя оба процесса, исследователи пришли к выводу о возможности применения методов радиотехники в голографии. Речь идет о записи пространственно-частотного спектра предмета на голограмму. Они предложили использовать в голографии такую же несущую (опорную) волну, как и в радиотехнике. Но в радиотехнике она зависит от времени, а в голографии она пространственна, ибо голограмма фиксирует, как меняется амплитуда или фаза в пространстве от точки к точке. Как создать пространственную несущую волну в плоскости фотопластинки? Авторы предложили для этого использовать часть несущей волны, направляемой на фотопластинку под некоторым углом. Это легко выполнить с помощью призм и зеркал.

Таким образом, с позиций теории связи голографический процесс может быть представлен так: на внеосевую несущую волну накладывают объектную волну, которая моделирует несущую. В пространственно-частотном спектре голограммы обе восстановленные волны могут быть изображены боковыми полосами, они окажутся пространственно разделенными. В схеме Габора опорной служила волна, непосредственно прошедшая через объект. Лейт и Упатниекс в процессе записи использовали добавочную волну, расположенную вне оси предмет – голограмма. Это, как мы увидим немного позже, позволило получать голограммы непрозрачных и трехмерных объектов. Уже в 1962 г., еще до появления лазеров, исследователи реализовали свою схему. Они использовали в качестве источника света ртутную лампу. Пучок света от одного источника разделили на два. Один направили на диапозитив, другой – на призму, расположенную над объектом, которая отклоняла ее в направлении фотопластинки. На фотослое суммировались две

световые волны: несущая и объектная. В результате на фотопластинке фиксируется их интерференционная картина. Для восстановления голограмму помещали в когерентную плоскую волну, она дифрагировала на амплитудных неоднородностях голограммы, в результате чего восстанавливались два изображения: действительное и мнимое. Однако, благодаря тому, что использовалась так называемая внеосевая волна, эти изображения удобно разнесены в пространстве.

Оптическая схема Лейта и Упатниекса изображена на рис. 33 (а – запись голограммы, б – восстановление изображения). Мнимое изображение наблюдатель может видеть через голограмму как бы висящим в воздухе. Действительное изображение расположено перед голограммой, и рассматривать его нужно под другим углом. Угол между направлениями на эти изображения равен удвоенному углу θ при записи голограммы.

С появлением в 1964 г. газовых лазеров Лейт и Упатниекс отказались от получения голограмм с транспарантов и стали работать с трехмерными объектами. Эти голограммы были очень совершенны, а изображения, восстанавливаемые в них, так точно передавали наблюдаемый предмет, что у зрителя возникал эффект присутствия. Высокое качество и натуральность трехмерных изображений вызвали всеобщий интерес к идее восстановления волнового фронта и подтвердили ее блистательные перспективы. Голографию стали воспринимать как реальный метод, а не "ловлю духов". Началось триумфальное шествие голографии по всему миру. (Лейт и Упатниекс решили проблемы, поставившие Габора в трудное положение, следующим образом: во-первых, пучок света, образующий когерентный фон, они направили на фотопластинку под довольно большим углом с пучком света, дифрагированным объектом; это позволило получить изображения, ко-

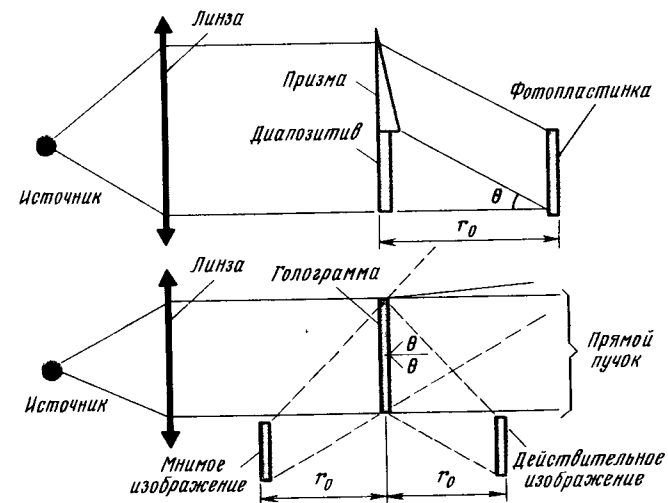


Рис. 33. Схема Лейта и Упатниекса

торые при наблюдении не перекрываются. Во-вторых, в качестве источника излучения они использовали лазер, высокие интенсивность излучения и когерентность которого обеспечивают высокое качество восстановленного изображения.

Так были получены результаты, которые теперь мог наблюдать каждый. По меткому выражению Р. Кольера, одного из крупных исследователей в области голографии, Лейт и Упатникс заложили практические основы современной голографии.

В 1964 г. профессором Мичиганского университета Дж. Строуком, соавтором самого термина голография, а также автором многих принципиальных работ, выполненных совместно с Габором, был прочитан первый курс лекций по голографии. В 1966 г. он также выпустил первую монографию, в которой были изложены основы теории голографии. Книга была переведена на русский уже в следующем году и вышла в свет под названием "Введение в когерентную оптику и голографию".

В 1960 – 1962 гг. Юрий Николаевич Денисюк, сотрудник Государственного института, провел исследование, основным результатом которого было обнаружение так называемого явления отображения оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения. Эти исследования были основой голографии с записью в трехмерных средах. Голография Габора является лишь частным случаем при таком подходе. Но об этом чуть позже.

А сейчас от теории перейдем к практической голографии. А для этого нужно совсем немного – лазер, несколько зеркал и фотопластинок. Посмотрите, как их нужно расположить – рис. 34. Хорошо видно, что на объект и на плоское зеркало, установленное рядом с ним, направлено лазерное излучение. Поскольку луч лазера довольно узок, его следует расширить с помощью оптической системы. Ею может служить объектив от фотоаппарата. На фотопластинку падают два пучка света: опорный, т. е. часть света лазера, отраженного от зеркала, и объектный – часть света, рассеянного объектом. Эти два пучка интерferируют. Картина интерференции фиксируется в фотослое пластинки.

После ее проявления можно посмотреть на интерференционную структуру голограммы. Она внешне ничем не отличается от равномерно засвеченной фотопластинки. Те кольца и полосы, которые могут быть видны на голограмме, обусловлены дифракцией света на пылинках, попавших на зеркала или объектив; они ничего общего не имеют с той интерференционной картиной, которая несет в себе запись световой волны, рассеянной объектом.

Для получения восстановленного изображения не следует разбирать предыдущую установку и собирать новую. Для того чтобы получить восстановленное изображение, нужно убрать объект, а голограмму поставить на то же место, где она находилась при экспонировании. Если включить лазер и посмотреть через голограмму, как будто он вовсе и не был убран. Наблюдаемый предмет кажется абсолютно реальным, и,

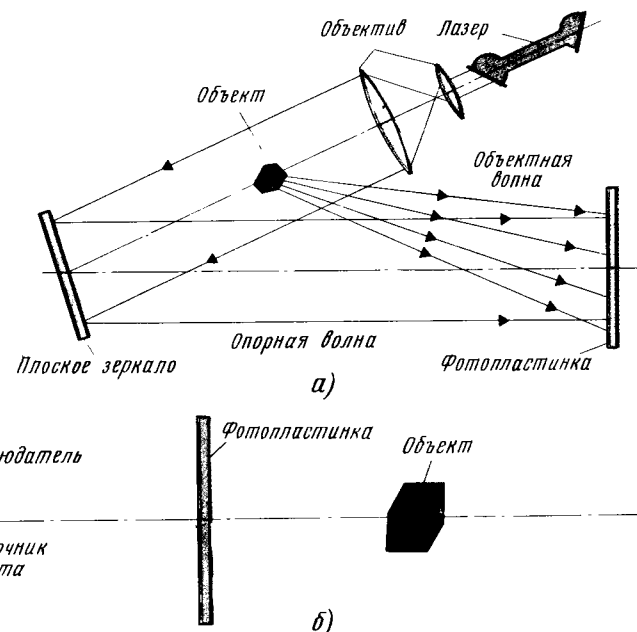


Рис. 34. Схема установки для получения голограммы (а) и восстановления изображения (б)

меняя положение головы, можно видеть его правую и левую стороны. Кроме того, разглядывая ближние и дальние части объекта, мы должны будем по-разному аккомодировать глаз, т. е. настраивать его фокусировку на ближнюю или дальнюю часть. Ну, а те, кто много фотографировал и знает, что такое глубина резкости, должен будет при съемке изображения правильно установить диафрагму, чтобы она обеспечила необходимую глубину резкости. Если этого не сделать, то одни части предмета на снимке получатся резко, а другие будут размыты.

Поскольку процесс записи двумерной голографии неоднозначен, то при восстановлении наряду с исходной волной, дающей мнимое изображение объекта там, где он находился при записи, действует и другая, сопряженная волна, дающая действительное изображение объекта. Это изображение имеет фазовый рельеф, смещенный на π относительно рельефа мнимого изображения, и поэтому обладает свойством псевдоскопичности – впадины на нем заменены выпуклостями и наоборот, изображение как бы "вывернуто наизнанку".

Таким образом, каждый, работающий в кабинете физики школы или института, где есть газовый лазер, может при желании получить голограмму и восстановить с нее записанное изображение. Все это не так уж сложно!

Заметим, однако, что есть ряд ограничений, которые необходимо знать тем, кто хочет заняться голографией всерьез.

Главное ограничение накладывает лазер — его мощность и качество, а также условия при записи голограммы. Большинство голограмм готовят в затемненном помещении, так, чтобы в интерференционной картине не участвовал свет посторонних источников.

Расстояния между линиями и полосами интерференционной картины на голограмме примерно такие же, как и на дифракционной решетке. На каждом миллиметре поверхности их около двух тысяч. Поэтому для изготовления голограмм пригодны не всякие фотопластинки, а только те, которые способны зафиксировать столь тонкие детали (у нас выпускаются промышленностью такие пластинки — это "Микрат-1000").

Проблему представляет также борьба со всевозможными вибрациями и смещениями установки. Проходящая под зданием линия метро, например, может привести к систематическим вибрациям установки. Незначительные сами по себе, они стали причиной того, что первые голограммы оказывались размытыми и непригодными для восстановления. Лишь когда эксперименты были перенесены на ночное время, удалось получить доброкачественные голограммы.

Дело в том, что для записи голограмм использовали газовый лазер малой мощности. Время экспозиции было равно 20...30 с, поскольку такой лазер дает весьма тусклую интерференционную картину. Если в течение экспозиции аппаратура или объект сдвигались хотя бы на 0,001 мм, т. е. на длину волны света, то интерференционная картина, зарегистрированная на фотопластинке, оказывалась смазанной. Восстановить такое изображение невозможно. Даже при слабом смазывании яркость изображения значительно уменьшается. Обычно установку монтируют на массивной плите, устанавливаемой на слабо накачанные резиновые камеры.

Таким образом, маломощные лазеры пригодны для голографирования лишь неподвижных объектов. Но есть и еще одна причина, ограничивающая их применение. Она связана с так называемой длиной когерентности излучения. Дешевые маломощные лазеры ЛГ-55 и ЛГ-45 обладают небольшой длиной когерентности. При записи голограммы опорный и объектный пучки проходят пути различной длины прежде, чем они встречаются на фотопластинке, создавая интерференционную картину. Свет, попадающий на фотослой от ближайших частей объекта, проходит меньший путь, чем от более удаленных. Если разность этих путей больше длины когерентности лазерного излучения, то интерференционная картина не получится. Это особенно четко проявляется, когда хотят получить голограмму с помощью лазера с малой длиной когерентности при значительной глубине голографируемой сцены. Если длина когерентности лазерного излучения не превышает 0,5 м, то получить хорошую голограмму группы предметов, расположенных на глубине 1 м не удастся. Голограммы же плоских объектов можно получать с простейшими лазерами и даже с помощью газоразрядных ламп.

При восстановлении изображения различие длины пути света не имеют такого значения, как при записи. Здесь можно использовать и лазер, и газоразрядный источник, и даже обычный проектор, используемый для демонстрации слайдов. Только вместо слайда в него следует установить светофильтр. Однако нужно помнить, что чем более монохроматичен свет источника, которым освещают голограмму, чем он мощнее, тем выше качество восстановленного изображения.

Интересно проделать такой опыт: направить на голограмму излучение, отличное цветом от того, что использовали при записи. В этом случае восстановленное изображение мы увидим в новом цвете. Но это еще не все! Оно будет больше или меньше реального объекта в зависимости от того, больше или меньше длина волны восстанавливающего излучения по отношению к длине волны записывающего.

Можно проделать и такой эксперимент: разрезать стеклорезом фотопластинку — голограмму пополам и восстановить изображение сначала одной половины, а затем другой. В обоих случаях мы увидим полностью восстановленное изображение, которое будет отличаться от первоначального только несколько худшим качеством. Этот эксперимент можно продолжать, многократно разрезая голограмму на мелкие части, эффект остается прежним.

Каждый из вас теперь и сам может, очевидно, дать объяснение этому явлению. Дело в том, что если объект отражает упавшее на него лазерное излучение диффузно, т. е. во все стороны равномерно, то информация от каждой его точки попадет в каждую точку голограммы. Иначе говоря, в каждой точке голограммы записана информация о всей форме объекта. Но чем меньше размеры голограммы, тем из меньшего количества информации будет состоять восстановленное изображение.

Проведем еще один эксперимент, который под силу начинающему фотографу. Сделаем контактный отпечаток с голограммы. Для этого нужно только наложить голограмму на фотопластинку и отэкспонировать ее. Проявим фотопластинку — это будет негатив исходной голограммы. Используем его для восстановления изображения. Мы получим удивительный результат: в восстановленном изображении все осталось на своих местах — светлые ранее места и теперь остались светлыми, а темные — темными. Следовательно, как негативная, так и позитивная голограммы дают при восстановлении одинаковое изображение. Это вызывает удивление, особенно у занимающихся фотографией, — там всегда с негатива получается позитив и наоборот. А здесь вот такой новый эффект!

В чем же дело? И это теперь вы можете объяснить. Неосвещенные точки предмета вовсе не дают зонных решеток Френеля, они не могут появиться и на негативной копии голограммы, поэтому при восстановлении эти точки так и остаются темными. Светлые же точки предмета участвуют в образовании узора на голограмме, и дифракционные свойства этого узора совсем не меняются при замене темных мест голограммы светлыми, а светлых — темными.

Отметим и еще одну особенность голограммы в сравнении с фотографией. Перепад яркости белого и темного на фотографии, как правило, не превышает ста. Между тем как реальные объекты, обладающие так называемой блестястью (полированные металлические изделия, золотые украшения и т. п.), часто имеют гораздо большие перепады яркости. Голограмма, обладая фокусирующими свойствами, используется для построения наиболее ярких участков свет, падающий на всю ее поверхность, и способна передать градации яркости до $10^5 \dots 10^6$ раз. Попробуйте сфотографировать и голографировать один и тот же золоченый предмет. Отпечатайте фотографию и проявите голограмму. Восстановите с нее изображение и рядом поставьте фотографию – вы увидите, насколько отличаются по качеству изображения одного и того же предмета!

Еще один практический совет. При конструировании голографической установки удобны детали из наборов ОСК-2, такой шифр имеет так называемая оптическая скамья. Она довольно дорогая. Очень многие элементы этих дорогих наборов излишни для голографии, а другие, самые необходимые, имеются в недостаточном количестве. В настоящее время разработаны специальные наборы оптических деталей для голографии. Например, Всесоюзным научно-исследовательским институтом оптико-физических измерений создана установка УИГ. Их несколько модификаций. Установка УИГ-2 содержит гелий-неоновый лазер ЛГ-38, коллиматор, диффузор, столики юстировочные, юстируемую головку, держатель светофильтров, призмы, оправы, приспособление для фотообработки голограмм. Кроме них, имеются также установки СИН, МГИ-1, КГ-100 и КГ-250.¹

1.9. МЕТОД ДЕНИСЮКА

В 1958 г. Ю. Н. Денисюк, будучи аспирантом, предложил в качестве диссертационной тему "Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения". Тема была настолько необычной, что ему не нашлось научного руководителя. Тогда аспирант с дерзостью, свойственной молодости, взялся за самостоятельное решение большой задачи, стоящей на грани возможностей оптики. Денисюк был твердо убежден в правильности появившейся у него идеи и смело взялся за ее реализацию.

Суть идеи такова: если нет света, то мы не видим предметов. Только когда на них падает свет, человек их видит. Он видит собственно отраженные от предмета волны электромагнитного происхождения. Иначе говоря, человек благодаря свету видит не сами предметы, а их световые образы. Как они возникают? Световые волны беспрепятственно движутся в пространстве. Когда на пути возникает предмет,

волны, столкнувшись с ним, отражаются от его поверхности. Вот благодаря этим отраженным волнам человек и получает зрительное представление о предмете, о его форме и цвете. У Юрия Николаевича возникла идея: записать световое поле на фотопластинке по предложенной им методике и затем направить на эту пластинку плоскую световую волну – она отразится в форме, уже записанной. Тем самым будет возобновлен образ отсутствующего предмета. Идею нужно проверить экспериментально. Родилась в общих чертах и схема экспериментальной установки (рис. 35). Световой поток от источника изображен в виде волнового фронта Φ . Дойдя до объекта O , световая волна отразится от него. Форма этой световой волны должна измениться, поскольку объект объемный. Теперь в этой отраженной волне присутствует в закодированной форме информация об объекте. Закодированная информация содержится в фазе отраженного излучения.

В точке K отраженная волна встречается с волновой поверхностью Φ и в результате интерференции образуются стоячие волны. Они имеют пучности в тех местах, где фазы волн от источника и от объекта совпадают, а узлы – где фазы противоположны. Теперь, если зафиксировать волновой фронт этой стоячей волны, то можно предположить, что в нем содержится не только спектр отраженного предметом излучения, но и все компоненты волнового поля – амплитуда и фаза. Сведения об этих параметрах заключены в причудливых изгибах и изменениях интенсивности поверхностей пучностей стоячей волны.

Это оказалось очевидным, но дало и еще одну идею: записывать нужно интерференционную картину не только по поверхности – в двумерном измерении, – но и в глубине, т. е. запись интерференционной картины должна быть трехмерной. Этот метод регистрации волнового фронта – метод трехмерной фиксации – стал впоследствии называться *метод Денисюка*. На его практическую реализацию ушло несколько лет напряженного труда исследователя, отягченного борьбой

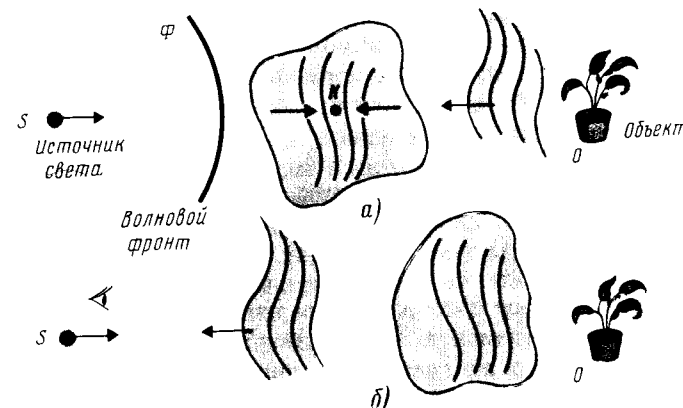


Рис. 35. Схема эксперимента Денисюка:
а – запись голограммы; б – восстановление изображения с голограммы

¹ Практические навыки в применении голографии можно приобрести, прочитав книгу "Оптическая голография. Практические применения". – М.: "Сов. радио", 1978

с рутинерами, не увидевшими большого значения выполняемой работы и стремившимися всеми способами ее прекратить. Да и сама задача оказалась трудной для реализации. Проведение экспериментов для обоснования выдвинутой гипотезы было невозможно из-за отсутствия фотографических пластинок, способных регистрировать стоячие волны. В связи с этим были предприняты дополнительные исследования, направленные на разработку метода приготовления толстослойных фотопластинок на основе современной технологии синтеза эмульсий. Применение сенсibilизации золотом позволило повысить первоначальную чувствительность при сохранении высокой разрешающей способности фотослоя. Попутно были выяснены пути устранения такого нежелательного в данном случае явления, как изменение толщины эмульсионного слоя в процессе проявления и фиксирования фотопластинок.

Другая трудность – отсутствие источников излучения с монохроматическим потоком, в связи с этим работать пришлось с ртутной лампой. Эксперименты, выполненные с простейшими объектами – зеркалами и шкалами микрометров, подтвердили выдвинутую гипотезу.

Теперь на основании развитой теории волновой голографии можно сказать, что принцип трехмерной голографии в общих чертах состоит в следующем. На первом этапе, для записи голограммы фотопластинку с толстым эмульсионным слоем устанавливают перед объективом со стороны источника. После экспозиции и проявления в эмульсионном слое фотопластинки образуется трехмерная слоистая структура, моделирующая пространственное распределение интенсивности в стоячей волне, образованной в результате наложения излучения, рассеянного объектом, и излучения источника. Такая структура обладает избирательностью по отношению к падающему на нее излучению, т. е. работает как интерференционный фильтр. Полученная голограмма допускает восстановление изображения не обязательно от монохроматического источника. Источник может быть со сплошным спектром: либо лампа накаливания, либо Солнце.

Поверхность пучностей стоячей волны есть геометрическое место точек, в которых фаза излучения источника совпадает с фазой излучения, рассеянного объектом. Если на зарегистрированную голограммой поверхность пучностей направить излучение источника, то фаза отраженной волны совпадает с фазой излучения, рассеянного объектом. Амплитуда восстанавливается, так как коэффициент отражения рассматриваемого слоя пропорционален амплитуде излучения, рассеянного объектом. Каждую зарегистрированную трехмерную голограммой поверхность стоячей волны можно представить как зеркало сложной формы, которое преобразует сферическую волну источника в волну, полностью идентичную волне излучения, рассеянного объектом. Таким образом, оказывается, что двумерная голограмма представляет собою лишь частный случай более общего явления. Существенно более полный комплекс отображающих свойств заключен в объемной картине интерференции – стоячей волне. Трехмерная

модель такой волны – голограмма Денисюка (рис. 36, а) – однозначно воспроизводит амплитуду, фазу и спектральный состав записанного излучения. Мнимое изображение при этом отсутствует. В дальнейшем было показано, что отображающими свойствами обладают не только стоячие, но и бегущие волны интенсивности, которые образуются в том случае, когда значения частоты объектной и опорной волн различны.

В верхней части рисунка показано, что от источника света S световой поток, прошедший через объект O , образует световые поля (изображенные волнистыми линиями), в которых происходит интерференция волн.

В этих полях установлены три фотопластинки, на которых получают голограммы: Γ_1 – голограмма Габора, Γ_2 – голограмма Лейта и Упатниекса, Γ_3 – голограмма Денисюка.

Ниже показаны схемы восстановления изображения. По схеме Денисюка (б) видно, что единственное изображение расположено за голограммой и имеет совершенно натуральный вид. При восстановлении по Габору (в) на одной оси расположены и действительное, и мнимое изображения. При рассматривании они накладываются одно на другое, что значительно снижает эффект их распознавания. В установке Лейта и Упатниекса (г) наблюдатель в нижней правой части рисунка видит только одно изображение объекта. Для наблюдения второго нужно изменить точку наблюдения. Восстановленные объекты разнесены, что устраняет искажения при наблюдении.

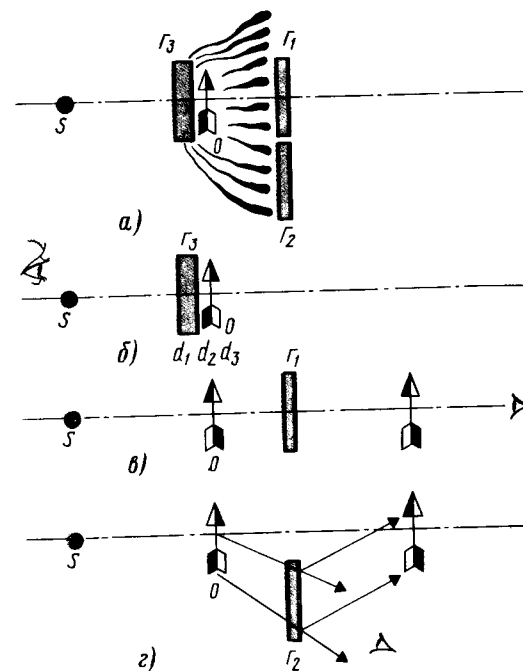


Рис. 36. Схемы установок Габора, Денисюка, Лейта и Упатниекса

Юрий Денисюк защитил диссертацию, так и не имея научного руководителя. Но, несмотря на значительное число скептиков, аспирант успешно защитил диссертацию, и она была утверждена Высшей аттестационной комиссией.

Но радость была кратковременной. После этого случилось самое худшее, что может случиться с молодым ученым, для которого сама защита диссертации – лишь промежуточный этап в научной работе.

Юрию Николаевичу закрыли научное направление работы. Это был результат того, что многие не верили в его идею.

Лишь благодаря поддержке академика В. П. Линника Юрию Денисюку удалось опубликовать статьи, которые сыграли важную роль в жизни молодого ученого. Они позволили впоследствии доказать, что приоритет в открытии нового явления принадлежит нашему государству. Со временем решение об окончательном свертывании работы Денисюка было отменено. Ему оставили часть оборудования, и он мог продолжать свою научную работу. Пожалуй, решающую роль здесь сыграло появление статьи Лейта и Упатниекса, которые, используя свой внеосевой метод записи голограмм и новый источник излучения – разработанный к тому времени газовый лазер – получили высококачественное изображение ряда предметов. Фотографии этих изображений, хорошо показывающие эффект паралакса, взволновали научный мир.

Денисюк торжествовал – вновь подтвердился метод записи волновых фронтов. Но ведь это сделали другие! Будь в его руках в то время хороший газовый лазер, он бы мог получить более высокого качества голограммы. Упущенные возможности вызвали огорчение и желание вновь включиться в работу.

И в это время произошло то, что перевернуло всю дальнейшую жизнь Юрия Николаевича. В президиуме Академии наук СССР обсуждался вопрос о состоянии научной работы в области голографии в Советском Союзе. Один из академиков сообщил о результатах работы Денисюка, опубликованных в докладах Академии наук СССР в 1962 г. и в журнале "Оптика и спектроскопия" в 1963 г., и отметил, что работы советского ученого являются более общим случаем голографии. Из нее результаты Д. Габора и американских ученых следуют как частности. Юрия Николаевича Денисюка выбрали членом-корреспондентом Академии Наук СССР, несмотря на то, что он был в это время лишь кандидатом наук. Такое бывает не часто. Это было признание Ю. Н. Денисюка как ученого.

Юрий Николаевич продолжал свою работу. Его толстослойные фотопластинки, полученные вместе с И. Р. Протас, пригодные для записи интерференционной картины как по поверхности, так и в глубь фотоземлемой пленки, в сочетании с лазерными источниками света дали высококачественные голограммы и такие натуральные объемные восстановленные изображения, каких еще никто никогда не получал. Хорошо восстанавливаемые в свете проектора или в солнечном свете изображения позволяли, как через окно, наблюдать натуральные объекты. Особенно эффектно выглядели предметы с большой

градацией яркости – золотые изделия скифских мастеров, драгоценности и т. п. Прикладное искусство получило новый вид демонстрации. Сами изделия лежат в хранилищах, а их изображения – объемные, цветные – доступны широкому кругу зрителей. Натуральность изображений настолько велика, что служители музеев наблюдали попытки украсть эти "драгоценности".

Это было началом бурного развития технических приложений голографии. Возникли радиоголография, акустоголография, фурье-голография, поляризационная голография, голографическая интерферометрия и динамическая голография. Вследствие значительного расширения тематики начался процесс профессиональной дифференциации ученых-голографов.

1.10. ВОЗМОЖНОСТИ ФИЗИЧЕСКОЙ ГОЛОГРАФИИ

В научно-фантастическом романе Олдиеса "Час длиною в восемьдесят минут" представлена картина будущего. Здесь есть рассказ, как девочку похищает голографический двойник ее матери. Герои романа способны создавать в воображении "голографические видения" – невероятные, фантастические объемные картины.

Фантастика это или научное предвидение? Не исключено, что может стать возможным обращение к объемному, словно живому изображению человека, который удален от вас на тысячи километров. Ведь есть же видеотелефон! А в этом случае перед вами в переговорной кабине возникает объемное "видение" человека, с которым вы разговариваете. Вы сможете посмотреть на него со всех сторон. Это изображение будет не на экране, оно будет находится посередине комнаты, будет "стоять" на полу или "сидеть" в кресле. Чем это не воплощение мечты фантастов "о передаче материи на расстояние"? Только в этом случае "дематериализованный" объект с помощью электромагнитных волн переносится в нужную точку пространства и восстанавливается там в виде, трудно отличимом от натурального.

Но это в будущем, а пока посмотрим, где могут быть использованы возможности физической голографии. Существуют два самостоятельных направления физической голографии. Одно из них – это применение ее в искусстве и в быту, второе – в науке и технике. И в каждом отдельном случае – свои требования к источнику излучения, устройству для регистрации голограмм, оптической схеме установки для записи и восстановления голограмм.

Как получить изображения произведений прикладного искусства, скульптуры, живописи, рекламных табло, украшений? Над этим сразу же задумались инженеры, поскольку они понимали, что с развитием технологии массового производства голограмм их стоимость будет неуклонно снижаться. Было очевидно, что наступит время, когда художественные отражательные голограммы, которые можно рассматри-

вать в обычном дневном свете, вытеснят репродукции и декоративные тарелки, украшающие сегодня наши квартиры. С повышением качества лазеров и развитием новых технических методов значительно возрастут размеры голограмм и увеличится глубина запечатляемой сцены. Появятся целые объемные панорамы. Это представляет особый интерес для театра, так как позволит создавать и довольно быстро реалистические, легко сменяемые сцены. Зрители могут размещаться посредине сцены, они будут окружены реальными изображениями.

Это возможно уже сегодня благодаря работам Ю. Н. Денисюка. Использование толстослойных фотозмультис позволило ему десять лет назад создать голограммы скульптурной группы "Амур и Психея" по оригиналу Э. Фальконе (XIX в.), бронзовой чернильницы русской работы (XIX в.) и скифской золотой поясной бляхи из коллекции Петра Первого ("Борьба зверей"). Голограммы были записаны на установке Денисюка, а для восстановления изображения использовали солнечное излучение или луч проектора. Изображение было настолько реальным, что терялось ощущение нематериальности. Изображения хорошо передавали игру бликов на фарфоре и на металле. Поворот голограммы приводил к перемещению бликов на изображении точно так же, как они перемещались на реальном объекте.

Затем были созданы голограммы размерами 60 × 40 см, на которых были записаны изображения из Золотого фонда Эрмитажа. Особенно поражала серебряная ваза с богатой внешней отделкой. На дне этой вазы выгравирована надпись. Поскольку при нормальном рассмотрении голограммы передняя стенка вазы на треть закрывала дно вазы, то надписи, как и в реальном варианте, не было видно. Но если повернуть голограмму или, как в реальном варианте, приподнять голову, то за передней стенкой вазы открывалось дно и становилось возможным прочитать, что было написано на нем.

Больших успехов в создании объемных голограмм больших размеров добился Г. А. Соболев. Им изготовлены голограммы крупнейших алмазов, золотой братины с жемчугами, созданной русскими умельцами 300 лет назад, и других экспонатов Государственной Оружейной палаты Московского Кремля.

Ну и, конечно, до сих пор не снят вопрос об объемном кино и объемном телевидении. Но об этом в отдельной главе. А теперь перечислим основные направления применения голографии в технике:

<i>Интерферометрия</i>	Измерение вибрации сложных поверхностей;
	измерение деформации необработанных сложных поверхностей;
	измерение перемещения по контурным картам;
	обнаружение микротрещин;
	контроль нагружения;
	оценка внутренних дефектов;
	исследование фазовых объектов
	Нанесение сложных микроизображений;
<i>Технология</i>	микрообработка;

<i>Интроскопия</i>	исследование неоднородностей материалов
<i>Микроскопия</i>	Наблюдение внутренних поверхностей неправильной формы;
	кодирование изображения;
	наблюдения в турбулентной атмосфере
	Трехмерное наблюдение живых микрообъектов;
<i>Оптика</i>	электронная микроскопия;
	рентгеновская микроскопия
	Компенсация аберрации линз;
	безлинзовая оптика;
<i>Распознавание образов</i>	комбинированные линзо-голографические безаберрационные системы
	Чтение печатных текстов;
	обработка фотоснимков;
	распознавание трехмерных объектов;
<i>Трехмерные изображения</i>	ассоциативный поиск
	Изобразительная фотография;
	звуковидение;
	радиовидение;
	моделирование антенн;
	голографическое кино;
	голографическое телевидение;
	контурная фотография

Отметим некоторые другие возможности физической голографии. Одна из них связана с изобретением рентгеновского лазера. Его когерентное рентгеновское излучение имеет меньшую длину волны, чем свет. Следовательно, с помощью такого лазера можно получить голограммы микроскопических объектов, возможно даже молекул. Если теперь осветить голограмму видимым лазерным излучением, то можно наблюдать сильно увеличенное объемное изображение микрообъекта. Такое устройство может служить отличным инструментом для ученых, исследующих микроструктуру вещества.

Еще одно направление связано с динамической голографией. Под этим понимают случай, когда трехмерную картину стоячих волн записывают в среде непосредственно в процессе воздействия излучения. Это, по сути, сочетание голографии в трехмерных средах и нелинейной оптики. Самой характерной областью исследований динамической голографии является преобразование волновых фронтов, выполняемое непосредственно в момент их существования. Объемные голограммы записывают на материалах, которые не образуют скрытого изображения, нуждающегося в проявлении, а реагируют на свет непосредственно в процессе экспозиции.

В последние годы появилась новая, интересная область динамической голографии, которой уделяют пристальное внимание за рубежом. Это случай, когда голограмму записывают в резонансной среде.

В такой среде энергия перехода между возбужденными и основными уровнями соответствует длине волны экспонирующего голограмму излучения.

Одной из заметных вех в области динамической голографии является обнаружение эффекта направленного переноса энергии между волнами. Он был обнаружен в кристалле ниобата лития. Этот эффект проявил себя в том, что при записи в этом кристалле картина изменения показателя преломления сдвигалась на четверть периода относительно интерференционной картины, вызывающей это изменение. Интерес к этому явлению возрос особенно после того, как было предложено использовать его для исправления волновых фронтов излучения лазеров. Для этого предлагалось смещать в динамической голограмме два волновых фронта: мощный фронт неправильной формы и специально сформированную правильную, но относительно слабую волну. Теория динамической голограммы, разработанная позднее, показала, что при наличии четвертьволнового сдвига энергия искаженной волны может быть полностью преобразована в энергию волны правильной формы.

И еще одним из достижений последнего времени стала компьютерная томография. Этот метод получения плоских сечений, разрезов, скрытых от глаз внутренних органов человека, получаемых при компьютерном синтезировании их рентгеновских, акустических и тому подобных изображений. Очевидно, что сочетание этого метода с голографией, т. е. синтез объемных изображений таких органов, последовательное освобождение их (путем голографической обработки) от закрывающих их тканей, должно предоставить еще большие возможности для исследования больных органов, в том числе и человеческого мозга.

2

ЦИФРОВАЯ ГОЛОГРАФИЯ

2.1. ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

Цифровая обработка сигналов в широком смысле этого понятия означает выполнение различных операций над одномерными и многомерными сигналами. К одномерным относят телефонные и радиосигналы, к многомерным – телевизионные сигналы, фотографии исследовательского характера, медицинские рентгенограммы, электронно-микроскопические фотографии молекул, радио- и звуколокационные карты, данные томографии и др. Цели, преследуемые при обработке таких сигналов, различны. В основном – это улучшение параметров сигнала, эффективное кодирование, распознавание необходимой информации и преобразование для машинной графики. Во многих случаях целью обработки двумерных сигналов является улучшение качества изображения. Вспомним, какими блек-

лыми были первые снимки обратной стороны Луны. А несколько позднее, когда стали использовать методы цифровой обработки, качество изображений существенно возросло. Затем этими методами стали обрабатывать старые фотографии, и на страницах газет появились отличные снимки. Публикации таких изображений до и после их обработки позволили широкому кругу людей убедиться в возможностях цифрового метода улучшения качества изображения. В методику обработки были внесены также приемы устранения внесенных ранее искажений, которые позволили говорить о новом направлении, получившем название *реставрации изображений*.

Существенный эффект цифровая обработка обеспечивает тогда, когда для передачи или запоминания сигнала используют канал с чрезмерной пропускной способностью или память слишком большой емкости. В этом случае желательно использовать более эффективное кодирование и тем самым снизить требования к каналу и памяти. В качестве примера можно привести видеотелефон. При обычных методах передачи пропускная способность канала связи, необходимого для видеотелефона, должна быть в несколько сотен раз больше, чем у телефонного канала. Без эффективного кодирования видеотелефон экономически неоправдан.

Другим примером может служить проблема хранения рентгенограмм в больницах. Количество рентгенограмм огромно, но их хранение проблем не представляет. Проблема поиска необходимой рентгенограммы оказывается почти неразрешимой. Выход из этого положения возможен лишь с помощью эффективного кодирования.

Понятие *распознавание образов* охватывает широкий круг методов – от простого подсчета среднего балла до автоматического опознавания типа самолета по фотографии. Простейшие эксперименты проводят, используя в качестве исследуемого объекта цифры или буквы. Так делалось при создании системы сортировки писем на почтамте. Цифры, которые пишут абоненты на конвертах, строго формализованы. Это облегчает работу распознающих машин. Распознать же рукописные знаки все еще очень трудная задача.

Весьма перспективным направлением является цифровое телевидение. До сих пор использовали столь естественный и удобный аналоговый метод передачи изображения. Увиденное объективом передающей трубки изображение превращается в электрический (или видео) сигнал, который соответствует распределению света на пути электронного луча, управляемого телевизионной разверткой. Это соответствие сохраняется в каждой точке тракта от передающей камеры до приемника: видеосигнал остается электрическим аналогом того изображения.

При передаче такого сигнала из студии он совершает путь по сложной электрической цепи, который становится еще длиннее, если передача идет с какого-нибудь удаленного от студии места событий. Сигнал с репортажной установки поступает в аппаратную. Там его преобразуют – усиливают, корректируют, вводят поясняющие титры и

т. п. Сигнал многократно ретранслируют, записывают на ленту, затем он идет в эфир и поступает к зрителю. Каждое звено этой цепи приводит к потерям качества изображения из-за всегда существующих помех. Они накапливаются, и изображение необратимо ухудшается.

Другим недостатком аналогового телевидения является то, что в этой форме вряд ли возможно сохранение на длительное время уникальных телепрограмм, шедевров киноискусства, документов фотоархивов. Разнообразные меры предосторожности лишь замедляют, но не предотвращают разрушения. Неизбежно и необратимое накопление помех при многократном копировании. Переход от аналоговых сигналов к цифровым решает многие трудности.

Передаваемое изображение состоит из 25 кадров в секунду. Число строк каждого кадра близко к 600. Формат кадра 4:3, поэтому число элементов, составляющих строку, равно $4/3 \cdot 600 = 800$. А всего только за одну секунду необходимо передать $800 \cdot 600 \cdot 25 = 12\,000\,000$ отсчетов. Каждый из них должен быть проквантован: яркость каждого элемента в цифровом телевидении выбирают из целочисленных значений дискретной шкалы, как бы округляют. Эксперименты показали, что для сохранения качества изображения яркость необходимо квантовать на 256 уровней.

Теперь цифровой сигнал совсем не напоминает аналоговый. Последовательность импульсов кажется случайной, и если ее подать на кинескоп, то получим хаотически меняющиеся светлые и темные точки, напоминающие шум. Поэтому вначале сигнал пропускают через цифро-аналоговый преобразователь – ЦАП, а уже в аналоговом виде – на кинескоп для передачи. Таким образом, для передачи телевизионного изображения необходимо передавать более 100 Мбит информации в секунду.

Развитие цифровых методов преобразования и передачи изображения в сочетании с кабельной сетью даст возможность доступа зрителей к цифровым видеоархивам. Телевизионный приемник, дополненный цифровой памятью и снабженный средствами передачи информации, возьмет на себя функции домашнего дисплея.

2.2. КОМПЬЮТЕРЫ ВОКРУГ НАС

В 1985 г. в Зеленограде проходила научно-техническая конференция по разработке и применению микропроцессорной техники. На нее съехались представители из разных городов страны, которые сделали доклады и сообщения о своих научных достижениях, выполненных с помощью ЭВМ и микропроцессорной техники. Конференция научная, но в ее рабочих документах значились и посещения студенческого общежития и одной из школ города.

В общежитии было предложено пройти в зал самостоятельной подготовки студентов к очередным занятиям. Все ожидали увидеть что-то похожее на читальный зал. Но это были рабочие места инженеров или научных сотрудников, такие же, как в Вычислительном центре

АН СССР. На каждом рабочем месте стоял персональный компьютер ДВК-4, рассчитанный на большой объем вычислений, связанных с решением задач по курсам высшей математики, физике, сопромату, электронике и электротехнике. Можно тренироваться в совершенствовании знаний иностранных языков, можно было получать справки по общественным дисциплинам.

Ряд машин был объединен в комплексе ДВК-2, который позволяет дежурному преподавателю провести групповое занятие одновременно с несколькими студентами. В программное обучение компьютеров включены как стандартные программы, так и программы, разработанные сотрудниками института и даже студентами. Есть и развлекательные программы ("Теннис", "Космическая война" и др.)

И в школе, которую мы посетили, также был класс, оборудованный несколькими персональными ЭВМ ДВК-1 с программным обеспечением по дисциплинам 9-х и 10-х классов. Школьники не занимались освоением вычислительной техники, они решали конкретные задачи, работая в диалоговом режиме.

Мы видим детей из подмосковного города Павловского Посада, которые у себя в детском саду "Золотой петушок" рисуют на экране компьютера БК-0010. Для этого используют программу, обеспечивающую при нажатии на определенную клавишу появление на экране готового фрагмента рисунка – домика, дерева, зеленой лужайки, солнца, тучи и т. п. Дети формируют желаемую картину, выводя на экран по своему выбору эти изобразительные фрагменты и перемещая их в нужное место.

Детская забава! Но именно через нее, через игру, через деловую игру идет наиболее плодотворное приобщение к вычислительной технике всех от мала до велика.

Уже с прошлого года в 9-х и 10-х классах наших школ началось изучение основ информатики. В педагогические институты и школы поступило несколько тысяч советских персональных компьютеров ДВК-1, БК-0010, "Агат" и японских "Ямаха". На их основе во всех регионах страны организованы сотни специализированных классов, где школьники учатся общению с вычислительной машиной. Разработаны и готовятся к производству две малые вычислительные машины, специально предназначенные для школьных кабинетов информатики.

Где же можно увидеть сейчас персональные компьютеры? В конторах и на предприятиях – это так называемые текстовые процессоры, автоматизированные рабочие места, станки с программным управлением. В торговле – это кассовые аппараты, системы управления товарными запасами, на транспаранте и в сфере обслуживания – это системы продажи железнодорожных и авиабилетов, билетов в театры и на стадионы, системы резервирования мест в гостиницах. В банках – автоматы для выдачи денег. В быту – системы обеспечения комфорта: программная запись и перезапись телевизионных программ, связь с абонентами по телефону, оборудование "дублера рабочего места" и т. п.

Требование всеобщей компьютерной грамотности обусловлено самой жизнью, ибо ее наиболее главные сферы – производство, наука, образование, досуг – без этой грамотности сейчас существовать не могут. Именно здесь компьютеры оказывают заметное влияние на характер деятельности людей, а также на форму и содержание работы.

Для деловой жизни характерно, во-первых, применение персонального компьютера как средства текстовой обработки (подготовка и редактирование рабочих документов), во-вторых, как инструмента для финансовых расчетов, в-третьих, для создания небольших хранилищ информации, а также как средства связи. В последнем случае компьютер, объединенный с телефоном, играет роль автоматизированного телефонного справочника, оператора местной АТС, автоответчика, средства доступа к библиотечным каталогам и др. Такой компьютер должен быть портативным, иметь отличный внешний вид и быть пригодным к пользованию в гостинице, поезде, самолете.

На столе ученого компьютер – это и суперкалькулятор, и пишущая машинка, и кульман, и средство управления экспериментальной установкой, и информационно-справочная система. Для таких машин ученый использует как стандартные программы, так и разработанные им самим. Значительный интерес для него представляют программы с элементами искусственного интеллекта, особенно с возможностью экспериментных оценок.

Обеспечивается распространение новых моделей компьютеров, вовлечение студентов в общение с ними, а разрабатываемые студентами программы при их хорошей отладке и оригинальности могут войти в фонд программного обеспечения для того или иного класса компьютеров и тем самым способствуют известности автора программы. Студенты используют персональные компьютеры чаще всего как вспомогательные средства обучения и самостоятельной работы, применяя стандартные прикладные программы – текстовые процессоры, системы экономических расчетов на основе электронных таблиц, банки информации.

Персональный компьютер – хороший секретарь, большой микрокалькулятор, записная книжка, педагог, картотека, шахматный партнер, редактор. Но главное в том, что человек, работающий с компьютером, – это совсем другой человек. Другой по стилю, по характеру мышления, по самому подходу к тем задачам, которые он решает, и в итоге по умению обозначать проблему и найти правильное решение. Это касается работников всех специальностей: врачей, экономистов, строителей, транспортников, педагогов и др.

Компьютеры окружают нас. Заказывая билет на самолет или поезд, мы получаем ответ от компьютера – это система "Сирена". Оплачивая счет за телефонный разговор, знайте – этот документ подготовлен компьютером. Во многих организациях денежные операции выполняет компьютер – это он начисляет вам заработную плату (местная система "Финансы"). Даже "Предписание" к месту работы по окончании инсти-

тута молодой инженер может получить отпечатанным компьютером (система "Кадры").

2.3. ГОЛОГРАММА ФУРЬЕ

Рассмотренный нами голографический эксперимент и по настоящее время остается тонким физическим опытом, требующим уникального оборудования и большого мастерства экспериментаторов, – слишком много факторов влияют на ход процесса получения голограммы и в конечном счете на ее качество. Поэтому почти сразу же за первыми работами по оптической голографии появились работы, в которых были сделаны попытки применить вычислительную технику для моделирования этого явления. Вначале это были попытки повторения на цифровых моделях оптических установок, а затем поставлены задачи визуализации информации с помощью синтезированных на ЭВМ голограмм. В настоящее время цифровая голография – это сложившееся научное направление исследований, оно занимается вопросами анализа и синтеза волновых полей, а также моделированием их взаимодействия средствами вычислительной техники. Первые работы по цифровой голографии появились в середине 60-х годов, к ним можно отнести работы А. Ломана и Т. Ли в США, а также

Б. Ф. Федорова, Р. И. Эльмана, Л. П. Ярославского, Г. С. Мерзлякова в СССР. В последние годы работы по цифровой голографии стали носить прикладной характер.

Мы уверены, что наши молодые читатели знакомы с предметом "Информатика и вычислительная техника", изучаемым в школе. Поэтому, пользуясь известными понятиями, расскажем, какие этапы включает в себя процедура получения цифровой голограммы и восстановления с нее изображения. Вот эти этапы:

- введение голографируемого изображения в ЭВМ;

- вычисление амплитудного и фазового спектров изображения с помощью интегральных алгоритмов преобразований (Фурье, Френеля);

- выполнение подготовительных операций, связанных с выбранным алгоритмом выведения цифровой информации из ЭВМ;

- выдача голограммы на печать или фотопленку в увеличенном масштабе;

- уменьшение полученной голограммы до заданных размеров фотографическим способом;

- машинное или оптическое восстановление изображения.

Для простоты рассмотрим процесс при плоском объекте с сохранением основных принципов голографии. Это наиболее распространенный сейчас способ регистрации информации о фазе на плоском прозрачном с помощью опорного пучка света. Рассмотрим показанную на рис. 37 схему установки для получения голограммы Фурье с точечным опорным источником. Установка рассчитана на получение голограмм плоских предметов, например изображение объекта на фотопленке. Установка содержит четыре линзы L_0 , L_1 , L_2 и L_3 , где основные плос-

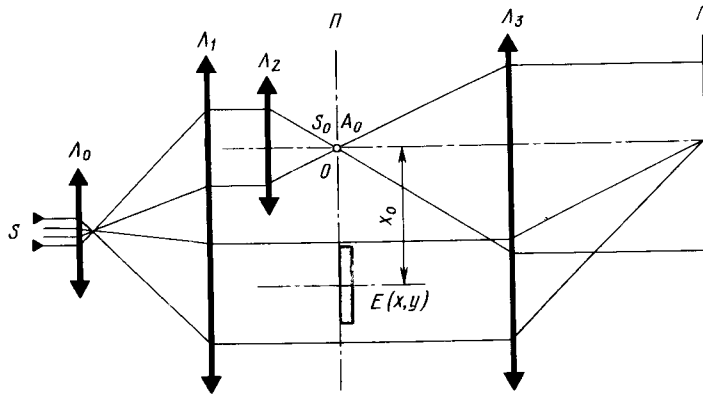


Рис. 37. Схема установки для получения голограммы Фурье

кости предмета П и голограммы Г и монохроматический источник излучения S. Плоскости П и Г совпадают с фокальными плоскостями линзы L_3 . На плоскость П падает плоская волна когерентного света от источника S. От того же источника в плоскости П с помощью линз L_1 и L_2 формируется точечный источник S_0 , создающий опорную волну. Опорный и объектный пучки (причем объектный проходит через транспарант, установленный в плоскости П), пройдя линзу L_3 , создают в плоскости Г интерференционную картину, которую регистрирует помещенная в этой плоскости фотопленка. Так реализован первый этап голографического процесса.

Выберем в плоскости П систему координат Oxy , а в плоскости Г – систему $O_1x_1y_1$. Расположим начало координат этих систем на оптической оси линзы L_3 . Точечный опорный источник разместим в начале координат системы Oxy . Обозначим комплексное световое поле, прошедшее через транспарант, в виде двумерной функции $h(x, y)$. Комплексное световое поле в плоскости Г обозначим через $g(x, y)$. Линза L_3 выполняет над функцией $h(x, y)$ двумерное преобразование Фурье – это хорошо известно из курса физики средней школы. Получим следующее выражение для связи этих двух функций:

$$g(x_1, y_1) = \frac{1}{\lambda_1 f_1} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) \exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda_1 f_1} (xx_1 + yy_1) \right] dx dy,$$

где λ_1 – длина волны источника излучения; f_1 – фокусное расстояние линзы L_3 ($j = \sqrt{-1}$).

После некоторых преобразований можно записать

$$g(x_1, y_1) = \frac{1}{\lambda_1 f_1} H(p, q),$$

где $H(p, q)$ – двумерное преобразование Фурье функции $h(x, y)$, $p = x_1/(\lambda_1 f_1)$; $q = y_1/(\lambda_1 f_1)$ – это пространственные частоты. Будем

называть $H(p, q)$ – комплексным спектром функции $h(x, y)$, а его составляющие $A(p, q)$ и $\varphi(p, q)$ в соответствии с выражением $H(p, q) = A(p, q) \exp[j\varphi(p, q)]$ – амплитудным и фазовым спектрами.

На рис. 37 можно видеть, что эта функция $h(x, y)$ образуется двумя компонентами: полем опорного источника и объектным полем, прошедшим через транспарант. Поскольку мы рассматриваем опорный источник в виде идеальной точки, то поле предстанет как двумерная функция

$$E_0(x, y) = A_0 \delta(x, y)$$

с амплитудой A_0 волны. Эта функция носит название *двумерной δ -функции Дирака*.

Поле в плоскости Г образует голограмму. Ввиду того что фотопленка реагирует на интенсивность света $I(p, q)$, то прозрачность пленки, как это отмечалось в гл. 1, будет определять выражение

$$\tau(p, q) = k[I(p, q)]^{-\gamma/2},$$

где γ – коэффициент контрастности пленки. Коэффициент k зависит от ее чувствительности и времени экспозиции. В окончательном виде получим следующую удобную для анализа зависимость

$$\tau(p, q) = k_r [\alpha - \beta A_E^2(p, q) - A_E(p, q) \cos \varphi(p, q)],$$

где $k_r = (k \gamma A_0^{-\gamma-1})/(\lambda_1^{-\gamma} f_1^{-\gamma})$, $\alpha = A_0/\gamma$; $\beta = 1/A_0$; A_E – амплитуда централизованного объекта. Последнее соотношение называют *уравнением голограммы Фурье*, полученной по схеме рис. 37. Оно представляет связь амплитудного пропускания $\tau(p, q)$ голограммы с пространственно-частотными характеристиками голографируемого плоского предмета.

С точностью до разрешающей способности фотопленки и в пределах линейности ее характеристики на голограмме зафиксирована вся информация о предмете, содержащаяся в его амплитудном $A_E(p, q)$ и фазовом $\varphi_E(p, q)$ спектрах. Для сведения к минимуму нелинейных искажений при формировании голограммы необходимо правильно выбрать входящие в уравнение параметры k_r , α и β , а следовательно, и определяющие их амплитуду A_0 опорного пучка и коэффициент контрастности γ . Обычно принимают $A_0 > 10 A_E$ и $\gamma = 2$.

В правой части уравнения голограммы три слагаемых. Постоянная составляющая $k_r \alpha = \tau_0$ определяет среднюю прозрачность голограммы, которая получилась бы в случае перекрытия пучка от предмета, т. е. когда $A_E(p, q) = 0$. Вторая составляющая $k_r \beta A_E^2(p, q)$ характеризует дополнительную неравномерную засветку голограммы объектным пучком. Поскольку эта составляющая вычитается из τ_0 , она уменьшает прозрачность голограммы, особенно в тех местах, где велико значение амплитудного спектра предмета. Ввиду того что для большинства предметов наибольшую энергию несут низкочастотные составляющие спектра, потемнение голограммы Фурье из-за второй составляющей сосредоточено вблизи начала координат частотной плоскости. Вторая

составляющая содержит лишь часть информации о предмете, так как в ней отсутствует фазовый спектр. Полную информацию содержит третья составляющая, возникающая благодаря интерференции объектного пучка с опорным. Она знакопеременна ввиду наличия в ней косинусной функции. При положительном значении косинуса она уменьшает прозрачность голограммы, при отрицательном – увеличивает. Эта составляющая представляет собою косинусную волну, промодулированную по амплитуде и фазе. Косинусная волна на голограмме проявляется в виде периодических интерференционных полос и особенно хорошо видна при равномерных $A_E(p, q)$ и $\varphi_E(p, q)$, т. е. когда она не сильно искажена модуляцией.

Голограмма Фурье любого вещественного объекта имеет центральную симметрию. Это следует из того, что уравнение голограммы таких объектов инвариантно по отношению к перемене знака пространственных частот, ибо входящие в него члены $A_E(p, q)$ и $\varphi_E(p, q)$ не изменяют знака при изменении знаков p и q первый – вследствие центральной симметрии, а второй – вследствие четности. Для простейших объектов функцию пропускания голограммы Фурье $\tau(p, q)$ нетрудно получить аналитически. Моделирование голографического процесса на ЭВМ предполагает воспроизведение различных его сторон в виде вычислительного процесса на основе математических аналогий. При этом все физические объекты, участвующие в реальном процессе (предмет, световое поле, изображение на прозрачном, голограмма и пр.) заменяют цифровыми моделями путем представления в виде двумерных функций, их характеризующих в цифровой форме $[E(x, y); h(x, y), g(x, y), \tau(p, q)]$.

Как и всякие другие, цифровые модели воспроизводят процесс лишь приближенно, однако наиболее существенные свойства, подлежащие исследованию, представляются четко выделенными, в явном виде, что часто нельзя сделать в реальном процессе. Одно из основных приближений связано с переходом от непрерывных величин к дискретным, с которыми работает ЭВМ. Этот переход, уменьшая точность результатов, в то же время не вносит принципиальных изменений в процесс, так как с уменьшением шага дискретизации модель все более приближается к непрерывной. Степень такого приближения ограничена лишь возможностями ЭВМ. Кроме того, есть разумный предел плотности дискретизации, определяемый разрешающей способностью оптических элементов и фотоматериалов, участвующих в голографическом процессе. Этот предел для функций с ограниченным спектром определяется известной специалистам теоремой Котельникова, из которой следует, что если функция имеет спектр, ограниченный частотой f_0 , то она может быть представлена с большой точностью в точках x_m , отстоящих одна от другой на расстоянии $\Delta x = 1/2f_0$. Теорема Котельникова легко распространяется на двумерные функции. В этом случае отсчеты берут в узлах прямоугольной сетки с размерами ячеек

$$\Delta x = 1/2 p_0, \quad \Delta y = 1/2 q_0.$$

Итак, переходя к цифровому моделированию голографического процесса, заменим части плоскостей Π и Γ , ограниченные прямоугольными апертурами, сетками. В узлах этих сеток зададим отсчеты поля. Эти сетки в плоскости предметов обозначим σ_p , а в плоскости голограммы – σ_r . Для удобства последующих преобразований расположение сеток в плоскостях Π и Γ выберем таким, как показано на рис. 38. Правомомерность такого выбора будет видна из дальнейшего. Чтобы параметры сеток отвечали теореме Котельникова, необходимо выполнить следующие соотношения:

$$\Delta x = 1/2 p; \quad \Delta y = 1/2 q; \quad M = X/\Delta x = 2PX; \quad N = Y/\Delta y = 2QY.$$

При этом суммарное число узлов сетки σ_p равно MN . Перейдем в плоскости Π к новым координатам. Приняв размеры сетки $X = Y = 1$, получаем:

$$P = M/2; \quad Q = N/2; \quad \Delta x = 1/M; \quad \Delta y = 1/N.$$

Следовательно, координаты узлов сетки σ_p выразятся так:

$$x_m = m \Delta x = m/M, \quad m = 0, \dots, M;$$

$$y_n = n \Delta y = n/N, \quad n = 0, \dots, N.$$

Число узлов сетки σ_r выбирают так, чтобы было обеспечено взаимно однозначное соответствие между изображениями, заданными на σ_p , и его дискретным преобразованием Фурье, заданным на σ_r . Это число узлов также оказывается равным MN . Последнее определено тем, что в системе, состоящей из MN точек, полной является система тригонометрических функций с частотами

$$P = 0, \pm 1, \dots, \pm \frac{M}{2} - 1, \frac{M}{2};$$

$$Q = 0, \pm 1, \dots, \pm \frac{N}{2} - 1, \frac{N}{2}.$$

Соотношения между размерами сеток σ_p и σ_r получим из

$$2X = (\lambda_1 f_1 M)/X; \quad 2Y_1 = (\lambda_1 f_1 N)/Y.$$

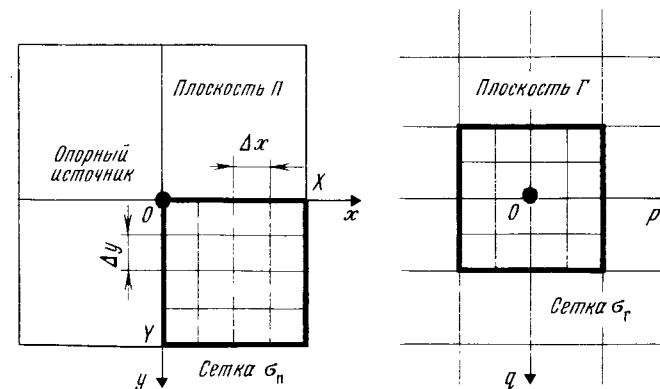


Рис. 38. Расположение сеток

Выбор сеток в плоскостях Π и Γ означает, что все непрерывные функции в этих плоскостях могут быть представлены своими дискретными значениями в узлах сетки. Эти значения теперь являются функциями номеров узлов, т. е. m и n в плоскости Π и в плоскости Γ — p и q . Для отличия от непрерывных величин аргументы дискретных величин будем обозначать индексами, например E_{mn} , вместо $E(x_m, y_m)$, A_{pq} вместо $A(p, q)$. Установим соответствие между основными физическими величинами, рассмотренными ранее, и их цифровыми моделями. Поле в плоскости Π представим так:

$$h_{m,n} = A_0 \delta_{mn} + E_{mn}$$

дискретное преобразование Фурье от h_{mn} определит соотношение:

$$H_{pq} = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} h_{mn} \exp[-j 2 \pi (p \frac{m}{M} + q \frac{n}{N})].$$

Примем

$$H_{pq} = A_0 + A_{pq} \exp(j \psi_{pq}).$$

Цифровая модель голограммы Фурье будет иметь вид

$$\tau_{pq} = K_r (\alpha - \beta A_{pq}^2 - A_{pq} \cos \psi_{pq}),$$

где

$$\psi_{pq} = 2 \pi (p \frac{m_0}{M} + q \frac{n_0}{N}) - \varphi_{pq}.$$

Величину H_{pq} можно интерпретировать как коэффициент двойного ряда Фурье от дискретной функции h_{mn} , заданной на двумерном интервале MN . При этом в уравнении голограммы последнее слагаемое является не чем иным, как косинусным коэффициентом Фурье a_{pq} изображения предмета. С учетом изложенного уравнение цифровой голограммы Фурье, удобное для расчетов на ЭВМ, принимает вид:

$$\tau_{pq} = k_r (\alpha - \beta A_{pq}^2 - a_{pq}).$$

Здесь в общем случае имеем

$$a_{pq} = 2 \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} E_{mn} \cos [2 \pi (p \frac{m}{M} + q \frac{n}{N}) - \Phi_{mn}],$$

$$b_{pq} = 2 \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} E_{mn} \sin [2 \pi (p \frac{m}{M} + q \frac{n}{N}) - \Phi_{mn}],$$

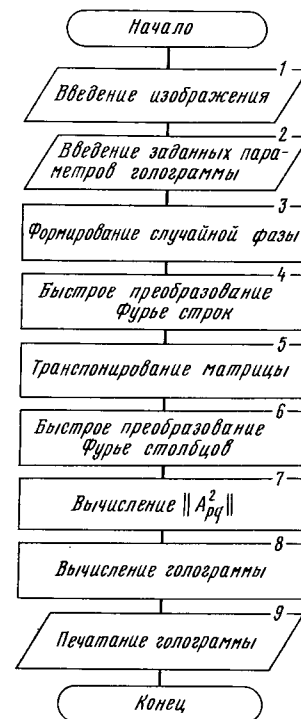
$$A_{pq}^2 = \frac{1}{4} (a_{pq}^2 + b_{pq}^2).$$

В двух первых формулах последние члены в прямоугольных скобках используются при наличии рассеивателя со случайной фазой. Если рассеиватель не используют, то они равны нулю и формула упрощается.

Для выполнения расчетов исходной информацией является изображение, которое разбивают на отдельные участки в соответствии с выбранной сеткой (т. е. из изображения делают выборку значений E_{mn} в узлах сетки), а также задаваемые параметры M, N, K_r, α, β . В результате расчетов должны быть получены величины τ_{pq} прозрачности голограммы в узлах сетки σ_r .

Основой вычисления является выполнение дискретного преобразования Фурье, причем двумерное преобразование выполняют в два этапа: сначала по строкам, а затем по столбцам. Последовательность вычислений показана на рис. 39. Для выполнения одномерных преобразований используется алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ). Для удобства вычислений матрицу C_{rn} , полученную после преобразования строк, транспонируют и повторное преобразование также выполняют по строкам. В результате двойного БПФ получают коэффициенты a_{pq} и b_{pq} , по которым и определяют значения A_{pq} . Результаты вычислений вместе с заданными параметрами используют для расчета прозрачности голограммы по ее формуле. Эти значения и выдает машина.

Рис. 39. Последовательность вычислений голограммы Фурье



2.4. СИНТЕЗИРОВАНИЕ ГОЛОГРАММ

Таким образом, ранее было показано, что для получения синтезированных голограмм необходимо вычислять комплексный спектр изображения. Для этого нужно произвести $M^2 \times 20$ операций сложения, которые выполняет ЭВМ. Это требует значительного машинного времени. Так, например, для машины БЭСМ-6 (10^6 опер./с) при матрице размером $M \times M = 1024 \times 1024$ потребуется $20 \cdot 1024^2 \cdot 10^{-6} \text{ с} \approx 20000 \text{ с}$, т. е. около шести часов работы, без учета времени на вспомогательные операции. А это совершенно неприемлемо и поэтому, конечно, тормозило использование ЭВМ для синтеза голограмм и гармонического анализа больших массивов информации. Но когда в 1965 г. был предложен алгоритм быстрого преобразования Фурье, позволяющий (для нашего примера) в 100 раз сократить время вычислений, то стало возможным проводить синтезирование голограмм. Этот алгоритм требует всего $M \log M$ операций, что соответствует для нашего случая 4 мин.

Синтезирование голограмм имеет ряд особенностей. К ним следует отнести особенности введения исходных изображений в ЭВМ, размещения информации в запоминающих устройствах машины и выдачи

цифровой голограммы на печать. Они связаны с необходимостью перехода от двумерной информации к ее цифровому представлению и обратно, а также с необходимостью переработки больших объемов информации. Вводят изображения различными способами: с помощью перфокарт, дисплея, специальных считывающих устройств "Фото-мейши". Мы вначале вводили информацию с перфокарт и перфолент, причем лишь характерные точки изображения (угловые, концевые), а все изображения формировали по ним программно. А простейшие изображения задавали непосредственно с пульта ЭВМ.

Сформированное изображение представляется в машине в виде двумерного массива, например, $E[m, n]$, где первый индекс принимает номера строк, а второй — столбцов. Для удобства использования БПФ сетку размерами $M \times N$ выбирают двоично-рациональной, т. е. $M = 2^u$, $N = 2^v$ и чаще всего квадратной $N = M$. Простейшие изображения задают, как правило, двоичными, т. е. каждую точку представляют либо нулем, либо единицей.

Если форма изображения сложна, а число градаций велико, то ручное введение становится затруднительным. В этом случае только автоматизированное введение изображения может обеспечить решение задачи синтеза изображений. Исходное изображение представляет собой либо фотоснимок, либо рисунок. Оптико-электронное устройство считывает изображение, т. е. преобразует значения его характеристической функции (прозрачности, яркости) в электрический сигнал, а затем преобразует его в цифровой код. Последовательность таких кодов вводят в память машины для дальнейшей обработки. Современные считывающие устройства работают с сетками от 16×16 до 1024×1024 , число градаций они обеспечивают в пределах $16 \dots 256$. Отметим, что для цифрового представления каждой точки изображения ЭВМ использует от четырех до восьми двоичных разрядов.

Теперь мы можем подсчитать разрешающую способность изображения, которая сохраняется при введении в машину. Зададимся размером сетки $M = 1024$ и входной апертурой $X = 10$ мм. Разрешающая способность будет равна примерно 50 линиям на миллиметр (одна фотографическая линия соответствует двум элементам разложения). Те голограммы, которые были получены впервые, были выполнены на сетках размером 128×128 , что для входной апертуры в 10 мм имеют разрешающую способность в 6 линий/мм. И здесь интересно отметить особенность применения ЭВМ при обработке оптической информации. Если в оптических системах, как правило, разрешающая способность уменьшается от одного элемента к другому, то в ЭВМ остается неизменной, поскольку при БПФ информация не теряется.

Вторая особенность, вызванная большим объемом информации, составляет наибольшие неприятности при программировании задач по получению синтезированных голограмм. Дело в том, что размещение исходной и промежуточной информации и результатов синтеза требует определенных усилий программиста. Если сетка больших размеров, то

целесообразно обрабатывать информацию отдельными фрагментами. Но при этом исходная информация должна храниться во внешнем запоминающем устройстве. Отсюда она должна поступить в оперативное запоминающее устройство для ее обработки, а затем снова возвратиться для хранения во внешнее запоминающее устройство.

Опыт показал, что значительного сокращения объема памяти можно добиться, используя так называемую "упаковку" чисел в ячейки машины. Мы отмечали, что каждое число изображения занимает $4 \dots 8$ двоичных разрядов (бит). Учитывая, что длина машинного слова достигает 45 разрядов, можно в каждую ячейку поместить вместо одного числа несколько. Это напоминает заполнение чемодана — при продуманной раскладке в него можно уложить значительно больше вещей. Если, например, числа пятиразрядные, то в одной ячейке вместо одного можно разместить девять чисел! А это приведет к тому, что для хранения всей информации потребуется в 9 раз меньший объем памяти. Это уже существенный эффект. Но здесь есть и технологическая сложность: перед обработкой чисел их нужно "распаковать". Из-за этого увеличивается время вычислений. Однако незначительно.

Самым же слабым звеном всего процесса синтеза голограмм остается выдача результатов. Цель вычислений — получение готовой цифровой голограммы, которую можно было использовать в физическом голографическом процессе, причем желательно, чтобы голограмму строила сама машина без дополнительных операций. Таких машин, пригодных для широкого пользователя, пока нет, поэтому приходится идти на различные упрощения, связанные с частичной потерей информации. Одним из них является использование серийных печатающих устройств ЭВМ, например АЦПУ — алфавитно-цифровое печатающее устройство. В этом случае разрядная сетка печатающего устройства приравнивается к строке сетки δ_i и функция прозрачности голограммы τ_{pq} воспроизводится с помощью различных символов, что, конечно, делает воспроизведение приближенным.

Отпечатанную цифровую голограмму затем фотографируют с соответствующим уменьшением и используют для восстановления изображения оптическим путем. Так была синтезирована простейшая двоичная цифровая голограмма. Прозрачность ее имела только два значения: 0 или 1. Процесс получения двоичных голограмм рассчитан на применение печатающих устройств АЦПУ-128. Использование всех 128 разрядов алфавитно-цифрового устройства (АЦПУ) позволяет получить двоичную голограмму в виде матрицы размером 128×128 элементов. Для печатания уровня черного выбирают один из символов, хорошо заполняющий чернотой поле знака. Иногда используют несколько символов. Уровень белого обозначает пробелом.

Двоичную голограмму рассчитывают следующим образом. Прозрачность голограммы как функцию пространственных частот p и q обозначим через Θ_{pq} . Выберем некоторый порог A' . Если τ_{pq} больше или равно A' , то величине Θ_{pq} сопоставим единицу, в противном случае — нуль. Это возможно записать как

$$\Theta_{pq} = \begin{cases} 1, & \text{если } \tau_{pq} \geq A'; \\ 0, & \text{если } \tau_{pq} < A'. \end{cases}$$

В данном случае 1 соответствует уровню белого, а 0 – черного. Окончательно получим

$$\Theta_{pq} = \begin{cases} 1, & \text{если } \beta A_{pq}^2 + a_{pq} \leq A_{\text{пор}}, \\ 0, & \text{если } \beta A_{pq}^2 + a_{pq} > A_{\text{пор}}, \end{cases}$$

где $A_{\text{пор}} = \frac{A'}{K_r} - \alpha$.

В выборе параметров β и $A_{\text{пор}}$ имеется определенный произвол. В общем случае их увеличение приводит к снижению доли высоких пространственных частот в голограмме. Сама же двоичная голограмма в большой степени подчеркивает высокие пространственные частоты. В простейшем случае, когда $\beta = A_{\text{пор}} = 0$, уравнения принимают вид

$$\Theta_{pq} = \begin{cases} 1, & \text{если } a_{pq} \leq 0, \\ 0, & \text{если } a_{pq} > 0. \end{cases}$$

Учитывая, что

$$a_{pq} = A_{pq} \cos \psi_{pq}$$

а A_{pq} неотрицательно, получаем

$$\Theta_{pq} = \text{sign}(\cos \psi_{pq}).$$

Последнее соотношение говорит о том, что в рассмотренном случае значение двоичной голограммы Фурье в каждой точке плоскости определяется знаком косинуса фазы. Подбирая параметры β и $A_{\text{пор}}$, можно управлять дифракционной эффективностью двоичной голограммы. Эти преобразования вносят искажения в информацию, содержащуюся в функции τ_{pq} . У обычных голограмм Фурье значения τ_{pq} для низших и высоких пространственных частот могут отличаться более чем в 1000 раз. Значения же Θ_{pq} отличаются менее чем в 10 раз, поэтому если их приравнять к низкочастотным значениям τ_{pq} , то высокочастотные Θ_{pq} окажутся усиленными в большей степени, что при восстановлении должно проявиться в подчеркивании контуров полученных изображений, т. е. в своеобразном дифференцирующем эффекте. Подробно этот эффект будет рассмотрен ниже.

Искажения другого рода, вносимые печатающим устройством, состоят в том, что поле символа (ячейка сетки) не квадратное, а прямоугольное. Поэтому отпечатанная голограмма имеет различный масштаб вдоль строк и поперек. Это приводит к тому, что при восстановлении изображения его продольный и поперечный масштаб также получается различным. Учесть масштабную разницу можно на основании выражений для размеров сетки в плоскости голограммы. Сетка σ_u голограммы в плоскости печати имеет значительно большие размеры по сравнению с σ_r , т. е.

$$X_u = m_u X_1; \quad Y_u = n_u Y_1,$$

где m_u и n_u – увеличение так называемой "цифровой лупы" при печати голограммы с помощью ЭВМ.

Преобразовав выражение, получаем

$$X_u = m_u \frac{M}{2} \cdot \frac{\lambda_1 f_1}{X}; \quad Y_u = n_u \cdot \frac{N}{2} \cdot \frac{\lambda_1 f_1}{Y},$$

откуда

$$m_u = \frac{2X X_u}{\lambda_1 f_1 M}; \quad n_u = \frac{2Y Y_u}{\lambda_1 f_1 N}.$$

На АЦПУ-128 можно также печатать цифровые голограммы, имеющие несколько градаций прозрачности. Для этого подбирают символы так, чтобы площадь черного нарастала от пробела до полного заполнения ячейки сетки. Можно использовать и комбинацию символов. Таким способом удастся получить от четырех до восьми градаций. Для печатания многоградационной голограммы выбирают шаг h квантования τ_{pq} , символы ранжируют по степени черноты от 0 до n и решают уравнение

$$\Theta_{pq} = i, \text{ если } i h \leq \tau_{pq} < (i+1)h,$$

где $i = 0, 1, \dots, n$.

Такая голограмма содержит несколько меньше искажений, чем двоичная. Возможности более точного воспроизведения функции τ_{pq} появляются с созданием специализированных устройств для выдачи на ЭВМ цифровых голограмм.

На первом этапе для понимания существа процесса и особенностей структуры голограмм в качестве простейших изображений, использовали точки, линии, геометрические фигуры, растры. Голограммы, получаемые от таких объектов, наглядно демонстрируют влияние различных причин на характер интерференционной картины. Кроме того, возможность аналитического представления прозрачности таких голограмм позволяет использовать их в качестве испытательных изображений при отладке программ для цифрового моделирования голографического процесса.

Расчет цифровых голограмм был произведен на машине БЭСМ-4. Изображения в машину вводили с перфокарт. Изображения представлялись в машине на квадратной сетке размером 128×128 элементов в виде двумерного массива однозначных двоичных чисел. Изображения и цифровые голограммы выводили с помощью АЦПУ-128. Сетки σ_u и σ_r задавали так, как это было показано ранее, однако с целью сокращения потребного для вычислений машинного времени спектры, получаемые на сетке σ_r , обратному транспонированию не подвергали, т. е. выдавали на печать транспонированными. Это равносильно тому, что оси p и q сетки σ_r менялись местами.

Максимально упростим задачу. Возьмем в качестве объекта точечный источник и сначала получим математические соотношения, а затем сравним их с тем, что выдала ЭВМ на распечатке. Изображение то-

точного объекта описывает δ -функция Дирака. Расчет прозрачности такой голограммы может быть легко проведен аналитически. В дальнейшем без ущерба для понимания будем проводить расчеты при $\alpha = \beta = 0$, $k_r = 1$, т. е. сведя уравнение голограммы Фурье к виду

$$\tau_{pq} = a_{pq},$$

или — для непрерывного представления — к виду

$$\tau_{pq} = A_E(p, q) \cos \psi(p, q) = a(p, q).$$

Для точечного объекта, расположенного в точке $[x_0, y_0]$,

$$E(x, y) = A_E \delta(x - x_0, y - y_0).$$

Используя фильтрующее свойство δ -функции

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) \delta(x - x_0) dx = f(x_0),$$

получаем

$$a(p, q) = A_E \cos 2\pi(p x_0 + q y_0).$$

Таким образом, третий (информационный) член в уравнении голограммы в случае точечного объекта представляет собой косинусную волну в плоскости Г. Линию равных фаз задает уравнение

$$p x_0 + q y_0 = Z = \text{const},$$

которое для нулевой фазы запишется в виде

$$p x_0 + q y_0 = n,$$

где n — целое число. Это семейство прямых с тангенсом угла наклона, равным x_0/y_0 .

Определим период колебаний в направлении распространения фронта волны в плоскости Г. Направление распространения этой волны легко определить из соотношения

$$\tan \alpha = -(1/K) = y_0/x_0.$$

Решая совместно систему

$$\begin{cases} p x_0 + q y_0 = 1; \\ q = \frac{y_0}{x_0} p, \end{cases}$$

находим ее корни

$$p_1 = x_0/(x_0^2 + y_0^2); \quad q_1 = y_0/(x_0^2 + y_0^2),$$

откуда период колебаний волны в плоскости Г равен

$$\lambda = \sqrt{p_1^2 + q_1^2} = 1/\sqrt{x_0^2 + y_0^2}.$$

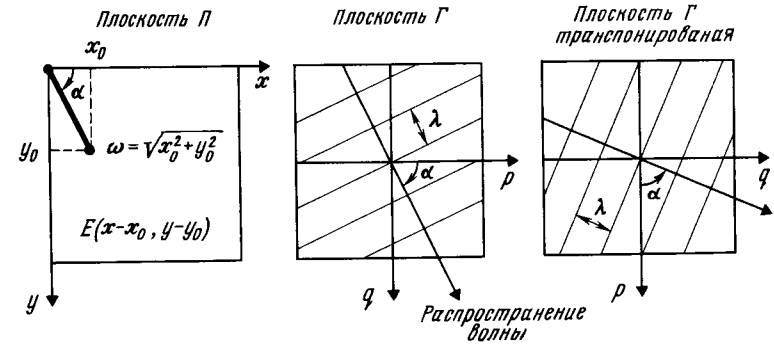


Рис. 40. Связь параметров положения точки

Анализ последних выражений показывает, что косинусная волна голограммы Фурье точки имеет частоту $1/\lambda$ тем большую, чем дальше расположена точка от начала координат. Это положение справедливо для величин x_0 и y_0 , меньших половины поля изображения, так как дискретный характер частот p и q при больших x_0 и y_0 меняет трактовку равенства, показывающего, чему равно $a(p, q)$. В последнем случае частота косинусоиды приближается к частоте дискретизации и изменение a_{pq} происходит с частотой биений. Направление распространения волны совпадает с направлением на точку при наложении плоскостей П и Г.

На рис. 40 изображена связь параметров положения точки на плоскости П и ожидаемая картина расположения интерференционных полос в плоскости Г. На правом фрагменте показана транспонированная голограмма точки (изменено положение осей p и q). В этом положении осей и печатались все приведенные ниже голограммы. На других фрагментах рисунка, кроме того, показаны направление распространения волны и величина ω , которая по смыслу является частотой интерференционных полос; чем она больше, тем меньше расстояние λ между отдельными полосами. А частота увеличивается с увеличением расстояния, на которое смещена точка от начала координат. Уже из формулы видно, что чем дальше точка от начала координат, тем больше должна быть частота интерференционных полос, тем меньше расстояние между полосами. На рис. 41 представлена рассчитанная на ЭВМ голограмма точки. Ее координаты:

$$x_0 = m/M = 1/128; \quad y_0 = n/N = 3/128.$$

Это дает возможность определить угол наклона интерференционных полос

$$\tan \lambda = y_0/x_0 = 3.$$

Определим длину волны

$$\lambda = 1/\sqrt{x_0^2 + y_0^2} = 128/\sqrt{10} \approx 37 \text{ мкм}.$$

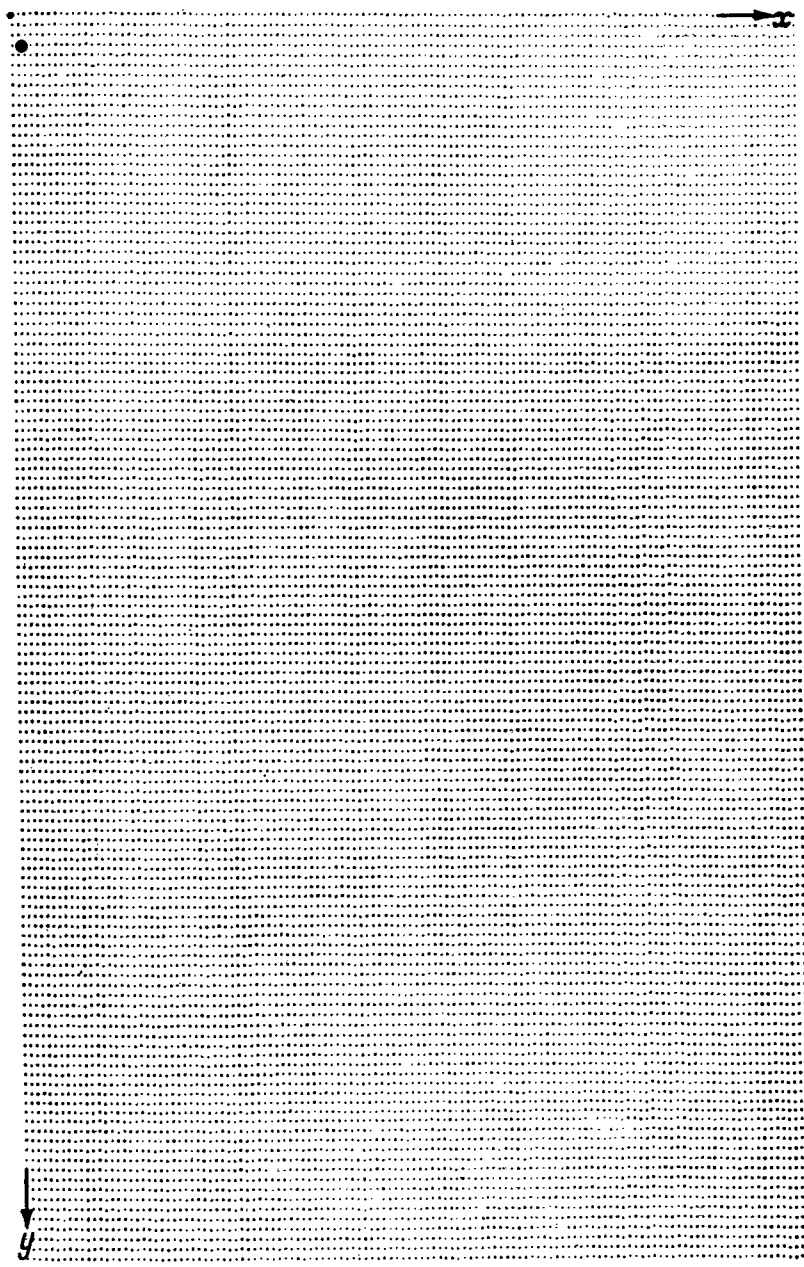


Рис. 41. Голограмма точки



Рис. 41. (Окончание)

Вычислим число точек на голограмме, укладываемых в полупериод волны вдоль горизонтальной оси q :

$$\frac{1}{2} \lambda_q = \frac{\lambda}{2 \cos \alpha} = \frac{1}{2 \sqrt{x_0^2 + y_0^2}} \frac{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}}{y_0} = \frac{128}{6} \approx 21.$$

На рис. 42 изображена точка в зрительном поле, смещенная относительно начала координат по оси x_0 на 15 позиций, а по оси y_0 — на 31 позицию сетки. Рядом показана расчетная голограмма. Видно, что направление полос осталось прежним, их частота увеличилась, а расстояние между ними — уменьшилось.

Другим простейшим объектом, который был взят для синтеза голограммы, был прямоугольник со сторонами a и b , параллельными осям координат, и с центром в точке $[x_0, y_0]$.

$$a(p, q) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, y) \cos[2\pi(px + qy)] dx dy = A_E \int_{x_0 - a/2}^{x_0 + (b/2)} dx \times \int_{y_0 - b/2}^{y_0 + (b/2)} \cos[2\pi(px + qy)] dy.$$

Путем некоторых преобразований, которые опускаем, получаем такое выражение

$$a(p, q) = A_E a b \cos 2\pi(px_0 + qy_0) \frac{\sin \pi q b}{\pi q b}.$$

Рассмотрение этого выражения показывает, что два его последних множителя представляют собой преобразование единичного централизованного прямоугольника со сторонами a и b , а косинусный член характеризует сдвиг его центра относительно начала координат. Таким образом, $a(p, q)$ — спектр прямоугольника с наложенной на него косинусной волной. Как и для голограммы точки, распространение волны определяют выражениями:

$$\text{tg } \alpha = y_0/x_0, \quad \lambda = \frac{1}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}}.$$

Можно отметить, что с удалением фигуры от начала координат частота колебаний волны растет пропорционально расстоянию

$$r = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}.$$

Два последних множителя в точках $P_m = m/a, q_n = n/b, (m, n = 0, 1, 2 \dots)$ имеют нулевые значения, из-за которых функция $a(p, q)$ в плоскости Γ имеет сетку нулевых значений с размерами ячейки, обратно пропорциональными размерам прямоугольника. Эта сетка хорошо видна на цифровых голограммах.

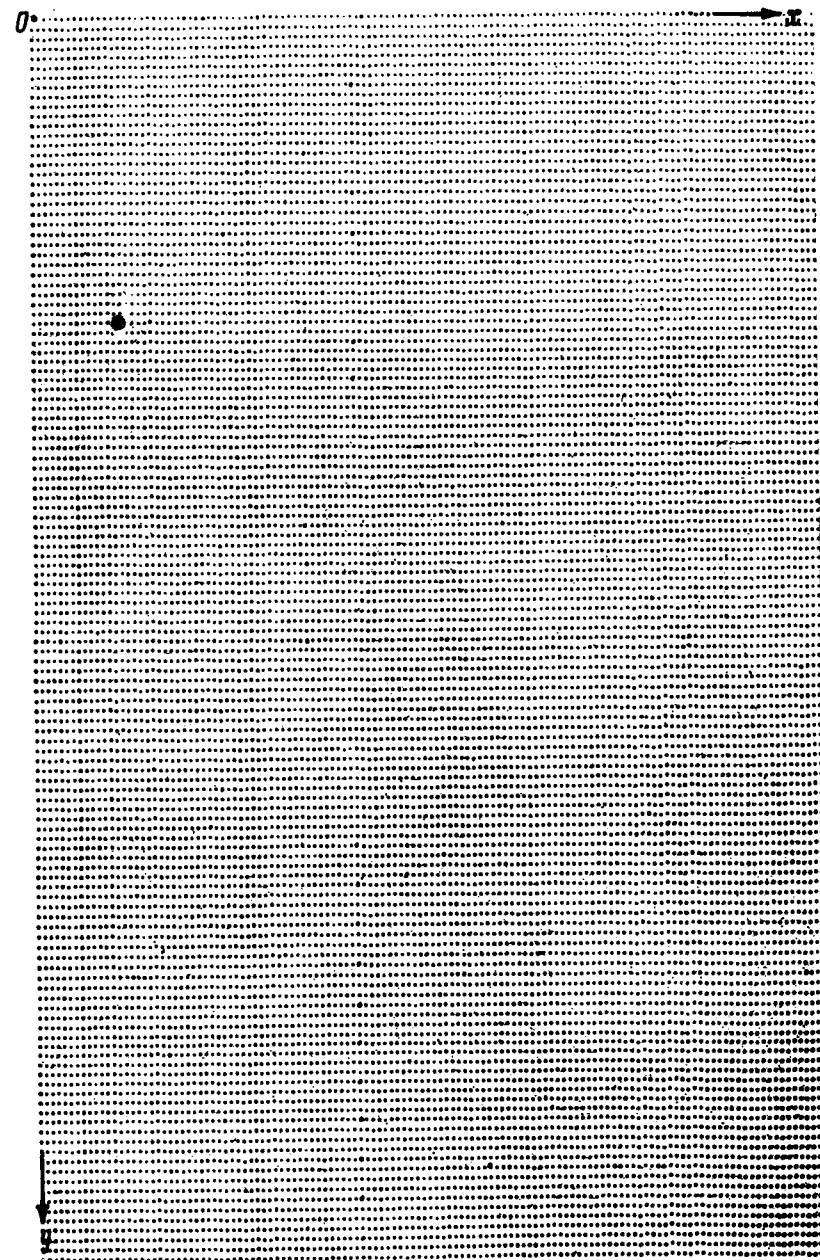


Рис. 42. Смещенная точка и ее голограмма

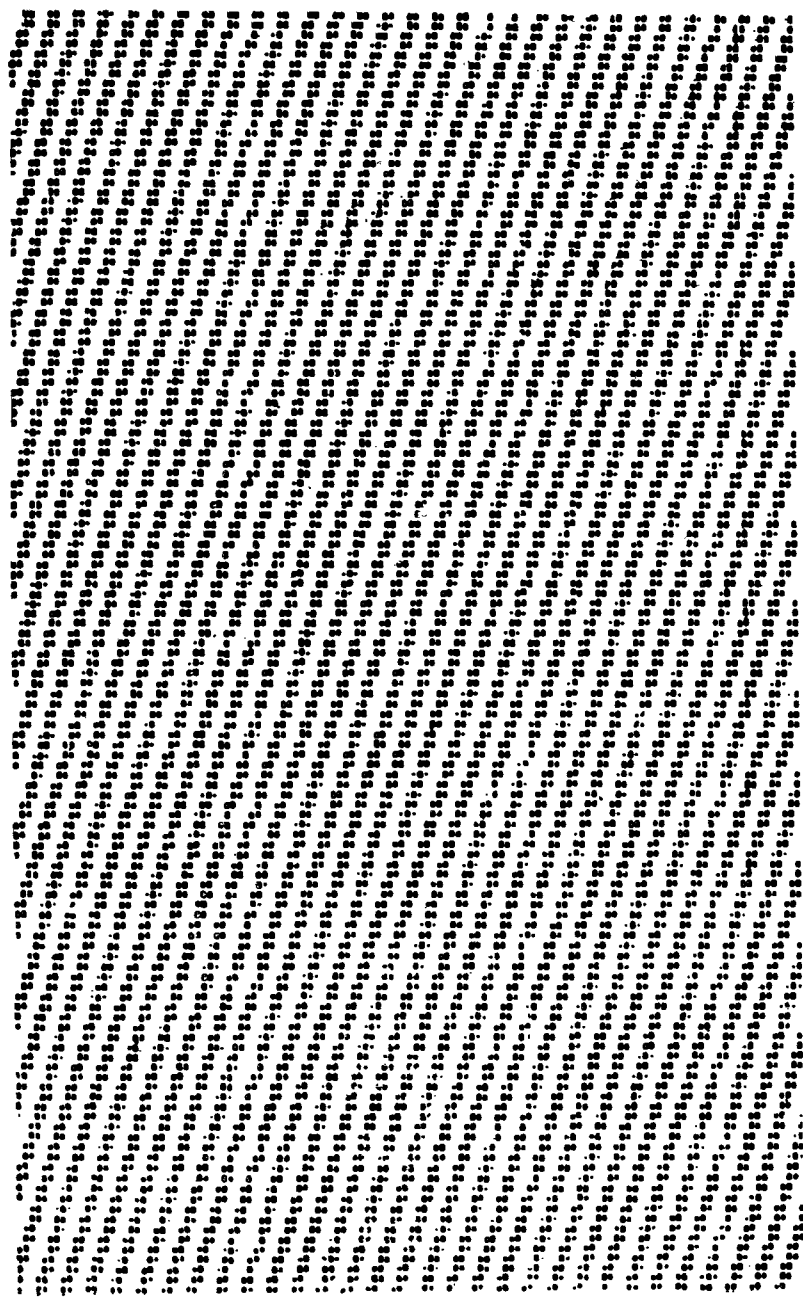


Рис. 42. (Окончание)

Выражение для прозрачности цифровой голограммы τ_{pq} имеет несколько иной вид, чем в непрерывном случае. Это происходит вследствие ограниченности поля в плоскости Π и дискретности изображения. Для сравнения получим выражения для цифровой голограммы прямоугольника и сопоставим его с анализируемым.

Пусть на плоскости Π задана сетка размером $M \times N$ узлов. На ней задан прямоугольник со сторонами a и b , занимающими соответственно m_a и n_b узлов так, что $a = m_a/M$; $b = n_b/N$. Для простоты примем, что m_a и n_b нечетны. Центр прямоугольника сдвинут относительно начала координат на x_0 и y_0 или в дискретном представлении соответственно m_x/M ; n_y/N . Стороны прямоугольника параллельны осям координат.

Запишем выражение для цифровой голограммы

$$\tau_{pq} = a_{pq} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} E_{mn} \cos 2\pi \left(p \frac{m}{M} - q \frac{n}{N} \right).$$

Величина E_{mn} вне площади прямоугольника равна нулю, а внутри ее постоянна и равна A_E , следовательно, получим

$$m = m_x + (m_a - 1/2) \quad n = n_y - (n_b - 1/2)$$

$$a_{pq} = A_E \sum \sum \cos 2\pi \left(p \frac{m}{M} - q \frac{n}{N} \right)$$

$$m = m_x - (m_a - 1/2) \quad n = n_y - (n_b - 1/2)$$

Заменяя переменные

$$k = m - m_x + \frac{m_a - 1}{2}; \quad l = n - n_y + \frac{n_b - 1}{2}$$

и одновременно выражая косинус через показательные функции, после преобразований, которые здесь опускаем, получаем окончательное выражение для прозрачности цифровой голограммы прямоугольника

$$a_{pq} = A_E \frac{\sin \pi p \frac{m_a}{M}}{\sin \pi \frac{p}{M}} \frac{\sin \pi q \frac{n_b}{N}}{\sin \pi \frac{q}{N}} \cos 2\pi \left(p \frac{m_x}{M} + q \frac{n_y}{N} \right).$$

Синусные множители представляют собой амплитудный спектр цифрового прямоугольника, а косинусный — определяет сдвиг центра. Сравнивая это выражение с тем, которое использовали ранее, замечаем, что они отличаются выражением амплитудных спектров.

Это можно проследить на цифровых голограммах. На рис. 43, а показано расположение прямоугольника в зрительном поле. У этого прямоугольника сторона $a = 32/128$, сторона $b = 52/128$. Координаты центра $x_0 = 23/128$, $y_0 = 30/128$. На рис. 43, б показана голограмма этого прямоугольника. На ней отчетливо видна сетка нулей с ячейками, име-

ющими размеры $\Delta p = 4$ и $\Delta q = 4$. Косинусная волна четко проявилась и имеет расчетные параметры. На рис. 43, в представлена голограмма Фурье с шумовым фоном.

На рис. 44, а показано изображение в виде профиля кинескопа, смещенное относительно начала координат, а на рис. 44, б его синтезированной голограмма. На рис. 44, в изображена та же голограмма в условиях равномерной шумовой помехи. Можно отметить характерное для таких фигур звездообразное расположение лучей, которые при известном навыке дают возможность по голограмме опознать фигуру, ей соответствующую.

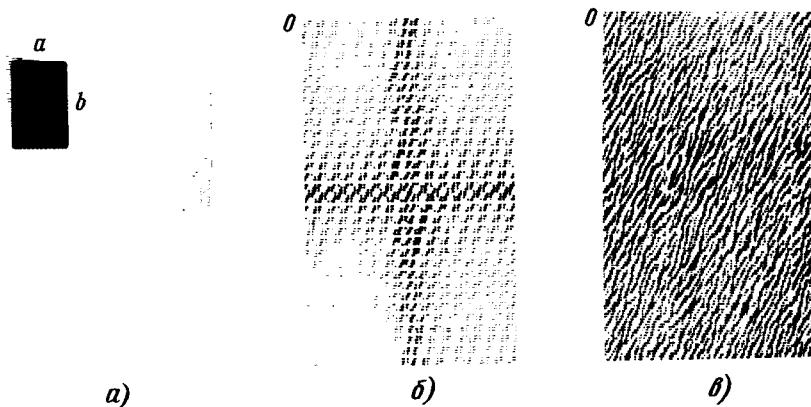


Рис. 43. Прямоугольник в зрительном поле

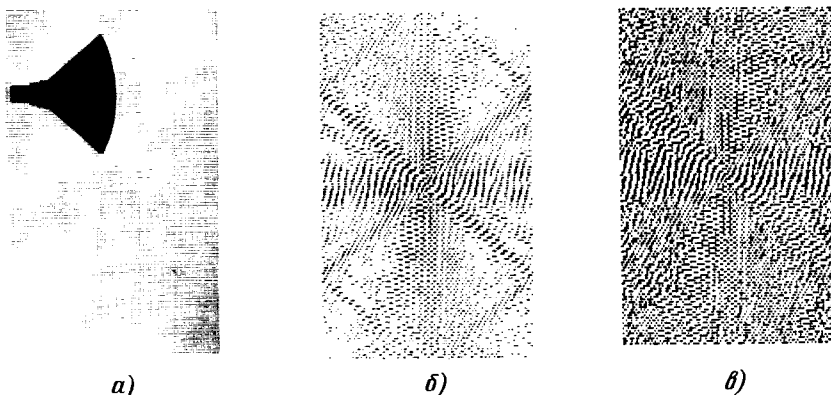


Рис. 44. Изображение кинескопа и его голограмма

2.5. ПРИМЕРЫ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ

Рассмотрим голограмму линии. Если линия задана на ограниченном апертурой участке плоскости Π , то можно записать, что ее изображение соответствует уравнению

$$y = kx + b,$$

причем ось Ox пересекает линию в пределах апертуры в точке

$$x_1 = b/k.$$

Этот случай описывает выражение

$$a(p, q) = A_E \int_0^{b/k} \cos[2\pi(p x + q(-kx + b))] \sqrt{1+k^2} dx.$$

После замены переменных $2\pi(p - kq)x + 2\pi bq = z$ получим

$$a(p, q) = A_E \frac{\sqrt{1+k^2}}{2\pi(p - kq)} \int_{2\pi bq}^{2\pi p b/k} \cos z dz,$$

откуда

$$a(p, q) = A \frac{b}{k} \sqrt{1+k^2} \cos \pi \frac{b}{k} (p + kq) \frac{\sin \pi \frac{b}{k} (p - kq)}{\pi \frac{b}{k} (p - kq)}.$$

При увеличении размеров апертуры последний множитель стремится к δ -функции, достигая максимальных значений на прямой $p - kq = 0$ в точках, в которых

$$\pi \frac{b}{k} (p + kq) = 2\pi n.$$

Косинусная волна зависит от расстояния между серединой отрезка и началом координат. Это можно заметить, если записать косинусный множитель в виде

$$\cos 2\pi \left(p \frac{b}{2k} + q \frac{b}{2} \right).$$

Числа $x_0 = b/2k$ и $y_0 = b/2$ — есть координаты середины отрезка, поэтому получим

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{y_0}{x_0} = k; \quad \lambda = \frac{1}{\sqrt{\frac{b^2}{4k^2} + \frac{b^2}{4}}} \frac{1}{\frac{b}{2k} \sqrt{1+k^2}}$$

Теперь уже видно, что голограмма произвольного отрезка прямой представляет собой довольно сложную картину. На рис. 45 показаны исходное изображение прямой и его цифровая голограмма Фурье.

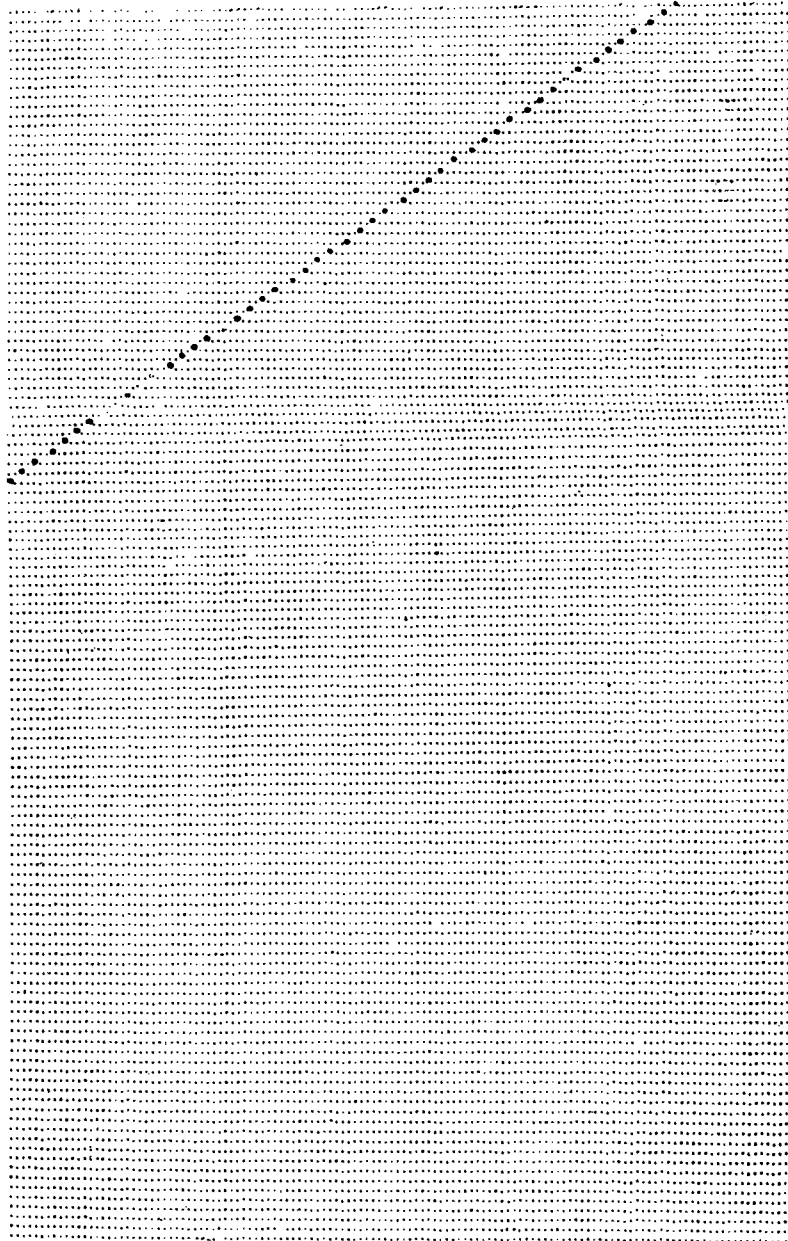


Рис. 45. Прямая линия и ее голограмма

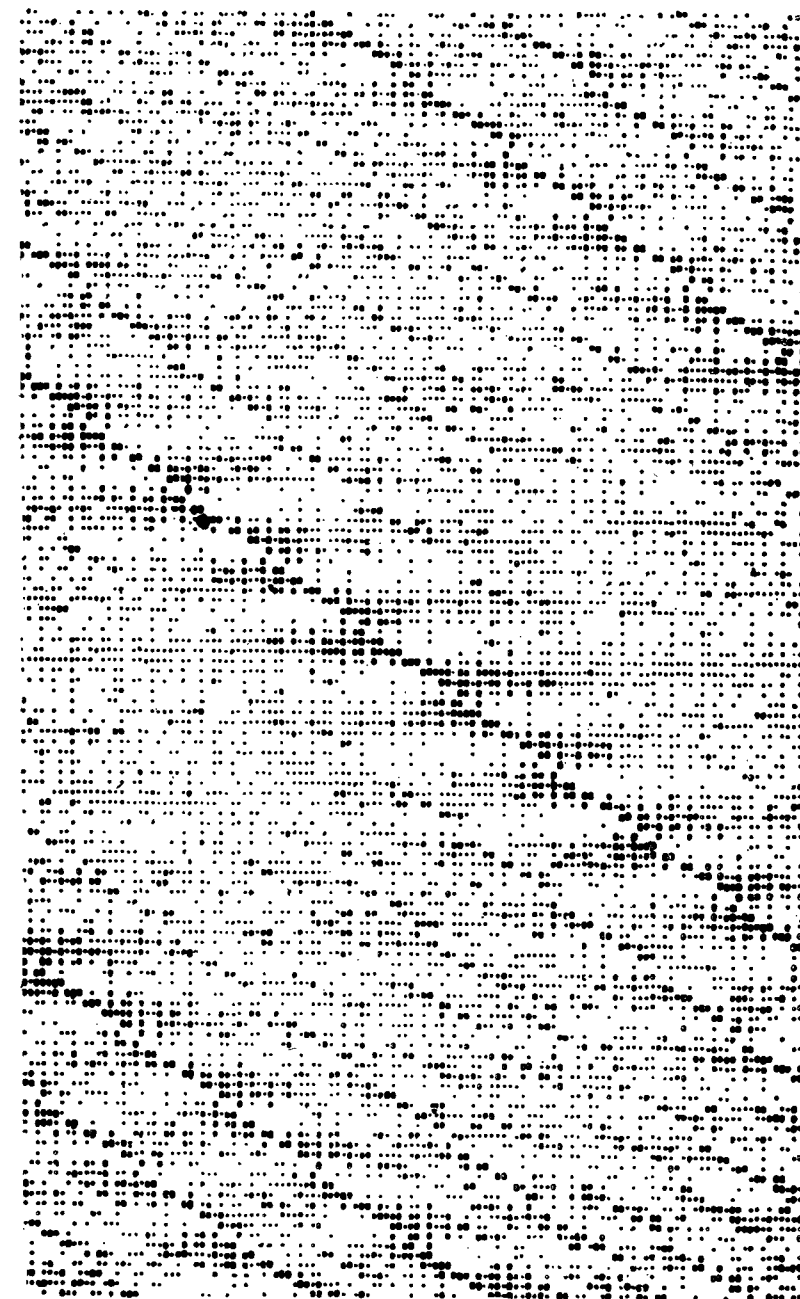


Рис. 45. (Окончание)

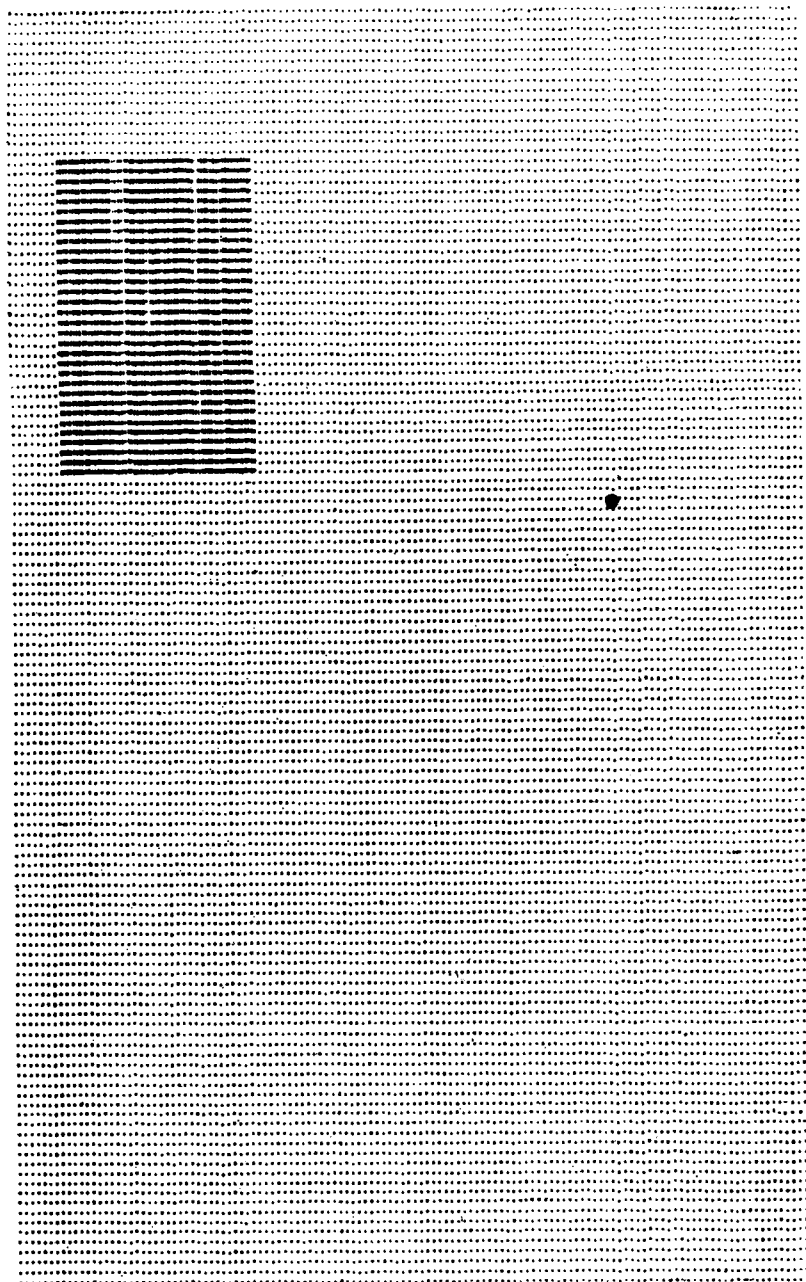


Рис. 46. Изображение прямоугольника и его голограмма

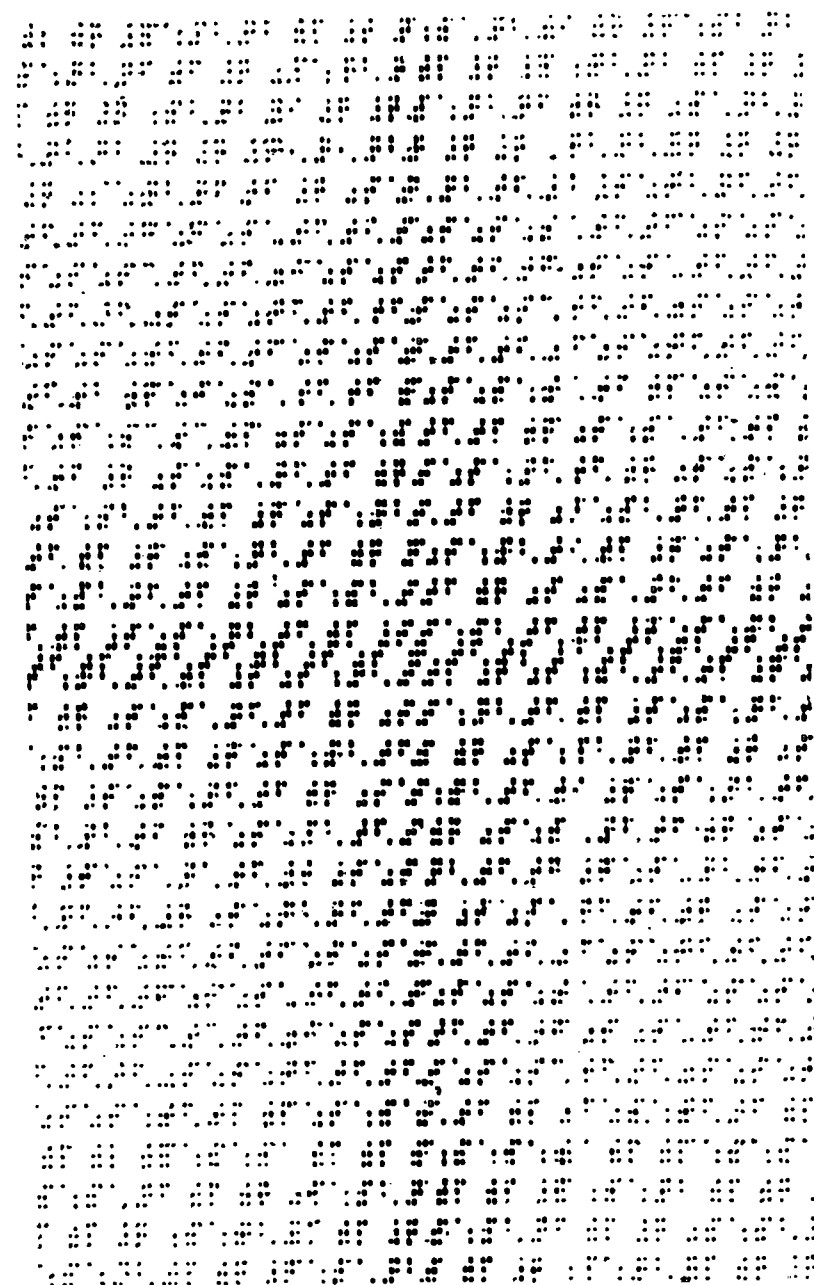


Рис. 46. (Окончание)

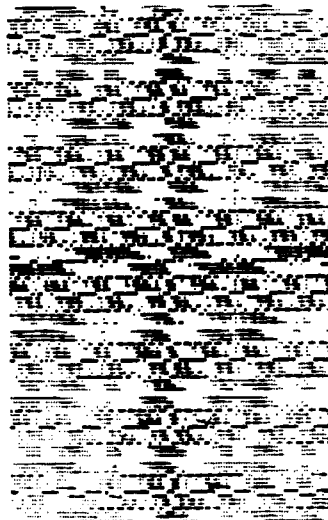


Рис. 47. Голограмма сложного объекта

На рис. 46 изображена голограмма прямоугольника с введением в нее случайной фазы. Про такую голограмму говорят, что она получена с рассеивателем. Видно, что световой поток в этом случае более равномерно распределяется по площади голограммы, в отличие от голограмм без рассеивателя, у которых он концентрируется в центральной части.

На рис. 47 показано изображение и голограмма трех букв Т.

Из рассмотренных рисунков видно, что голограммы различных фигур имеют довольно разнообразную структуру в зависимости от формы фигур, их положения в плоскости Π и наличия рассеивателя. Голограммы без рассеивателя, полученные для геометрических фигур с плоскими гранями, имеют как правило, звездообразную структуру, центрированную в плоскости Γ , причем число лучей определяет число непараллельных сторон.

Каждая группа непараллельных сторон создает в структуре голограммы луч, перпендикулярный к ним. Это отчетливо видно на голограмме треугольника. Наличие рассеивателя полностью меняет структуру голограммы, делая ее более однородной, однако смещение объекта относительно начала координат проявляется и в ней в виде анизотропии. Для фигур, имеющих центральную симметрию, выражение информационного члена уравнения голограммы может быть получено в более общем виде и расчет по ним дает возможность спрогнозировать ожидаемую структуру голограммы.

2.6. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ С ГОЛОГРАММ

Как известно из главы 2, голографический процесс состоит из двух этапов: записи голограммы и восстановления с нее записанного изображения. Теперь, когда у нас имеется записанная на АЦПУ цифровая голограмма объекта, необходимо его восстановить. Есть два метода восстановления – машинный и оптический.

Сущность машинного метода состоит в выполнении обратного преобразования Фурье над синтезированной голограммой и получении с помощью АЦПУ новой распечатки, на которой должно быть зафиксировано исходное изображение.

При оптическом методе с синтезированной голограммы фотоспособом получают голограмму, размером примерно в четверть миллиметра при сохранении ее разрешающей способности. Затем эту голограмму помещают в лазерный лучистый поток с той длиной волны, для которой голограмма была рассчитана (вспомните: в формулах присутствовал коэффициент λ). В результате дифракции на оптических неоднородностях голограммы будет восстановлено то изображение, голограмма которого записана на фотослое.

Рассмотрим основные соотношения, характеризующие процесс восстановления изображения по его голограмме Фурье. Это соотношение потребуется для анализа изображения, восстановленного по цифровой голограмме оптическим путем. Схема установки для восстановления показана на рис. 48. В левой ее части есть точечный источник света S (газовый лазер). От него параллельный пучок света проходит через линзы L_0 и L_1 . На выходе линзы действует плоская волна, падающая на голограмму Фурье, расположенную в плоскости Γ . Прозрачность голограммы в каждой точке плоскости Γ характеризует функция

$$\tau(p, q) = k_r [\alpha - \beta A_E^2(p, q) - A_E(p, q) \cos \psi(p, q)]$$

Прошедшую через голограмму волну U в плоскости Γ можно характеризовать выражением

$$u(p, q) = U \tau(p, q),$$

где U – коэффициент пропорциональности, а $\tau(p, q)$ – прозрачность голограммы. Линза L_2 выполняет над волной $u(p, q)$ преобразование Фурье. Таким образом, в плоскости изображение Π получаем новое распределение амплитуд

$$V(x_2, y_2) = \frac{1}{\lambda_2 f_2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (p, q) \exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda_2 f_2} (x_1 x_2 + y_1 y_2) \right] dx_1 dx_2$$

$dx_1 dx_2$

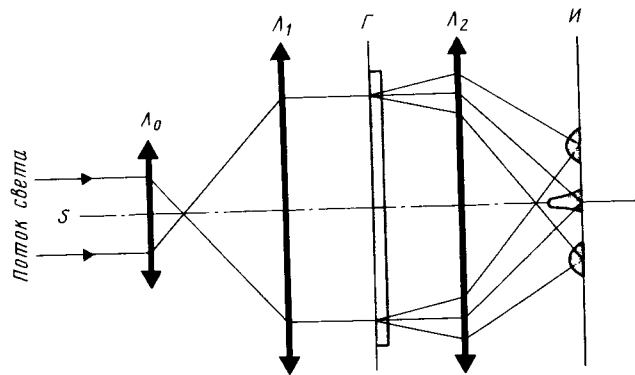


Рис. 48. Схема установки для восстановления изображения по синтезированной голограмме

Обозначив

$$p = \frac{x_1}{\lambda_1 f_1}; \quad q = \frac{y_1}{\lambda_1 f_1}; \quad x = -\frac{\lambda_1 f_1}{\lambda_2 f_2} x_2; \quad y = \frac{\lambda_1 f_1}{\lambda_2 f_2} y_2,$$

получим

$$V(x_2, y_2) = k V_n(x, y),$$

где

$$k = k_r \frac{\lambda_1^2 f_1^2}{\lambda_2^2 f_2^2},$$

и тогда

$$V_n(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\tau(p, q)}{k_r} e^{j2\pi(px + qy)} dp dq.$$

Это преобразование Фурье функции $\tau(p, q)/k_r$. После некоторых преобразований получим почти знакомое выражение

$$\begin{aligned} V_n(x, y) &= \alpha \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{j2\pi(px + qy)} \times \\ &\times \beta \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_E^2(p, q) e^{j2\pi(px + qy)} \times \\ &\times dp dq = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_E(p, q) \cos \psi(p, q) e^{j2\pi(px + qy)} dp dq. \end{aligned}$$

Рассмотрим эти три выражения по отдельности. Первое слагаемое в соответствии с формулой Эйлера представляет собой δ -функцию

$$\alpha \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{j2\pi(px + qy)} dp dq = \alpha \delta(x, y).$$

Она равна нулю во всех точках, кроме $x = 0$ и $y = 0$.

Второе слагаемое как преобразование Фурье от квадрата амплитудного спектра функции $E(x, y)$ пропорционально ее автокорреляции $R(x, y)$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_E^2(p, q) e^{j2\pi(px + qy)} dp dq = R(x, y).$$

Третье слагаемое с помощью хорошо известного из тригонометрии соотношения $\cos \psi = (e^{j\psi} + e^{-j\psi})/2$ можно представить в виде двух составляющих:

$$E_{n1}(x, y) = 0,5 E_0(-x - x_0, -y - y_0);$$

$$E_{n2}(x, y) = 0,5 E_0(x - x_0, y - y_0),$$

где $E_0(x, y)$ — исходное изображение. Все это позволяет сделать важный вывод относительно ожидаемой структуры восстановленного изображения. Оно должно состоять из центрального пятна, образованного δ -функцией и автокорреляцией изображений, расположенных симметрично относительно центра на расстоянии x_0, y_0 . Это видно из того, что последние два члена одинаковы, отличаются лишь координатами. Второе изображение идентично первому, но сдвинуто в противоположную сторону на $-x_0$ и $-y_0$ и перевернуто.

Масштаб полученных изображений легко определить, используя следующее соотношение

$$E_{\text{восст}}(x_2, y_2) = k_n E\left(\frac{\lambda_1 f_1}{\lambda_2 f_2} x_2, \frac{\lambda_1 f_1}{\lambda_2 f_2} y_2\right),$$

где $\frac{\lambda_1 f_1}{\lambda_2 f_2} = \frac{1}{m}$ — масштабный множитель. Чем меньше $1/m$, тем больше будет увеличение изображения при восстановлении. Варьируя длину волны излучения при получении голограммы или при восстановлении, можно в значительных пределах изменять увеличение голографической системы. Эти соотношения дают возможность провести анализ ожидаемой структуры изображения, восстановленного по цифровой голограмме Фурье.

Переход от непрерывной голограммы к цифровой (дискретной) дает следующее соотношение

$$V_n(x, y) = \sum_{p=0}^{P-1} \sum_{q=0}^{Q-1} \tau_{pq} e^{-j2\pi(px + qy)},$$

т. е. замена интеграла Фурье усеченным рядом Фурье функции τ_{pq} . Это

говорит от том, что восстанавливаемая функция имеет периодический характер. Периоды функции по осям x и y равны периодам первых гармоник:

$$\lambda_x = 1/p; \quad \lambda_y = 1/q,$$

т. е. с точностью до масштабного множителя равны размерам X и Y поля изображения в плоскости предметов.

Это иллюстрирует рис. 49. Поле имеет периодическую структуру функции $V_n(x, y)$ с ячейкой, равной полю изображения. Направления осей координат указаны такими, какие использовались при введении изображения в ЭВМ. Последняя формула справедлива в предположении бесконечного распространения функции $V_n(x, y)$, но в действительности при восстановлении этого произойти не может вследствие того, что при больших значениях X и Y это соотношение, выведенное из уравнения линзы как преобразователя Фурье, не выполняется. В связи с этим периодическая картина будет иметь место лишь в некоторой ограниченной области плоскости. Если учесть масштабное преобразование при печати и при фотографировании с уменьшением для предстоящего оптического восстановления, то получим

$$m = \frac{m_{ym}}{m_{ц}} \cdot \frac{\lambda_2 f_2}{\lambda_1 f_1}; \quad n = \frac{n_{ym}}{n_{ц}} \cdot \frac{\lambda_2 f_2}{\lambda_1 f_1},$$

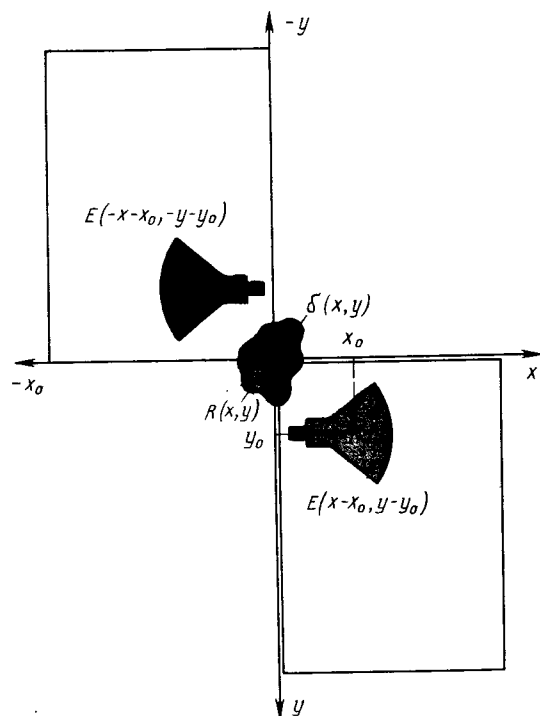


Рис. 49. Составляющие восстановленного изображения

здесь $m_{ц}$ и $n_{ц}$ — увеличение "цифровой лупы" при печати голограммы; m_{ym} и n_{ym} — степени уменьшения цифровой голограммы при ее фотографии.

Таким образом, периоды восстановленной функции в плоскости восстановления равны

$$\lambda_x = m X; \quad \lambda_y = n Y.$$

Восстановленную картину можно привести к исходной соответствующим выбором параметров. А как должна выглядеть сама картина, описываемая функцией? Это можно установить, вспомнив, что восстановление непрерывной голограммы приводит к появлению четырех составляющих изображения в плоскости И

$$V_n(x, y) = \alpha \delta(x, y) - \beta R(x, y) - 0,5 E_0(-x - x_0, -y - y_0).$$

Первое слагаемое (δ -функция) — изображение точечного источника в начале координат. Второе — автокорреляция исходного изображения; она расположена также в окрестности начала координат. Третье — исходное изображение, расположенное на расстояниях от начала координат, пропорциональных сдвигам исходного изображения в плоскости И. Четвертое слагаемое есть результат симметричного отображения относительно начала координат исходного изображения в область отрицательных полуосей системы Oxy .

Это показано на рис. 50. В нижней правой его части — поле изображения. Оно обведено двойной линией. В верхней части поля, в левом углу, расположена первая и вторая составляющие, немного ниже одно из восстановленных изображений, а другое — в левой верхней части. Они закрашены одинаково, но возле них указаны координаты, отличающиеся знаком при x и y . Однако вследствие дискретности цифровой голограммы функция $V_n(x, y)$, а следовательно, и все ее составляющие являются периодическими. Это и показано на рисунке расположением многих изображений прямоугольника на всем восстановленном участке. Эта периодичность восстановленной картины накладывает определенные требования на размещение исходного изображения в плоскости И. Для того чтобы оставался свободным участок для формирования симметричной составляющей изображения при восстановлении, нужно исходное располагать определенным образом.

В простейшем случае это означает, что исходное изображение должно размещаться по одну сторону от произвольного отрезка прямой, проведенного через центр поля изображения. Выполнение этого требования позволит исключить наложения изображений в периодической картине одного на другое. Разумеется, следует учитывать и масштабный фактор.

Восстановление изображений с цифровых голограмм оптическим методом состояло из двух этапов: подготовка цифровых голограмм к восстановлению и собственно оптическое восстановление изображения с синтезированных голограмм. Исходным материалом служили "заготовки" цифровых голограмм Фурье простейших изображений, отпеча-

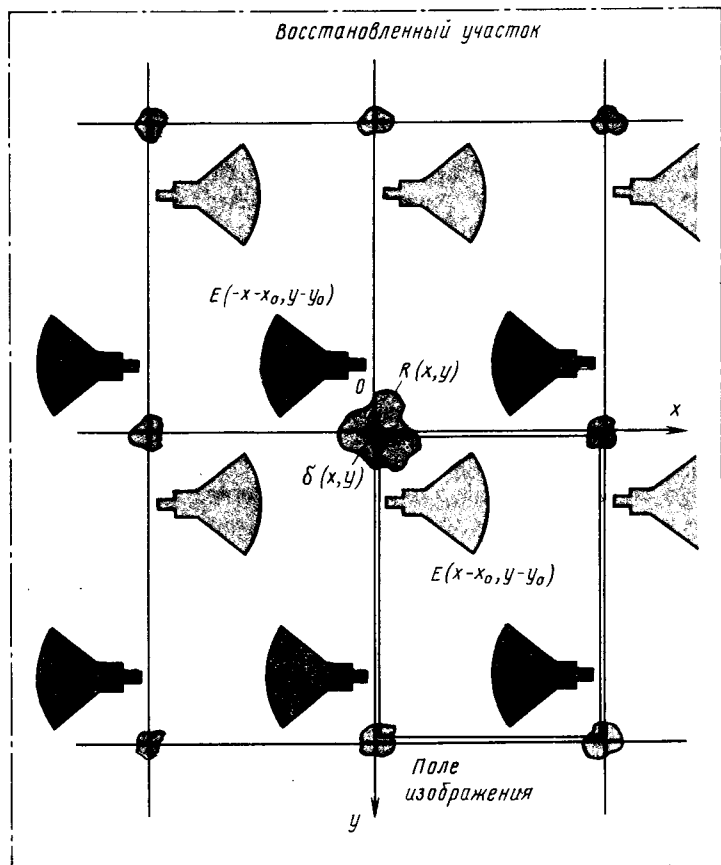


Рис. 50. Ожидаемая структура изображения

таные на АЦПУ-128. Они представляли собой матрицы, состоящие из 128 строк по 128 элементов в строке. Размер поля — 344 × 547 мм. Гол로그램 нужно было уменьшить до размера реальной физической голограммы. Для выбора коэффициента уменьшения и получения цифровой голограммы на фотопластинке в нужных размерах из соотношений, связывающих координаты точек в плоскости голограммы с соответствующими им пространственными частотами, получим:

$$x_1 = p \lambda_1 f_1; \quad y_1 = q \lambda_1 f_1.$$

Поскольку период первой гармоники равен размеру апертуры в плоскости исходного изображения, то координаты точек, соответствующие первым гармоникам, в плоскости физической голограммы равны:

$$(x_1)_1 = \frac{\lambda_1 f_1}{D_x}; \quad (y_1)_1 = \frac{\lambda_1 f_1}{D_y}.$$

Эти координаты соответствуют размерам ячейки цифровой голограммы и физической, имеющей те же размеры ячейки. При этом вся цифровая голограмма, содержащая 128 на 128 элементов, должна иметь размеры:

$$\Gamma_p = 128 \frac{\lambda_1 f_1}{D_x}; \quad \Gamma_q = 128 \frac{\lambda_1 f_1}{D_y}.$$

Физические же размеры "заготовки" определяют указанные ранее размеры бланка АЦПУ-128.

Таким образом, увеличение "цифровой лупы" можно легко подсчитать, воспользовавшись следующими соотношениями

$$m_u = \frac{(\Gamma_p)_u}{\Gamma_p}; \quad \Gamma_p = 128 \frac{\lambda_1 f_1}{D_y}.$$

Примем фокусное расстояние оптической системы $f_1 = 25$ см, а диаметр входного отверстия $D = 2$ см. Пусть монохроматическое излучение сосредоточено на волне $\lambda = 0,6328$ мкм, а физические размеры цифровой голограммы равны $(\Gamma_p)_u = 344$ мм, $(\Gamma_q)_u = 547$ мм. Это приведет к следующему результату:

$$m_u = \frac{34,4 \cdot 2 \cdot 10^8}{128 \cdot 6328 \cdot 25} = 340, \quad n_u = \frac{54,7 \cdot 2 \cdot 10^8}{128 \cdot 6328 \cdot 25} = 540.$$

Для принятых параметров размеры физической голограммы Фурье, ограниченной соответствующими частотами, равны:

$$\Gamma_p = 1 \text{ мм}, \quad \Gamma_q = 1 \text{ мм}.$$

Это позволяет нам сказать, что увеличение "цифровой лупы" приближенно равно 350 раз вдоль строки и 550 раз вдоль столбца. При пересъемке цифровой голограммы на фотопластинку коэффициенты уменьшения выбирают из желаемого размера восстановленного изображения с учетом соотношений

$$m_{ym} = m m_u \frac{\lambda_1 f_1}{\lambda_2 f_2}; \quad n_{ym} = n n_u \frac{\lambda_1 f_1}{\lambda_2 f_2}.$$

Отсюда следует, что при желании получить восстановленное изображение, равное исходному, при одних и тех же параметрах систем голографирования и восстановления (длина волны излучения и фокусное расстояние) коэффициенты уменьшения по осям должны быть равны коэффициентам увеличения "цифровой лупы", т. е. в нашем случае 350 и 550.

На практике коэффициент уменьшения по обеим осям выбирали одинаковым, равный примерно 400. Уменьшение выполняли в два этапа. Сначала "заготовку" фотографировали на 35-миллиметровую пленку с уменьшением в 20 раз, а затем с нее с помощью специального микрофильмирующего устройства переснимали на фотопластинку высокого разрешения (ВР-1000) с уменьшением еще в 20 раз. Полученная таким образом цифровая голограмма имела размеры

$1,32 \times 0,86 \text{ мм}^2$, а восстановленное изображение получалось несколько разномасштабным по осям. Ввиду того, что цифровая голограмма содержала 128 строк, при уменьшении требовалось обеспечить разрешающую способность 64 линии на миллиметр при контрастности, близкой к единице.

Практически использованное оборудование и материалы позволяли получить разрешающую способность около 300 линий на миллиметр при контрастности 0,5. Для восстановления использовали универсальную голографическую установку, приспособленную для решения основных задач голографического процесса: получение голограмм транспарантов, восстановление изображений, оптическая пространственная фильтрация, исследование искажений, вызываемых оптико-механическими погрешностями, и пр. Особенность установки – наличие дополнительной плоскости со спектром Фурье исходного изображения. Это давало возможность, в частности, разделить амплитудную и амплитудно-фазовую фильтрацию. Наличие амплитудного фильтра позволяет убрать постоянную составляющую и в значительной степени ослабить влияние спектра апертуры.

В качестве источника когерентного света использовали гелий-неоновый лазер ЛГ-36А. Оптически формировали две взаимно когерентные волны: сигнальную и опорную. Высокочастотные интерференционные помехи снимали диафрагмами, установленными в фокальных плоскостях микрообъективов. Для сохранения фронта сигнальной волны фотопленку с изображением помещали в иммерсионную кювету. Кассету с голограммой крепили на поворотном оптическом столе, позволяющем выполнять микроперемещения и вращение.

Описанная установка позволяла выполнять восстановление изображений с цифровых голограмм, подготовленных указанным способом, оценивать влияние неточности установок голограмм на качество получаемого изображения, а также давала возможность получать физические голограммы простейших изображений, для которых были сформированы голограммы цифровые. Это позволило сравнивать их структуру и оценивать, в каких случаях целесообразнее использовать синтезированные голограммы, а в каких – физические.

Большинство восстановленных изображений с синтезированных голограмм, которые описаны в этой книге, были выполнены в то время студентами второго курса одного из вузов А. Н. Кузнецовым, С. В. Самыловским, В. Д. Ковалевым.

2.7. ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩИЙ ЭФФЕКТ БИНАРНОЙ ГОЛОГРАММЫ

Сущность этого эффекта хорошо видна на рис. 51. В левой его части показан силуэт самолета, с которого была синтезирована на ЭВМ голограмма, в центре – голограмма, а справа – восстановленное изображение. То, что изображений самолета несколь-

ко, не должно удивлять. Еще раньше мы рассказывали, что голограмма напоминает интерференционную решетку, которая при прохождении через нее светового потока дает отклонение этого потока от оси, причем имеется нулевой, первый, второй порядки в отклоняемых пучках.

Но почему вместо силуэта возникло контурное изображение? Дело в том, что, желая максимально упростить проведение машинного эксперимента, пришлось пойти на следующее – делать не многоградиентную голограмму, а двоичную бинарную, т. е. был выбран порог τ_{pq} и в зависимости от того, какое получали расчетное значение функции Θ_{pq} (больше или меньше порогового) представляли его либо единицей, либо нулем. Формирование такой голограммы можно представить следующим образом:

$$\Theta_{pq} = \begin{cases} 1, & \text{если } a_{pq} > 0 \\ 0, & \text{если } a_{pq} \leq 0 \end{cases}$$

Ввиду того что

$$a_{pq} = A_{pq} \cos [2\pi(px_0 + qy_0) - \varphi_{pq}],$$

а A_{pq} всегда положительно, функция a_{pq} целиком определяется знаком косинуса фазы. Рассмотрим значения функции a_{pq} в точках p_1, q_1 , в которых фаза принимает значения (рис. 52). Поскольку в этих точках косинус максимален (равен единице), то $a_{p_1q_1} = A_{p_1q_1}$. Огибающая, проведенная через значения a_{pq} , совпадает в точках p_1, q_1 с A_{pq} . В этих же точках функция Θ_{pq} принимает значения, равные единице. Представим функцию Θ_{pq} двоичной голограммы в точках p_1, q_1 как результат прохождения исходной функции a_{pq} через оптический фильтр с пространственно-передаточной функцией g_{pq} , т. е.

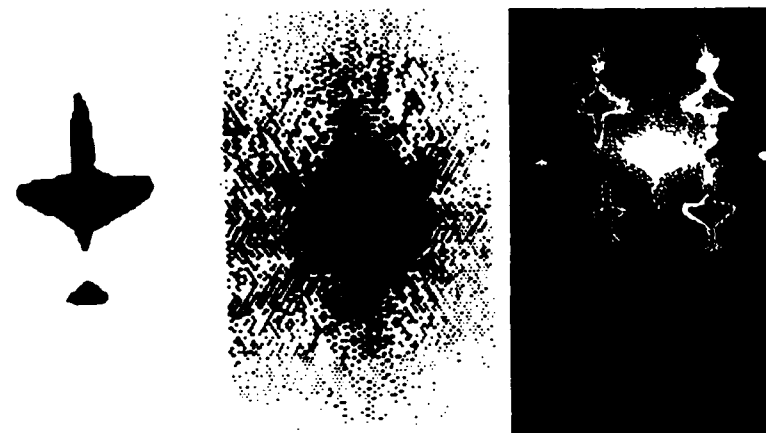


Рис. 51. Силуэт самолета, его голограмма и восстановленное изображение

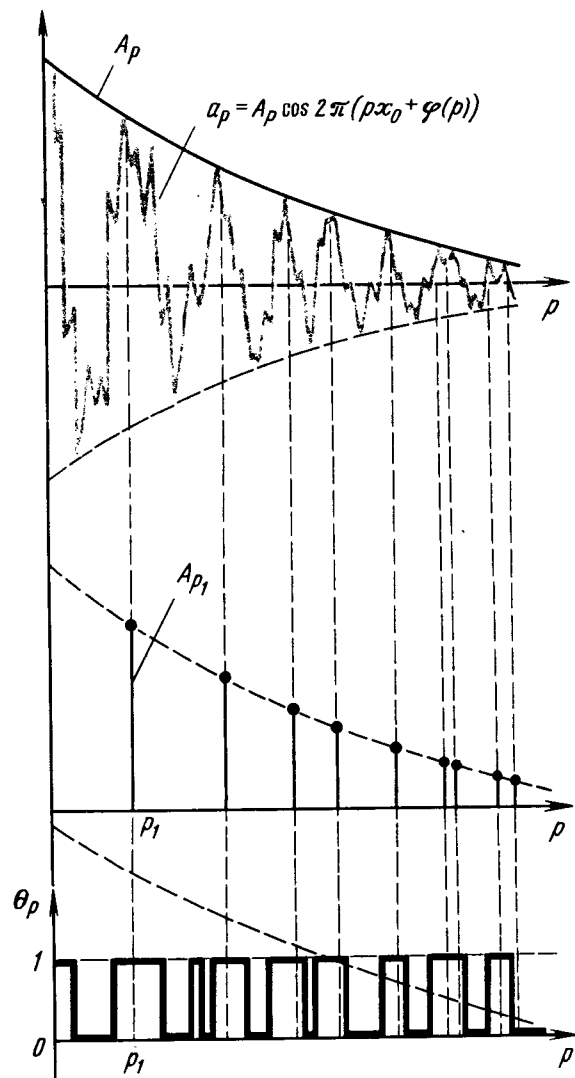


Рис. 52. К периодичности функции

$$\Theta_{p_1 q_1} = a_{p_1 q_1} g_{p_1 q_1}.$$

Выясним характер зависимости $g_{p_1 q_1}$ от пространственных частот в точках p_1, q_1 . В этих точках $a_{pq} = A_{pq}$, $\Theta_{pq} = 1$, поэтому $A_{pq} \neq 0$ и $A_{pq} g_{pq} = 1$. Следовательно,

$$g_{pq} = 1/A_{pq}.$$

Как известно, у большинства реальных изображений амплитудные спектры A_{pq} — убывающие функции пространственных частот. В общем случае огибающие таких спектров приближенно могут быть представлены в виде

$$A_{pq} = k/p^n q^m,$$

где показатели степени n и m зависят от формы изображения объекта. Например, для прямоугольника $m = n = 1$. С учетом сказанного функция g_{pq} будет обратной A_{pq} и нарастающей пропорционально $p^n q^m$, т. е. будет характеризовать звено с эффектом n -кратного (или m -кратного) дифференцирования. При этом функцию двоичной голограммы для точек p_1, q_1 приближенно можно записать как

$$\Theta_{p_1 q_1} = k p_1^n q_1^m A_{p_1 q_1},$$

что отражает дифференцирующий эффект.

В этом доказательстве рассмотрены лишь точки, лежащие на огибающей пространственного спектра, т. е. гармоники, несущие наибольшую энергию, и показано, что в двоичной голограмме происходит подъем этой огибающей. А это и характеризует увеличение доли высоких пространственных частот, что, в свою очередь, порождает тенденцию к дифференцированию. Дифференцирующий эффект проявляется в полной мере для симметричных изображений, в которых $\varphi_{pq} = 0$, а также для таких, у которых фазовый спектр постоянен или медленно меняется. Если же φ_{pq} меняется существенно и резко, то становится несправедливым предположение о периодическом характере a_{pq} и вместе с этим о дифференцирующем эффекте.

Примером тому служит голограмма Фурье, полученная с рассеивателем. В этом случае фаза φ_{pq} случайна, следовательно, случайно и значение косинуса. Огибающая функции a_{pq} уже не является амплитудным спектром, и в области низких частот ее подъема не наблюдается. Она близка к прямой, параллельной оси частот, и в этом смысле подобна двоичной голограмме. Поэтому получение двоичной голограммы из цифровой с рассеивателем должно приводить к значительно меньшим искажениям, чем без него.

В следующем параграфе показано, что дифференцирующий эффект может быть однократным, двукратным и многократным. Из голограммы же, полученной с рассеивателем, силуэтное изображение восстанавливается без заметного подчеркивания контура. Переход от бинарных голограмм к многоградационным также снижает эффект дифференцирования и приводит к заполнению световой энергией внутренней части изображения объекта.

2.8. ПРИМЕРЫ ВОССТАНОВЛЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Цифровые голограммы простейших объектов уже были показаны ранее. Помимо них были получены также голограммы прямоугольника, треугольника, звезды, а также различных силуэтов летательных аппаратов. Процесс восстановления изображения с этих голограмм машинным путем также изложен выше – восстановленный объект совершенно идентичен исходному. В то же время восстановление изображения оптическим путем дает иногда интересные результаты, особенно при сравнении синтезированных голограмм с физическими. Сопоставление показало, что, кроме принципиальных различий, вызванных способом получения голограмм (таких, как дискретность, непрерывность и др.), имеются различия, вызванные побочными явлениями.

К ним относятся у цифровых голограмм – флуктуации координат впечатываемых символов вследствие неравномерности движения бумажной ленты при печати и вибрации деталей печатающего устройства, форма и степень черноты на печатных символах, искажения, вносимые при пересъемке голограммы с уменьшением до нужного размера. У физических голограмм – это прежде всего различного рода искажения и неточности вследствие экспериментального характера голографического процесса (неточечность источника света, неоднородность светового поля в плоскости изображения, афокальность в плоскости голограммы, вибрация установки в момент записи голограмм, погрешности фотографического процесса). Вследствие этого физические голограммы, приведенные к размеру цифровых, все же отличаются от них, особенно в тонкостях структуры. Общий макрорисунок у них весьма близок, а вот структурные элементы по форме и взаимному положению отличаются из-за рассогласования в положении объекта относительно начала координат. Этот фактор в значительной степени влияет на частоту и направление интерференционных полос и поэтому во многом определяет микроструктуру голограммы. Для физических голограмм характерна неодинаковость качества проработки структуры по полю голограммы.

Сравнение физических и цифровых голограмм одного и того же объекта показало, что изучать структуру голограммы и зависимость ее характера от различных факторов значительно удобнее по цифровым голограммам, поскольку они более свободны от влияния неконтролируемых параметров, дают возможность легко получать нужные качественные характеристики непосредственно при выведении из машины.

При экспериментировании было выполнено восстановление десяти различных изображений по их цифровым голограммам, полученным без рассеивателя и с рассеивателем. Вот одна из фотографий восстановленного изображения (рис. 53). А теперь перевернем несколько стра-

ниц книжки и найдем рис. 50. На нем показана ожидаемая структура восстановленного изображения, полученная из анализа формул, т. е. расчетная. Сравнение теоретической и реальной картин говорит о многом. Не принимая пока во внимание вид исходного изображения, посмотрим на взаимное расположение элементов картины. Как и ожидалось из теории, структура имеет периодический характер. Причем периоды вдоль осей при сопоставлении масштабов равны размерам поля исходного изображения (входной апертуры). Четыре смежных поля изображения, примыкающих к началу координат, выглядят довольно четко. Соседние с ними периферийные поля в значительной степени ослаблены по причинам, связанными с неаксиальностью соответствующих световых пучков. Заметим, что в начале координат имеется яркая отметка – это изображение опорного источника. Ему соответствует первое слагаемое в анализированном ранее математическом выражении, описывающем процесс восстановления.

Второе слагаемое – автокорреляция исходного изображения – в восстановленной картине отсутствует, так как все цифровые голограммы были рассчитаны при $\beta = 0$. Это привело к искусственному очищению поля восстановленного изображения от мешающей составляющей, расположенной в окрестности начала координат. Периодическое повторение изображения точечного источника наблюдается во всех углах



Рис. 53. Периодичность восстановленного изображения

полей изображения, что значительно облегчает дешифрование восстановленной картины. Размеры полей изображения по осям не одинаковы по той причине, что коэффициент уменьшения голограммы при ее пересъемке по обеим осям был выбран одинаковым, в то время как по формуле, рассмотренной ранее, уменьшение по осям должно быть различным.

Каждое поле содержит два изображения объекта. Это – третье и четвертое слагаемые в упомянутом соотношении. Главные компоненты этих изображений расположены симметрично относительно начала координат и смещены от него на расстояния, равные смещениям исходного изображения. Правильное расположение исходного изображения в анализируемом поле позволило избежать наложения одного восстановленного изображения на другое. Восстановленная картина содержит также случайные пятна различных размеров и конфигурации. Это помехи, вызванные упомянутыми ранее побочными явлениями при цифровом голографировании.

А теперь рассмотрим более внимательно структуру изображения объектов. На рис. 54 показана фотография восстановленного изображения прямоугольника, причем сверху – полученное с рассеивателем, а внизу – без него. Верхнее изображение – силуэтное, нижнее – контурное. Контурное изображение появилось вследствие большого динамического диапазона бинарной голограммы и из-за значительного снижения энергии низких пространственных частот по сравнению с энергией высоких. Энергия центральной части фигуры оказалась перераспределенной в ее краевые части.

На рис. 55 приведены амплитудные спектры голограммы прямоугольника вдоль одной из осей, полученные с рассеивателем и без него (сторона прямоугольника $a = 8/128$). Видна существенная разница в распределении энергии. У голограмм Фурье с рассеивателем энергия сравнительно равномерно распределена по пространственным частотам и при квантовании существенного ее перераспределения не происходит. При восстановлении изображений по таким голограммам подчеркивания контуров не заметно. По всей фигуре световой поток распределен равномерно.

Рассмотрение восстановленных изображений позволяет провести анализ и характер дифференцирующего эффекта. Мы уже знаем, что кратность дифференцирования может быть различной в зависимости от формы голографируемого изображения. Она определяется входящей в выражение для двоичной голограммы функцией g_{pq} , обратной амплитудному спектру изображения. Например, для прямоугольника, спектр которого уже был рассмотрен, имеем

$$a_{pq} = A_E a b \cos 2\pi (px_0 + qy_0) \frac{\sin \pi p a}{\pi p a} \frac{\sin \pi q b}{\pi q b}.$$

В знаменателе правой части выражения пространственные частоты представлены в первой степени:

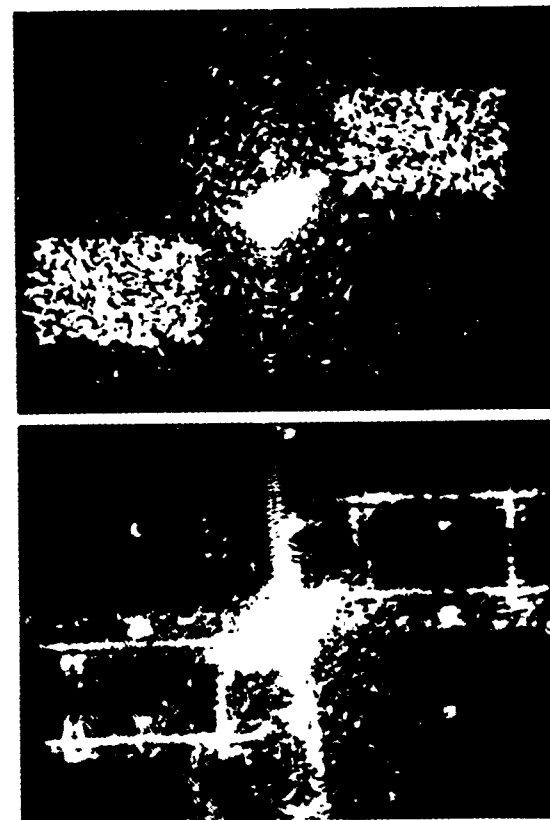


Рис. 54. Восстановленное изображение прямоугольника

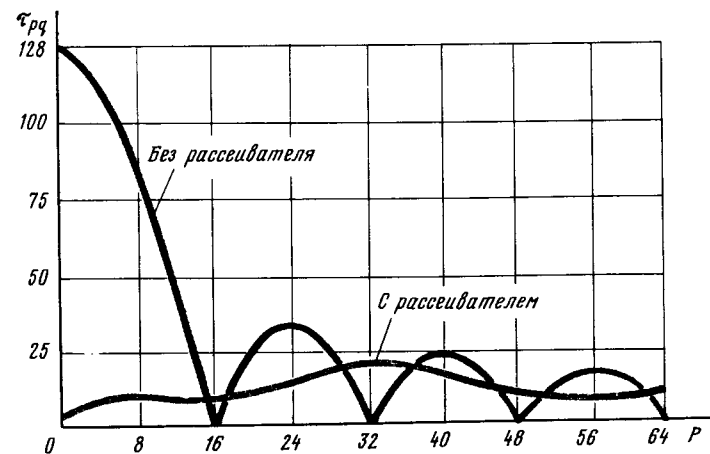


Рис. 55. Амплитудные спектры голограммы прямоугольника

$$\Theta_{p_1 q_1} = k p_1 q_1 a_{p_1 q_1},$$

т. е. дифференцирование первого порядка. Это должно приводить к появлению в восстановленном изображении одинарного контура прямоугольника.

У изображений более сложной формы кратность дифференцирования может быть равна двум и более. На таких изображениях видно два или три контура. Многоконтурность приводит к затруднению дешифрирования. Хорошо известно, что информационная способность контурных изображений очень высока. В настоящее время оконтуривание объектов, т. е. искусственное подчеркивание контуров, является методом, используемым при машинном анализе фотографий, получаемых с самолетов и спутников. Этот метод существенно облегчает работу дешифровщиков.

Проведение экспериментов по восстановлению изображений с цифровых голограмм позволило качественно оценить влияние неточности установки голограмм при восстановлении. Возможны неточности трех видов. К первому относят установку голограммы не в фокусе. В этом случае качество восстановленного изображения невысокое и его трудно рассматривать. Другой вид – поперечное смещение голограммы. Оно приводит к общему снижению яркости и контрастности восстановленного изображения. Был проделан следующий эксперимент: голограмму медленно вводили в световой поток. Это позволило наблюдать, как формируется изображение по мере приближения центральной части голограммы к оптической оси.

Эксперимент удалось сфотографировать (рис. 56). На левом кадре видно, что основная часть светового потока вызывает лишь его засветку, и только небольшая часть используется для восстановления изображения. Уже на третьем кадре заметно, что изображение объекта почти сформировалось, но еще значительная доля светового потока не использована и вызывает фоновую засветку кадра с максимальным воздействием на его центральную часть. А вот пятый кадр показывает, что качество восстановленного изображения близко к оптимальному: объект отчетливо различим, контрастность кадра возросла, контур объекта подчеркнут за счет эффекта дифференцирования. Структура объекта подчеркивается периодический характер. В центре имеется яркая отметка, являющаяся изображением опорного источника.

Следует указать, что на снимках выбрана только центральная часть восстановленного поля. На самом деле слева и справа от этой картины есть еще целый ряд изображений, но более бледных. Это явление



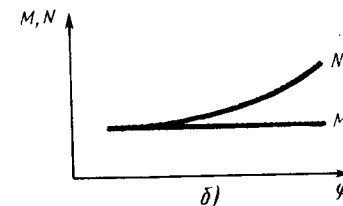
Рис. 56. Фотография восстановленного изображения



а)

Рис. 57. Нелинейные искажения объекта:

а – фотокадры изображения самолета; б – графическая зависимость искажений вдоль оси x (N) и оси y (M)



описано в первой главе на примере дифракционной решетки. Там было показано, что она дает нулевой, первый, второй и т. д. порядки максимумов. Аналогичная картина и здесь, поскольку бинарная голограмма до некоторой степени напоминает дифракционную решетку.

Еще один эксперимент показан на рис. 57. Его результаты показывают третий вид неточности – неперпендикулярность плоскости голограммы относительно оси светового потока. Это приводит к нелинейным искажениям восстановленного изображения. Порядок чередования кадров на рисунке слева – направо. На первом и втором кадрах нелинейные искажения еще не заметны, а уже на третьем и далее видно, что объект вытягивается по оси Ox , оставаясь неизменным по оси Oy . Графические зависимости этих искажений даны для каждого кадра рядом.

Хорошо видно, как меняется характер коэффициента искажения k_1 и k_2 объекта в зависимости от угла ψ_2 между плоскостью, перпендикулярной к оптической оси установки, и плоскостью голограммы. Видно, что при угле в 30° один из размеров объекта становится вдвое больше первоначального.

2.9. ВОЗМОЖНОСТИ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ

К настоящему времени наметились самые различные направления применения цифровой голографии. Первое из них, конечно, – использование ЭВМ для детального изучения процесса формирования голограмм, для численного анализа возникающих при этом эффектов, исследования влияния различных факторов на структуру голограммы и качество восстанавливаемого изображения. В такой постановке цифровая голография выступает как новый метод исследования голографического процесса на основе использования для этой цели ЭВМ. Вариант структурной схемы цифрового моделирования голографического коррелятора показан на рис. 58. Она представляет собой цепь укрупненных функциональных блоков

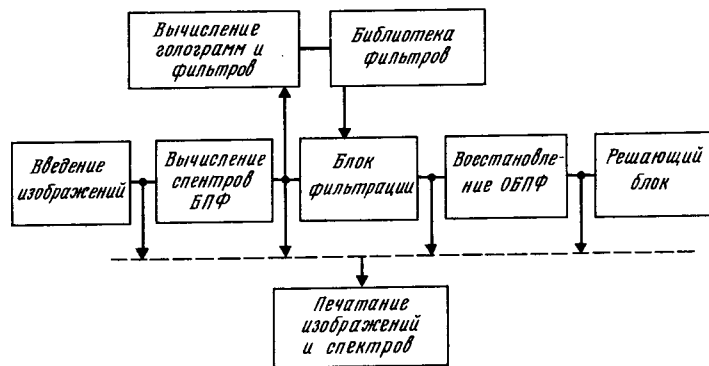


Рис. 58. Структурная схема моделирования коррелятора

процесса, каждый из которых выполняет определенную стадию преобразования двумерной информации, содержащейся в анализируемом поле. Блок введения изображения в ЭВМ дискретизирует изображение и преобразует каждый отсчет в цифровую форму. Степень дискретизации и квантования зависит от технических параметров устройства введения и определяет разрешающую способность изображения, представленного в цифровой форме, а значит, и точность его представления.

Следующий блок переводит изображение из предметной плоскости в плоскость пространственных частот с помощью вычисления двумерного комплексного пространственно-частотного спектра изображения. Этот же блок вычисляет составляющие комплексного спектра: амплитудную, фазовую и др.

Блоки вычисления голограмм и библиотечный служат для получения цифровых голограмм, фильтров и накопления их на магнитной ленте или дисках. Блоки фильтрации и восстановления моделируют процессы взаимодействия когерентного излучения с комплексным фильтром, восстановления изображения и принятия решения. Решающий блок служит для выдачи на блок печатания двумерного оптического сигнала с выхода каждого из блоков модели.

Такая модель позволяет исследовать голографическую систему во всех ее наиболее важных узлах. Кроме того, она позволяет расширить круг исследуемых устройств, включая оптические и неоптические устройства, изучить процессы, в основе которых лежит классический и обобщенный гармонический анализ двумерных сигналов. Модель позволяет реализовать получение цифровых голограмм, а также различных цифровых фильтров и их накопление, исследование процессов голографической фильтрации и распознавания объектов "жесткой" формы, изучение микроструктуры голограмм, сравнение фильтрующих свойств различных фильтров на одном и том же входном материале, сравнение различных решающих правил, исследование процесса формирования корреляционного максимума при различных мешаю-

щих факторах (смещение фильтра, масштабный фактор, помехи и др.), исследование методов фильтрации и распознавания изображений на основе их обобщенного гармонического анализа (с помощью функций Уолша, матриц Адамара, преобразований Радемахера и др.), исследование влияния отдельных гармонических составляющих на характер восстановленного изображения.

На схеме видно, что многие из блоков связаны с блоком выведения информации, т. е. выходной сигнал этих блоков может быть выведен на блок печатания для анализа информации.

Цифровая голография как метод реализации голографического процесса с помощью ЭВМ стала возможной благодаря наличию детально разработанного математического аппарата, адекватно описывающего волновое поле при формировании голограммы и восстановления изображения. С этих позиций цифровую голографию можно рассматривать как метод моделирования голографии физической.

Другим важным направлением применения цифровой голографии является моделирование корреляционных систем распознавания. Принцип их работы основан на использовании схемы Ван дер Люгта. Эта система предполагает установку опознаваемого объекта в фокусе оптической системы голографического фильтра. Если на вход оптической системы подать изображение объекта, то в фокусе возникнет фурье-образ. При совпадении фурье-образа, предъявляемого к опознанию, и фурье-образа, записанного в виде голографического фильтра, установленная на таком же фокусном расстоянии другая оптическая система реализует свертку двух образов.

При их идентичности степень корреляции очень высока и возникает отклик системы в виде δ -функции, свидетельствующей о факте опознания. Положению δ -функции на корреляционном поле соответствуют координаты опознаваемого объекта на анализируемом поле. Таким системам распознавания посвящен ряд монографий; созданы бортовые приборы, используемые для опознавания наземных объектов. Эту систему можно смоделировать по схеме, рассмотренной в этом параграфе. Блок фильтров выполняет свертку двух образов, а блок восстановления играет роль оптической системы обратного преобразования Фурье. Выходной блок служит оптической матрицей с чувствительными элементами, которые обнаруживают δ -функцию и выдают ее координаты.

Третье направление применения цифровой голографии – изучение методов синтеза голограмм для визуализации информации в радиовидении, звуковидении, в практике измерения характеристик антенн с синтезированной апертурой.

3.1. ПЕРСТЕНЬ ЛЬВА ТОЛСТОГО

На Кропоткинской улице в Москве расположен деревянный особняк – музей Льва Николаевича Толстого. Этому музею уже 75 лет. А начинался он с выставки, приуроченной к первой годовщине со дня смерти великого писателя. Мысль о создании постоянно действующего музея поддержали Репин, Горький, Бунин, Станиславский и другие видные деятели культуры. Коллекцию музея составляют более 420 экспонатов. Сюда входят собрания рукописей писателя, изобразительных, мемориальных и книжных фондов, 64 архива родных Толстого и людей, близко знавших его. В музее имеется и художественная коллекция, содержащая галерею прижизненных портретов Толстого от самого первого его изображения еще в студенческую пору до последнего, созданного художником В. Мешковым незадолго до смерти писателя.

Очень большую роль в пополнении фондов музея сыграла внучка писателя Т. Толстая-Альбертини, проживающая в Италии. У нее сохранилось много рукописей, вещей и материалов, имеющих отношение к великому писателю. Этим она щедро поделилась со своей Родиной. Она прислала в Москву более 2000 писем писателей и деятелей искусства Запада к ее матери, – Татьяне Львовне. Из Рима был получен и ряд других ценных реликвий, среди них перстень "Анна Каренина", подаренный жене Л. Н. Толстого Софье Андреевне за переписку известного романа, и браслет, принадлежащий матери Толстого – Волконской.

Почему же в книге о голографии мы рассказываем об этом перстне? Дело в том, что ценность этой реликвии настолько значительна, конечно не по фактической стоимости, что дирекция музея не решилась выставить ее в зале, через который в год проходит более 200 тыс. человек.

По просьбе дирекции музея была изготовлена голограмма этой реликвии, которую поместили в удобном для обозрения месте. Голограмма сделана по методу Денисюка, она восстанавливается в белом свете. Посетители могут обойти стенд с перстнем и внимательно рассмотреть его со всех сторон. Голограмма дает высококачественное восстановленное изображение перстня, камни на нем имеют сильно выжатые блики. Иллюзия объемности полная.

Если раньше этот перстень могли видеть только родственники и близкие семьи Толстых, то голография сделала возможным показать объемное и цветное изображение уникальной реликвии огромному числу поклонников таланта Л. Н. Толстого, для которых дороги даже незначительные подробности жизни великого писателя.

На состоявшейся в Риге в 1985 г. пятой Всесоюзной конференции по голографии был представлен доклад на тему "Технические средства голографического кинематографа". Авторы доклада – восемь человек, работающие под руководством В. Г. Комара. Как было сказано в докладе, в основу разработки голографического кинематографа положены принципы, экспериментально проверенные еще в 1976 г. В соответствии с ними сцену при съемке освещают короткими импульсами излучения трехцветного лазера, следующими синхронно с частотой смены кадров, и изображение регистрируется на движущейся пленке в виде последовательности голограмм. Для того чтобы ослабить требования к источникам света на стадии проекции фильма, изображение сцены фокусируют на поверхность пленки с помощью объектива с большим диаметром входного отверстия. Проекция объемного изображения выполняется так.

При проекции пленку с кадрами-голограммами восстанавливали трехцветным излучением газоразрядной лампы и восстановленное объемное изображение проецировали через тот же объектив на специальный экран. Основная особенность системы проекции связана с экраном. Он не диффузный, как обычно, а представляет собой очень большой голографический элемент, действующий подобно множеству вогнутых зеркал, каждое из которых проецирует изображение объектива проекционного аппарата на одного из зрителей, сидящих в зале. Через "окно" зритель и видит объемное изображение сцены.

Экспериментально была доказана возможность получения трехмерного цветного голографического киноизображения высокого качества по резкости, ее глубине, зернистости, контрастности, цветопередаче. Проекция цветного мультипликационного фильма была выполнена на отражательный голографический экран шириной 1 м и высотой 0,8 м, составленный из двух сложенных вместе пластин – голограмм (отдельно для красного и зеленого излучения). Экран имел две зрительные зоны диаметром около 200 мм.

Впоследствии совместно с киностудией "Мосфильм" был снят экспериментальный цветовой голографический фильм длительностью 10 мин. Его проецировали на экран шириной до 2,5 м, рассчитанный на 24 зрителя. Этот вариант использовал три цветовых составляющих – красную, зеленую и синюю.

Наибольшие технические трудности возникают при создании импульсных лазеров красного, синего и зеленого излучений с энергией в несколько джоулей и высокой степенью когерентности, при создании голографических кинопленок для съемки и размножения фильмов, а также при создании голографических экранов больших размеров. И хотя авторы упомянутого доклада указали, что лазерное излучение в системе голографического кинематографа совершенно безопасно для зрения, так как значение интенсивности излучения на роговице глаза

более чем в 10 раз меньше предельно допустимых значений, это пока подвергают сомнению.

В статье "Голография и ее перспективы", например, отмечено, что "объемный кинематограф, основанный на непосредственной регистрации голограмм сцены действия, практически не имеет шансов на широкое применение в качестве массового зрелища: очевидно, что лазерная подсветка неблагоприятно скажется на здоровье артистов, и, кроме того, в этом случае полностью исключается возможность съемки натуральных сцен, например, стадиона, ландшафта и т. п."

Высказано мнение, что профессиональный кинематограф будет развиваться в другом направлении. Действие будут регистрировать методами обычной фотографии через линзовый растр – периодическую систему объективов, каждый из которых формирует свое изображение сцены. Голография будет использована только для того, чтобы записать систему таких изображений в компактном виде на кинопленку. При этом поскольку изображения, созданные различными объективами растра, мало отличаются одно от другого, для записи информации, содержащейся в этих изображениях, потребуется не очень большая площадь кадра. На основе этой информации будет синтезировано объемное изображение, проецируемое на большой экран, подобный описанному.

Еще большие трудности возникают при разработке голографического телевидения. Принципы построения такой системы ясны из рассмотрения рис. 59. Передаваемую сцену освещают либо одним, либо несколькими взаимно когерентными лазерами. Свет, отраженный от объекта, совместно с опорным лучом попадает на анализирующее устройство голографической телевизионной камеры К, которая картину интерференции световых потоков преобразует в последовательность электрических сигналов. Эти сигналы затем передают, как и обычно, по каналу связи (передатчик П – приемник Пр).

На экране приемного устройства возникает голограмма, которая при освещении ее лучом лазера восстанавливает передаваемый сюжет.

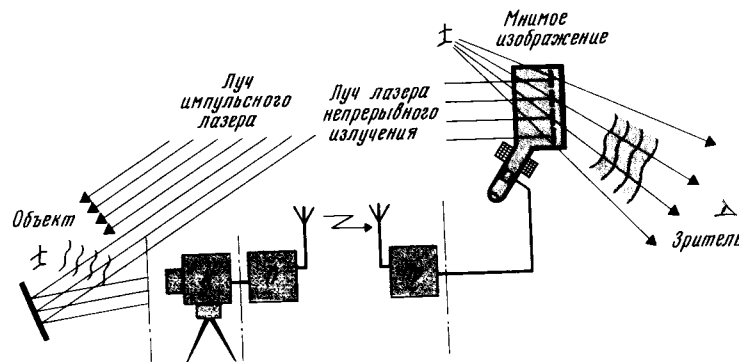


Рис. 59. Структурная схема голографической телевизионной системы

Ранее было показано, что для формирования интерференционной картины необходимо выполнить требование временной и пространственной когерентности для опорного и объектного лучей. Единственно возможный способ реализации этого условия – освещение объекта источником когерентного света. Поэтому система не подходит для передачи сцен большой протяженности, самосветящихся объектов или освещенных естественным (например, солнечным) светом. В связи с этим даже при наличии необходимых источников когерентного излучения организация внестудийной работы голографических систем воспроизведения становится проблематичной. Кроме того, современные телевизионные системы воспроизведения обладают разрешающей способностью практически в 100 раз меньше расчетной, следовательно, необходимо ее увеличение. Это очень сложная задача. И если для ряда частных случаев не возникает существенных трудностей, то в общем случае для передачи голограмм реальных объектов требуется ширина полосы пропускания во много раз больше стандартной, равной 6,5 МГц.

К тому же система предъявляет еще ряд дополнительных требований к передающим трубкам. Во-первых, их разрешающая способность должна быть чрезвычайно высокой. Во-вторых, время фиксирования голографической информации должно быть меньше 8 нс, время ее запоминания (удержания) около 40 мс, время стирания – меньше длительности обратного хода луча при смене кадров. В-третьих, светочувствительные материалы трубок должны выдерживать такое же число циклов запись – запоминание – стирание, как в существующих передающих трубках.

Устройства воспроизведения телевизионного изображения подразделяют на два вида. У первых – функция модуляции светового потока объединена с функцией излучения, а у вторых – осуществляется модуляция независимого источника излучения.

Дифракционный принцип восстановления изображения в голографии предполагает использование независимого источника света. Поэтому устройства первого вида неприемлемы для построения голографической телевизионной системы.

Устройства второго вида получили общее название – проекционные. К основным их элементам относят световой модулятор, создающий несветящееся телевизионное изображение, независимый источник света высокой интенсивности, проекционный объектив и светорассеивающий экран, на который проектируется изображение,

Модуляция света независимого источника – характерный принцип воспроизведения голографического изображения. В основу работы могут быть положены разные принципы, например, изменение оптической плотности светопропускающего элемента или явление поляризации света. Известны также дифракционные и растровые оптические системы модуляторов. Из этих групп для голографического воспроизведения могут быть использованы только системы с изменением оптической плотности и растровые.

Наиболее известным модулятором первого вида является электронно-лучевая трубка с темновой записью, получившая название "скиатрон". Однако этот модулятор не подходит для голографии, так как пленка поликристалла диффузно рассеивает свет. Из растровых модуляторов известен так называемый "Эйдофор". В нем под действием электронного луча создается скрытое изображение на оптически однородном материале либо в виде местных изменений коэффициента преломления этого материала, либо соответствующей деформации его поверхности. Визуализируют изображение с помощью растровой системы.

Схема устройства для восстановления световой волны модулятором системы Эйдофор показана на рис. 60. Вместо растровой системы (зеркальной диафрагмы) необходимо установить полупрозрачное зеркало, которое позволяет падать на модулятор, восстанавливающий лазерный световой поток. Дифракция на рельефе светомодулятора, представляющая собой скрытую структуру переданной голограммы, приведет к восстановлению действительного и мнимого волновых фронтов. Поскольку светомодулятор "Эйдофор" — это вогнутое зеркало с нанесенным на него слоем масла толщиной 0,05 мм, восстановленные световые волны сфокусируются в некоторой фокальной области. Если поместить в эту область экран, то на нем будет можно увидеть соответствующие изображения. Параллельный восстановленный поток будет наблюдаться в виде яркой точки между изображениями.

Таким образом, возможность использования современных телевизионных систем для воспроизведения голографического изображения определяется их реальной разрешающей способностью. Наибольшие возможности имеет система проекционного телевидения "Эйдофор" и метод пересъемки голограммы с экрана кинескопа. Однако и в том и в другом случае максимальная пространственная частота сформированной в приемнике голограммы практически остается в несколько десятков раз меньше, чем соответствующая ей пространственная частота исходного голографического поля для нормальных углов зрения.

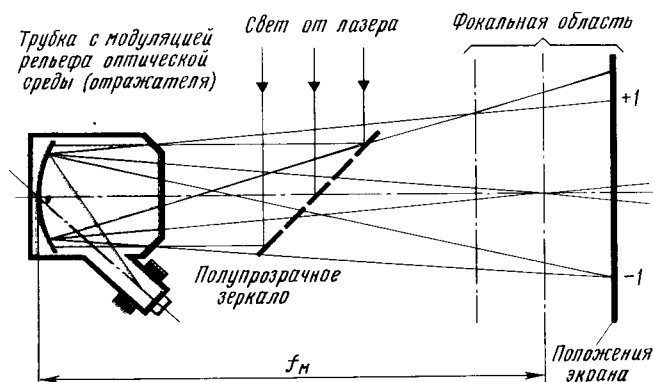


Рис. 60. Схема устройства для восстановления световой волны модулятором "Эйдофор"

Следующим этапом в развитии телевидения очевидно будет реализация стереоцветного телевидения, которое позволит зрителю наблюдать многоцветное и объемное изображение предметов и дать возможность ощущать их взаимное расположение в пространстве. Объемное изображение можно будет наблюдать без специальных очков с разных ракурсов, смещаясь относительно плоскости экрана в большой зоне пространства. При использовании голографических методов кодирования и декодирования передаваемых сообщений эффект оглядывания станет плавным, а воспроизводимое изображение будет точной оптической копией объекта. Верность передачи цветовых, яркостных и пространственных параметров деталей объекта в этом случае будет наивысшей. Очевидно, можно предположить, что будущее телевидения — это голографическое телевидение. Однако на пути его создания еще стоят большие трудности.

3.3. ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ПАМЯТЬ

Важной областью применения голографии стала вычислительная техника. Известно, что производительность ЭВМ в значительной степени зависит от характеристик памяти, реализующей запись, хранение и выдачу информации. В современных ЭВМ память имеет многоуровневую иерархическую структуру. В состав системы памяти входят несколько разнотипных запоминающих устройств, которые обладают различными быстродействием и емкостью. Наиболее быстродействующие запоминающие устройства обладают наименьшей емкостью и наибольшей стоимостью. Другие устройства, в которых хранится основная доля информации, отличаются малым быстродействием. Разница в быстродействии и стоимости между этими устройствами очень велика. Идеальным запоминающим устройством было бы такое, которое обладало бы большой емкостью и малой удельной стоимостью при высоком быстродействии, высокой надежности и малых габаритных размерах. Таких устройств до последнего времени не было.

Среди новых физических принципов, исследованных сравнительно недавно для решения проблемы памяти будущих ЭВМ, наиболее широкие перспективы открывают голографические методы. Они позволяют надеяться на создание элементов с высокой плотностью записи информации (до 10^7 бит/см²), большой избыточностью записи, гарантирующей высокую помехоустойчивость и надежность хранения, возможностью параллельной записи и чтения страницы информации объемом $10^4 \dots 10^5$ бит. При этом считывание не приводит к разрушению информации.

Страницу информации записывают в виде голограммы, размеры которой равны примерно 1×1 мм. Технически легко реализовать с помощью оптики матрицу из 10^5 пространственно разделенных голограмм на одном плоском носителе. Перевод светового луча с одной голограммы на другую занимает всего одну микросекунду.

Все сказанное относится к записи голограммы на плоском носителе. Но читатель уже знает отличие голограммы Габора от голограммы Денисюка, по методу которого запись интерференционной картины идет и в глубь фотоэмульсионного слоя. Следовательно, в объемной среде можно записать большое число голограмм путем их наложения. Можно организовать их селективное восстановление для считывания информации с нужной голограммы. Расчеты, выполненные некоторыми исследователями, показали, что, используя объемную среду в качестве носителя информации, можно достичь емкости до 10^{12} бит цифровой информации для голографического оперативного запоминающего устройства.

Но ведь голографические методы позволяют записывать, хранить и восстанавливать информацию, записанную в виде волновых полей, картин, пространственных изображений. А это открывает принципиально новые возможности.

Вот к каким выводам приходят исследователи. Голографические оперативные запоминающие устройства в комплексе со сверхбыстродействующим буферным полупроводниковым запоминающим устройством будут способны заменить современные многоуровневые системы памяти. Такие системы позволяют резко повысить производительность и эффективность современных ЭВМ. Кроме того, голографические методы в сочетании с лазерной полупроводниковой техникой и оптическими волоконными элементами позволяют изменить структуру и архитектуру вычислительных систем будущего. Речь, по сути дела, идет о создании оптических вычислительных машин.

Информацию, предназначенную для введения в голографическое запоминающее устройство, разбивают на страницы, и каждую записывают в виде отдельной голограммы. Массив информации хранят в виде матрицы голограмм, записанных на плоский или объемный носитель. Страницу в двоичном коде подготавливают в виде транспаранта подобно рассмотренной ранее бинарной цифровой голограмме. Транспарант называют *входной страницей*. Отверстия, соответствующие двоичной 1, пробивают в узлах регулярной двумерной сетки, наложенной на непрозрачный материал транспаранта. Непрозрачные узлы соответствуют двоичному 0. Узлы сетки называют *информационными точками*. В реальных устройствах входную страницу формирует устройство набора страниц, которое представляет собой пространственный матричный модулятор световой волны с электронным управлением. Именно оно пространственно модулирует проходящую или отраженную световую волну по амплитуде, фазе, поляризации.

Входную страницу, как правило, записывают по системе фурье-голографии, т. е. фиксируют голограмму фурье-образа страницы. Такая запись обладает важными достоинствами. Фурье-образ точечного источника света представляет собой равномерное распределение значений амплитуды света по всей частотной плоскости. Смещение точечного источника в координатной области вызывает только линейный

фазовый сдвиг по частоте. Это означает, что фурье-голограмма обладает большой избыточностью хранения, поскольку информация о каждой точке входной страницы и, следовательно, о каждой двоичной 1 распределяется по всей площади голограммы. Большая избыточность хранения, обеспечивающая высокую надежность хранения и помехозащищенность против локальных дефектов регистрирующей среды, — одно из важнейших достоинств фурье-голограммы.

Поскольку входная страница представляет собой совокупность пространственно разнесенных идентичных отверстий, ее фурье-образ складывается из фурье-образов отдельных информационных точек, которые согласно второму из указанных свойств преобразования Фурье отличаются только фазовыми множителями. Следовательно, фурье-образы всех информационных точек входной страницы подают на один и тот же участок регистрирующей среды, расположенной в фурье-плоскости.

Для записи голограммы страницы информации вполне достаточно площади, требуемой для записи только одного бита с необходимой избыточностью. Следовательно, фурье-голограмму страницы можно записать на участке малых размеров, благодаря чему достигается высокая плотность записи, которая по помехоустойчивости в реальном случае соответствует записи одного бита на всей площади голограммы. Схемы устройств для записи фурье-голограмм были рассмотрены во второй главе. Там же показана и схема устройства для восстановления изображения.

Схема голографического оперативного запоминающего устройства со страничной организацией и с адресуемым лучом показана на рис. 61. В состав устройства входят лазер, дефлектор, матрица гололинз, устройство набора страниц УНС, накопительная среда, матрица фотопроектировщика.

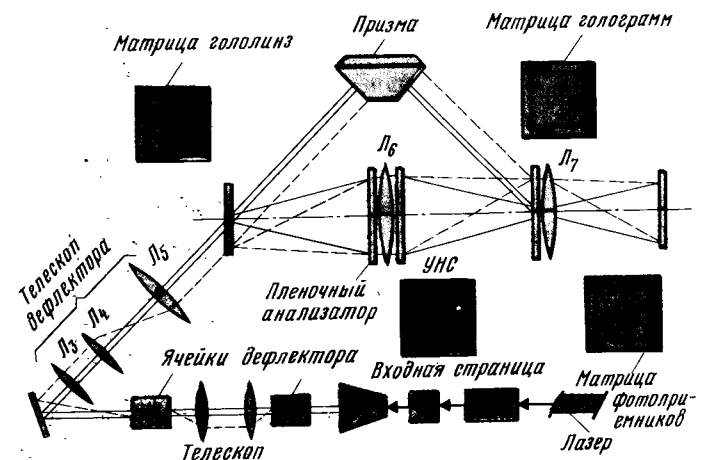


Рис. 61. Оптическая схема голографического оперативного запоминающего устройства со страничной организацией (РП — расширитель пучка; ЭОПП — электрооптический переключатель поляризации; М — модулятор)

приемников и оптические элементы. Лазер генерирует пучок когерентного света, дефлектор, управляемый адресным устройством, обеспечивает быстрое и точное отклонение лазерного луча в любую из позиций на накопительной пластине. Матрица гололинз, которая представляет собой двумерный массив постоянно записанных голограмм, обеспечивает расщепление светового пучка на объектный и опорный. Каждая гололинза предназначена для записи голограммы только на одну-единственную позицию в накопительной среде. Матрица гололинз имеет те же относительные размеры, что и матрица голограмм.

Устройство набора страниц – это двумерная матрица электрически управляемых световых модуляторов. Они обеспечивают формирование входной страницы, иначе говоря, это устройство введения информации. Она формируется буферным запоминающим устройством в виде страниц, а затем по команде центрального процессора переходит в устройство набора страниц. Его можно загружать как последовательно, так и параллельно; оно снабжено также маской случайной фазы.

Голограммы, как правило, komponуют в квадратную матрицу путем записи в узлах регулярной решетки. Матрица фотоприемников преобразует оптическое изображение страницы, восстановленное голограммой, в электрические сигналы и передает их в буферное запоминающее устройство. Фотоматрица имеет столько же приемников, сколько и УНС. Каждый фотоприемник состоит из стандартного фотодиода и триггера. Фотодиод преобразует оптический сигнал в электрический, который изменяет состояние триггера. Благодаря этому фотоматрица обеспечивает запоминание считанной информации. Оптические элементы служат для формирования световых пучков нужной конфигурации.

Линейно поляризованный лазерный пучок, расширенный с помощью расширителя пучка РП до необходимого диаметра, поступает на вход двукоординатного акустооптического дефлектора, который направляет его на нужную гололинзу в соответствии с поступившим адресом позиции для записи. Ячейки дефлектора могут отклонять световой поток лишь в малом угле. Для преобразования малых угловых отклонений пучка в массив коллимированных параллельных пучков применяют специальный телескоп, образованный линзами L_3, L_4, L_5 . Таким образом, на каждую гололинзу падает коллимированный и линейно поляризованный пучок света под одним и тем же, постоянным для устройства, углом.

Часть света, дифрагированная гололинзой в сторону УНС, образует объектный пучок, который проходит через пленочный анализатор и освещает входное отверстие УНС, на котором уже набрана страница информации, предназначенная для записи. Устройство набора страниц пространственно модулирует объектный пучок в соответствии с входной страницей. Модулированный световой пучок записывающая линза L_6 фокусирует в определенном месте накопительной пластины по заданному адресу. В то же самое место после преломления призмой приходит опорный пучок, не дифрагированный на гололинзе.

Оптическая система обеспечивает совпадение объектного и опорного пучков в плоскости регистрации голограммы при адресации пучков на накопительной пластине – матрице голограммы, которая запоминает картину интерференции в виде фурье-голограмм малого размера. Фурье-голограмму входной страницы называют субголограммой. Она представляет собой ячейку голографической памяти, хранящую страницу цифровой информации объемом около 10^4 бит.

Массив страниц на накопленной пластине расположен в виде регулярно размещенных субголограмм. Координаты каждой из них, представляющие адрес соответствующей страницы, фиксирует адресная память. При считывании информации вектор поляризации лазерного пучка поворачивают на нужный угол с помощью электрооптического переключателя поляризации ЭОП и направляют на нужную голограмму. Выбранную голограмму освещает только опорный пучок, поскольку объектный блокирован пленочным анализатором. Мнимое изображение страницы, восстановленное выбранной голограммой, превращается в действительное с помощью линзы L_7 , после чего оно проецируется на матрицу фотоприемников, которая имеет те же относительные размеры, что и УНС.

Фотоматрица детектирует восстановленное изображение и запоминает считанную информацию. Выборку информации из фотоматрицы можно производить как последовательно, так и параллельно обычными декодирующими электронными устройствами. Поскольку при записи голограмм все входные страницы формирует один и тот же УНС, изображения, восстановленные с разных голограмм, детектирует одна и та же фотоматрица.

Таков принцип действия голографического запоминающего устройства. Есть здесь и свои проблемы. Одна из них касается плотности размещения субголограмм. При очень близком расположении голограмм на изображение, восстановленное выбранной голограммой, накладываются другие (посторонние) изображения – это явление уже было рассмотрено ранее. Кроме этого, при записи субголограммы любой входной страницы второй, третий и т. д. порядки ее фурье-образа регистрируются в точках, предназначенных для записи соседних голограмм, понижая тем самым отношение сигнал-шум в восстанавливаемых ими изображениях.

Вместе с тем у голографических запоминающих устройств имеется широкая перспектива в связи с использованием полупроводниковых лазеров, методов динамической голографии, подвижных носителей информации.

Таким образом, мы стоим на пороге появления когерентных оптических систем обработки информации, как цифровой, так и аналоговой. Они позволяют обрабатывать сигналы РЛС с синтезированной апертурой, распознавать образы, проводить спектральный и корреляционный анализ сигналов. Однако порог довольно высок и его не просто перешагнуть.

3.4. РАДИОГОЛОГРАФИЯ

В диапазоне радиоволн так же, как и в оптическом, голографический процесс состоит из двух этапов – записи голограммы и восстановления изображения. Однако здесь используют другие технические средства. Так, например, для регистрации микроволновых голограмм применяют радиочувствительные материалы и радиоприемные устройства.

Схема такого устройства показана на рис. 62. Оно состоит из генератора, делителя мощности, объекта излучения испытуемой излучающей антенны, излучателя опорного сигнала и индикатора радиоголограммы. В качестве радиочувствительных материалов используют пленки жидких кристаллов, тонкие пленки жидкостей, специально обработанные фотоматериалы, фотохромные пленки, люминофоры и др. Оптические свойства этих веществ, такие, как цвет, показатель преломления, плотность почернения (или интенсивность свечения), зависят от температуры и меняются при поглощении радиоизлучения. Оптическая голограмма, необходимая для восстановления изображения в видимом свете, получается при фотографировании поверхности материала в соответствующем масштабе. А ряд материалов позволяет получить изображение и без промежуточной стадии фоторегистрации голограммы.

Возможна регистрация радиоголограмм и с помощью радиоприемных устройств. В этом случае отраженную объектом волну принимают специальным зондом (антенной) и фиксируют индикатором голограммы. Применяют один из двух способов формирования опорной волны. Первый аналогичен оптическому, второй – предполагает искусственное формирование, которое создается в тракте зонда. Опорное поле имитирует изменение фазы опорного сигнала. При непрерывном изменении фазы опорного сигнала образуется голограмма, по свойствам аналогичная голограмме с естественным формированием опорной волны в пространстве.

Для регистрации радиоголограмм используют как системы с одиночной сканирующей антенной, так и многоэлементные системы. В одно-

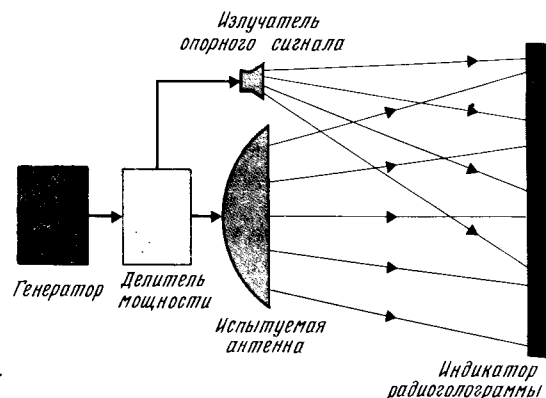


Рис. 62. Схема радиоголографического устройства

канальных системах усиленный выходной сигнал детектора управляет яркостью свечения источника света, перемещающегося синхронно с зондом. Источником света может служить лампа или пятно на экране электронно-лучевой трубки. Источник света фотографируют на неподвижную пленку, которая и представляет собой собственно радиоголограмму.

Многоэлементные системы строят по параллельной или последовательной схеме, и, конечно же, они обеспечивают более быстрое получение голограммы, чем одноканальные.

Восстанавливают изображения с радиоголограмм специальной оптической системой или же с помощью ЭВМ. Разумеется, для обработки на ЭВМ сигнал должен быть записан на соответствующем носителе – магнитной ленте или диске. Таким образом, одинаковая природа световых и радиоволн дает возможность получения видимых голографических изображений объектов.

Один из методов формирования изображений называют квазиоптическим. Радиоволны, отраженные от объекта, фокусируют на матрице датчиков в виде его уменьшенного радиоизображения. Выходные сигналы датчиков пропорциональны интенсивности поля, облучающего датчики. Сигналы усиливают и подают на индикатор, который воспроизводит изображение, сфокусированное на матрице. Каждому датчику соответствует определенная точка на экране индикатора, причем освещенность ее зависит от уровня сигнала на выходе датчика. Таким образом, радиоизображение трансформируется в оптическое.

Практика показала, что квазиоптический метод пригоден только для миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов радиоволн. Но использование этих волн связано с большим затуханием их в атмосфере. Поэтому желательно получать изображение в более длинноволновом диапазоне. Однако здесь из-за ограниченных размеров приемных антенн их разрешающая способность оказывается недостаточной для получения изображения требуемого качества. Нужны или очень большие антенны, или какой-то новый метод, увеличивающий разрешающую способность.

Такой метод был предложен в 60-х годах. Его стали называть методом синтезированной апертуры антенны. И уже в 80-х годах антенны с синтезированной апертурой использовали при локации поверхности Венеры для получения рельефа ее поверхности. Передающее устройство РЛС, установленной на борту летательного аппарата, излучает когерентные зондирующие сигналы в направлении, перпендикулярном траектории полета. Отраженные от объекта сигналы приемное устройство фиксирует в равноотстоящих одна от другой точках траектории и запоминает. Совокупность сигналов, принятых на значительном отрезке траектории движения летательного аппарата, суммируют с учетом их амплитуды и фазы аналогично тому, как это делается в фазированных решетках. В результате такой обработки сигналов разре-

шающая способность определяется не размерами приемной антенны, а протяженностью рабочего участка траектории.

Протяженность этого участка определяет величину синтезированной аппаратуры антенны и разрешающую способность РЛС бокового обзора. Потенциально достижимая разрешающая способность равна половине длины волны излучения, которым облучается объект. Метод синтеза апертуры антенны является частным случаем обработки информации, используемым в голографии. Этим термином называют способы регистрации информации о параметрах полей, рассеянных объектами, на плоскостных или объемных индикаторах-голограммах. Облучая голограммы светом, возможно получать объемные изображения.

Отличительной особенностью голографии является то, что на голограммах регистрируется не непосредственное изображение объекта, как в фотографии, а преобразование Фурье или Френеля функции рассеяния, определяющей структуру его изображения. Эта особенность и используется в радиоголографии. По отраженным от объектов радиосигналам, принятым в различных точках пространства в различные моменты, можно формировать голограммы с синтезированными апертурами, размеры которых во много раз превосходят размеры используемых антенн. По голограммам получают видимые изображения объектов с весьма высокой разрешающей способностью.

Первые экспериментальные работы по формированию радиоголограмм и восстановлению по ним изображения голографируемых объектов были выполнены Р. Дули в 1965 г. и Д. Дуффи в 1966 г. Они использовали системы, аналогичные используемым в оптической голографии. Поэтому такие голограммы стали называть *квазиоптическими*. С таких голограмм, полученных в сантиметровом диапазоне волн, было получено видимое изображение объектов, однако качество его не было высоким из-за малых размеров радиоголограмм, определяющих разрешающую способность. Изображение, восстанавливаемое по радиоголограммам с синтезированными апертурами, имеет более высокое качество.

Методы радиоголографии открывают новые возможности эффективного решения задач радиолокации, радиофизики, антенной техники, связанных с преобразованием электромагнитных полей. Самое важное из них – это восстановление волнового поля в одной области пространства по известному или измеренному полю в другой области. Это аналогично проблеме моделирования электромагнитных полей, проблеме определения рассеянных полей и восстановления по ним изображений объектов.

Наиболее актуальной задачей является задача измерения поля антенны в ближней зоне и последующего восстановления ее поля в дальней зоне. Это необходимо для определения диаграммы направленности антенны. Сейчас наметились тенденции увеличения размеров излучающих поверхностей и укорочения длины волны. Поэтому традиционные методы измерения параметров поля, создаваемого антенной в

дальней зоне, встречают серьезные трудности. Одним из путей их преодоления является измерение в ближней зоне и переход к дальней путем оптической и машинной обработки полученных результатов с использованием принципов голографии.

Поле излучения или рассеяния можно смоделировать, когда известно распределение поля источников и расположение предметов, влияющих на него. Требования точного моделирования весьма жестки. Проблема особенно усложняется при переходе к эффективному оптическому моделированию, обладающему такими достоинствами, как быстрое определение пространственных характеристик моделируемых систем, наличие средств, позволяющих управлять амплитудой и фазой световой волны, простота и компактность оптических установок.

Именно поэтому вопросы немасштабного моделирования микроволновых устройств в оптическом диапазоне являются ключевыми при решении всей проблемы оптического моделирования. Немасштабное моделирование особенно привлекательно для исследования антенных устройств, поскольку оно позволяет исследовать структуру диаграммы направленности, выяснить, как меняется коэффициент рассеяния, возможно ли уменьшить боковое излучение в заданном телесном угле. Оно позволяет сравнительно просто, особенно для плоского раскрытия, определить его наиболее благоприятную конфигурацию, форму его контура, расположение и форму дискретных излучателей для получения оптимальной формы диаграммы направленности.

Этот же метод используют для исследования характеристик рассеяния волн различными предметами. Модулируемой характеристикой здесь является диаграмма рассеяния объектов, которые могут быть облучены с различных направлений. Весьма важная характеристика таких объектов – эффективная площадь рассеяния (площадь цели). Она входит в расчет дальности действия радиолокатора и позволяет определить многие тактико-технические параметры локатора – энергию импульса, его длительность, зону обзора и др.

Оптическое моделирование позволяет также проводить моделирование излучающих и рассеивающих устройств. Одна их схем установ-

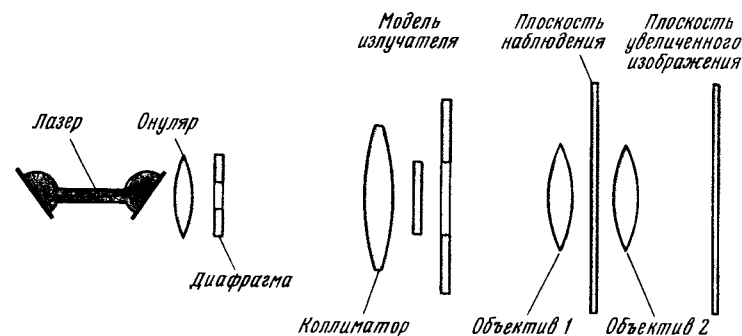


Рис. 63. Схема оптического моделирования плоских излучателей

ки, предназначенной для оптического моделирования плоских излучателей, изображена на рис. 63. Источником света служит лазер. Его световой пучок диаметром в несколько миллиметров с помощью телескопической системы, состоящей из объектива, диафрагмы и коллиматора, преобразуют в пучок с большим поперечным сечением, достаточным для облучения модели. Облучающая волна должна быть плоской, но ее фронт может отличаться от плоского, поскольку среда рассеивает лазерное излучение и, кроме того, сказывается влияние аберрации линзы. Чтобы уменьшить это влияние, в фокус телескопической системы линз помещают диафрагму с микроотверстием, выполняющим роль фильтра пространственных частот. Диаметр отверстия выбирают равным диаметру центральной части фокального пятна окуляра. Распределение светового поля, соответствующее полю моделируемого объекта (например, антенны), измеряют в плоскости наблюдения. Если это распределение имеет слишком мелкую структуру, то в установку вводят еще один объектив, создающий увеличенное изображение поля. В большинстве случаев задача моделирования состоит в определении параметров антенны в дальней зоне, для чего плоскость измерения наблюдения должна находиться в фокальной плоскости объектива 1.

Для обнаружения дефектов антенны используют метод голографической интерферометрии. Его суть в том, что на одной и той же голограмме последовательно записывают поле образцовой и испытуемой антенн. Результирующую интерференционную картину определяет различие фаз волн, излучаемых антеннами. При восстановлении получается изображение антенны (обтекателя, элемента антенны), покрытое полосами. По конфигурации полос и их расположению судят о различии характеристик образцового и испытуемого объектов. Возможна и численная оценка в этом методе — в миллиметровом диапазоне он позволяет обнаруживать фазовые неоднородности меньше 0,1 л.

В ноябре 1985 г. в Риге на пятой Всесоюзной конференции по голографии группа авторов представила доклад на тему "Экспериментальное исследование радиоголографического метода воспроизведения волновых полей". В нем были рассмотрены результаты исследования одного из вариантов реализации метода, в основе которого лежит синтезирование радиоголограмм с помощью ортогональных линейных антенных решеток в условиях открытой площадки без применения специальных мер по устранению посторонних отражений. Установка для синтеза обеспечивала получение в трехсантиметровом диапазоне волн радиоголограмм Френеля с апертурой $6 \times 12 \text{ м}^2$ при расстоянии до объекта голографирования около 30 м. Время синтеза одной голограммы, содержащей 128×256 отсчетов, было равно 2 с. Радиоголограммы регистрировали в аналоговом виде для одной из квадратурных компонент путем фотографирования изображения с экрана электронно-лучевой трубки или в дискретно квантованном виде в комплексной форме посредством быстродействующей цифровой системы. Для обеспечения необходимой точности юстировки и синтезируемой апертуры и определения параметров системы и алгоритмов обра-

ботки радиоголограмм была проведена геодезическая съемка расположения антенных решеток и условного центра объекта голографирования с точностью до 1 см. При выполнении этой работы большое внимание было уделено точности регистрации радиоголограмм. Для определения статистических характеристик точности был применен метод многократных измерений фиксированного поля с последующей обработкой информации методами математической статистики.

Результаты обработки показали, что главный вклад в искажения зарегистрированных голограмм вносят фазовые флуктуации принимаемого сигнала и белый шум приемника. Часть помех была вызвана механическими колебаниями опоры под объектом голографирования и колебаниями антенной системы. Восстанавливали изображение посредством когерентно-оптической и цифровой обработки, при этом были выявлены все достоинства обоих способов.

Эффективность исследуемого метода оценивали путем анализа качества восстановленных радиоизображений объектов голографирования, что позволило сделать вывод о правильности передачи пространственной структуры и достаточной для практики контрастности по отношению к сопутствующему фону, о возможности определять границы классов объектов.

В другом докладе были представлены результаты работы по распознаванию объектов с помощью голографического процесса. Был подвергнут критике метод распознавания, использующий физические параметры объекта, получаемые с помощью специальной обработки отраженных сигналов. Возможности этого метода, как показал автор, ограничены, поскольку функциональные связи между объектом и параметрами отраженного сигнала весьма сложны. Было предложено использовать для опознавания параметры радиоголограмм.

Большой класс рассеивающих объектов может быть представлен в виде совокупности отдельных центров рассеяния и описан локальными характеристиками рассеяния. Реконструкция изображения, сводящаяся обычно к преобразованию Фурье, позволяет определить эффективную поверхность рассеяния и расположение отдельных центров рассеяния на поверхности объекта, т. е. оценить его конфигурацию и размеры. Каждый центр рассеяния характеризуется модулями элементов поляризационной матрицы рассеяния, т. е. четырьмя значениями эффективной поверхности рассеяния: площадью поверхности, индексом поляризации и значением, определяющим положение центра на изображении. Эти величины было предложено использовать в качестве признаков распознавания. Были представлены экспериментальные результаты по распознаванию объектов простейших геометрических форм по их изображениям, полученным методом радиоголографии Фурье в условиях безэховой камеры. Показана высокая эффективность предложенного метода распознавания.

Развитие теории голографии, методов цифровой голографии и возможность широкого применения голографических методов для решения ряда практических задач обусловили значительный интерес инженеров и научных работников к этой науке и ее приложениям. Особую роль играют методы голографии в теории и практике автоматического опознавания образов. Они позволяют простыми средствами решать трудные задачи по созданию опознающих автоматов, например, такие, как реализация параллельного анализа больших массивов информации и обеспечение большого объема памяти. Первые работы в области голографического опознавания принадлежат В. Льюдту и Д. Габору. Эти публикации привлекли внимание практиков, поскольку многие задачи обработки информации и автоматического управления в кибернетике связаны с опознаванием образов. Это информационный поиск, техническая и медицинская диагностики, автоматизация научных исследований, навигация и т. п. Наибольшей общностью обладают задачи, связанные с анализом зрительных образов.

Оптическая обработка информации и голография позволяют параллельно анализировать входные сигналы так, что анализируемый образ вызывает отклик в виде другого образа. Эта исключительная возможность наряду с распределенным характером голографической записи и возможностью хранения большого числа образцов опознаваемых образов в малом объеме запоминающей среды лежит в основе распространенной гипотезы о голографической природе ассоциативной памяти мозга.

Рассмотренные нами в двух первых главах фурье-голограммы, полученные как физическим путем, так и путем синтеза, имеют важное значение для решения проблемы опознавания образов, поскольку эти голограммы представляют собой пространственный фильтр. Его можно корректировать в процессе создания, причем в направлении повышения надежности опознавания. Особенно удобно корректировать такой фильтр с помощью ЭВМ.

Принцип работы системы с использованием оптимального фильтра понятен из рассмотрения рис. 64. На нем изображены три линзы L_0 , L_1 , L_2 , источник излучения S и три плоскости Π_1 , Π_2 и Π_3 — последние две называются входной и выходной плоскостями фильтра. Объект O , расположенный в плоскости Π_1 , изображается на плоскости Π_3 оптически без изменения масштаба. Если в плоскости Π_2 поместить соответствующий пространственный фильтр, то можно селективно отфильтровать любые пространственные частоты изображения O_1 . Поскольку свет источника когерентный, фильтр должен быть амплитудно-фазовым, т. е. комплексным. Фильтрация сводится к корреляции между неизвестным и известным объектами. При их соответствии на выходной плоскости появляется корреляционный отклик — всплеск яркости. Легко убедиться, что комплексный фильтр аналогичен голограмме Фурье.

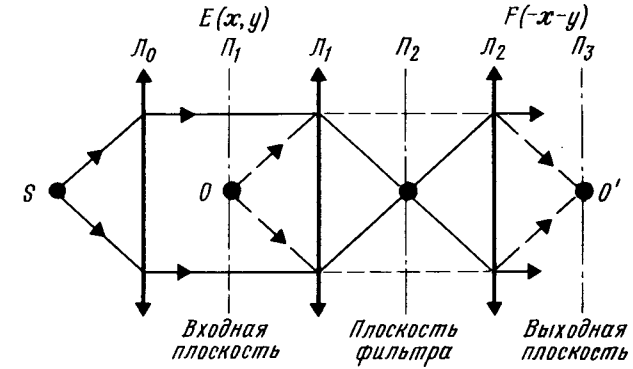


Рис. 64. Схема, поясняющая принцип оптимальной фильтрации

Вот как можно представить себе, пользуясь понятиями из теории фильтрации, процесс анализа двумерного сигнала, каковым является изображение. Пусть имеется сложное изображение, заданное на прямоугольном поле. Это изображение содержит множество отдельных элементов, среди которых могут находиться изображения объектов, которые нужно опознать и определить их координаты. Например, это может быть набор различных деталей, из которых нужно выделить гайку заданной формы, или страница текста, на которой нужно найти отдельные слова и буквы.

Свяжем с плоскостью поля o прямоугольную систему координат Oxy с началом в центре поля и будем характеризовать изображение искомого объекта функцией $E(x, y)$, которая может быть, например, функцией прозрачности, если изображение нанесено на фотопленку. Эта функция задана на участке, площадь которого значительно меньше площади поля o . Остальную его часть занимают изображения в данном случае посторонние. Они составляют оптический фон, который будем характеризовать функцией $E_\phi(x, y)$. Заметим, что искомое изображение может находиться в любом месте поля и может быть неединственным. Считая функцию фона двумерной, стационарной, случайной, с энергетическим спектром $G(p, q)$, заданным на плоскости пространственных частот, имеем

$$\bar{E}_\phi^2 = \iint_p G(p, q) dp, q,$$

где p — поверхность, по которой производится интегрирование. Пусть световое излучение, исходящее от изображения, проходит через линейную оптическую систему с фильтром, на выходе которого вновь формируется изображение. При увеличении системы, равном единице, и при передаточной функции фильтра $H(p, q)$ функция искомого изображения в выходной плоскости будет иметь вид

$$F(x, y) = \int \int_{\rho} H(p, q) S(p, q) e^{j2\pi(px + qy)} d\rho.$$

Фильтр подбирают таким образом, чтобы максимизировать отношение сигнал-фон по мощности

$$M = \frac{F^2(x, y)}{\bar{F}_{\phi}^2}.$$

Максимальное значение будет в точке (x_0, y_0) , если передаточная функция фильтра равна

$$H(p, q) = \frac{S^*(p, q)}{G(p, q)} e^{-j2\pi(px_0 + qy_0)}.$$

Полученное соотношение позволяет получить оптимальный фильтр применительно к двумерным сигналам (изображениям). Оно показывает, что в общем случае передаточная функция оптимального фильтра — комплексная. Для построения такого фильтра нужно знать спектр $S^*(p, q)$, комплексно-сопряженный заданному, для селекции изображения, и спектральную плотность фона $G(p, q)$. Последний сомножитель определяет место положения максимума в плоскости выходного изображения, которое зависит от выбора координат x_0 и y_0 .

Таким образом, если излучение проходит через комплексный фильтр с описанной передаточной функцией, то в выходной плоскости в точке с координатами центра искомого объекта формируется яркая отметка, которая может быть выделена амплитудным селектором. Оптимальная фильтрация применительно к изображениям может быть реализована в том случае, если удастся изготовить комплексный фильтр пространственных частот с заданной передаточной функцией. Подобным фильтром служит голограмма, которая, как было показано, может быть получена оптически или синтезирована на ЭВМ.

Изготовление голограмм с заданной передаточной функцией представляет собой самостоятельную задачу. Система оптимальной фильтрации и ее работа были смоделированы с помощью комплекса программ, описанных во второй главе. Для моделирования было сформировано на сетке размером 128×128 элементов двоичное изображение "сборочной площадки", на которой в качестве деталей были в беспорядке размещены буквы русского алфавита (эксперимент выполнен Р. И. Эльманом). Положение и ориентация букв были заданы датчиком случайных чисел. Деталь А была принята в качестве искомой. На рис. 65 показано исходное изображение сборочной площадки. Видно, что некоторые объекты перекрывают один другого и визуальное определение искомого довольно затруднительно, а подчас и невозможно. На рис. 66 приведены результаты пространственной фильтрации. Видно, что модель системы уверенно опознала пять объектов и указала их координаты. В одном случае объект оказался неопознанным.

0.

Рис. 65. Изображение сборочной площадки

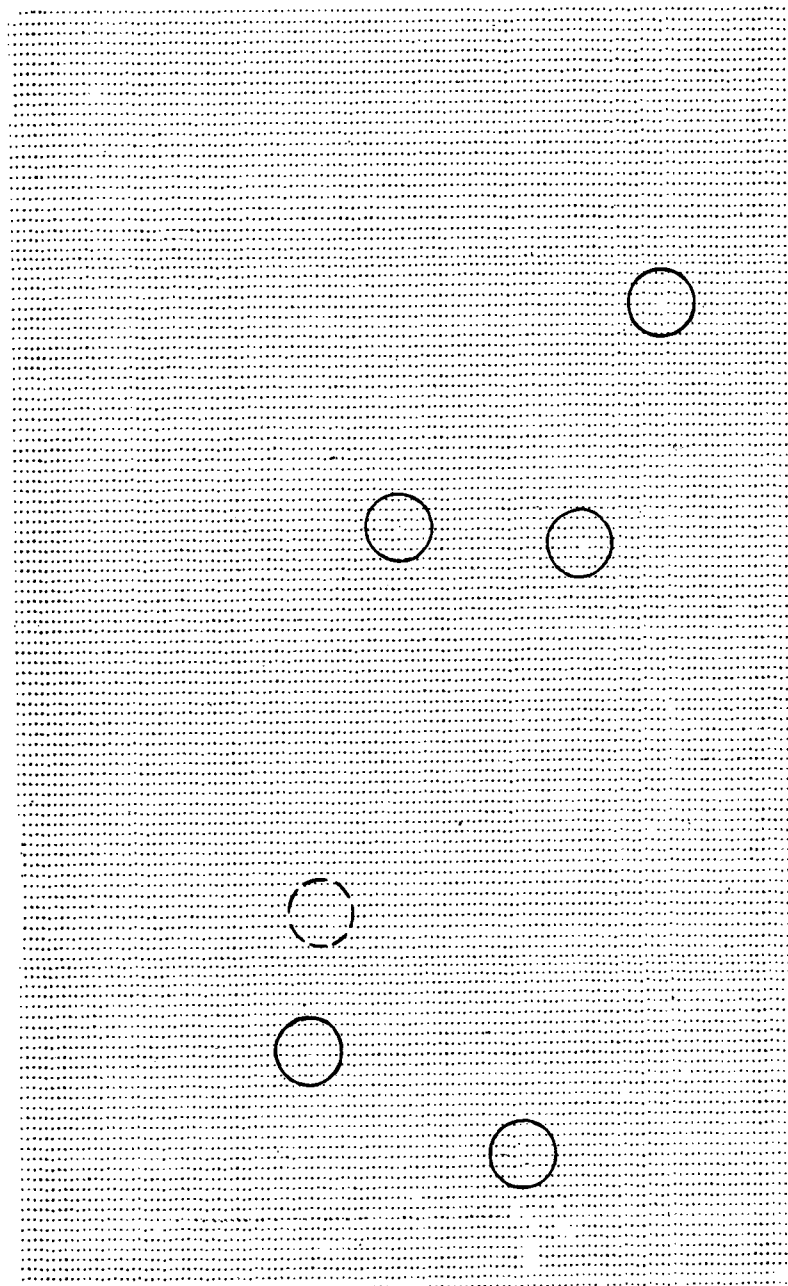


Рис. 66. Результаты пространственной фильтрации

Позже было оценено качество системы опознавания. Ее функциональная схема изображена на рис. 67. Изображение опознаваемого объекта, находящегося слева, строит оптическая система ОС с полупрозрачным зеркалом ПЗ на пространственном модуляторе ПМ, расположенном в луче лазера. В плоскости голографического фильтра ГФ, управляемого блоком настройки, происходит фильтрация промодулированного излучения. Отклик системы – яркостный всплеск, попадая на матрицу фотодиодов, находящуюся в блоке формирователя команд, выдает сигнал о распознавании и координатах опознанного объекта. Этот сигнал поступает в систему управления для принятия решения.

При работе такой системы возможно изменение масштаба и ракурса анализируемого изображения. Кроме того, возможен и поворот изображения относительно оптической оси системы. Это может привести к ошибкам. Представляет интерес оценка возможного значения ошибок. По довольно сложным формулам были рассчитаны на ЭВМ зависимости качества системы распознавания от изменения масштаба, угла поворота изображения и ракурса. Анализ показал, что наиболее критична система к изменению масштабного фактора. Уже незначительное его изменение (в пределах $1 \dots 1,1$) вызывает уменьшение критерия опознавания до 90%. При изменении ракурса от 18 до 30° качество системы меняется всего на $15 \dots 20\%$. Угол поворота в 10° приводит к изменению качества на $20 \dots 80\%$.

Эти эксперименты позволили сформулировать требования к инвариантным системам. Так, было предложено использовать вариофокальные системы и создавать комбинированные фильтры, позволяющие компенсировать угол поворота анализируемого изображения ценой незначительного снижения качества.

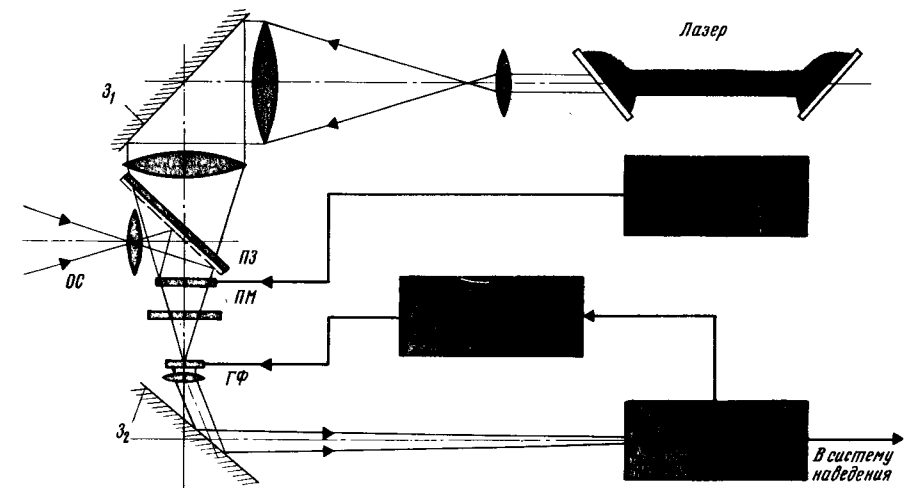


Рис. 67. Функциональная схема опознающей системы

3.6. СИМБИОЗ ФИЗИЧЕСКОЙ И ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ

Одним из авторов этой книги совместно с М. М. Ермолаевым была рассмотрена возможность использования в оптическом корреляторе (рис. 68) фильтров-голограмм, синтезированных на ЭВМ, а также сопоставления результатов корреляционного анализа типовых объектов при работе с синтезированными и физическими голограммами. Совпадение геометрических условий расчета и параметров оптической системы контролировали следующим образом. Синтезированную голограмму устанавливали в плоскости Π_3 . При освещении опорным пучком в плоскости Π_4 наблюдали восстановленное изображение и опорный пучок. Угол между ними должен соответствовать углу между опорным и объектным пучками, принятому при синтезировании голограммы. Изображения объектов-транспарантов изготавливали в таком масштабе, чтобы при установке в плоскости Π_2 они имели в плоскости Π_4 те же размеры, что и изображения, восстановленные синтезированными голограммами.

В плоскости Π_2 устанавливали изображение типового объекта. При этом в плоскости Π_3 формировали его спектр. Здесь же устанавливали синтезированную голограмму. Путем малого перемещения голограммы добивались совпадения двумерных спектров анализируемого и образцового изображений. Степень совпадения спектров контролировали по величине и конфигурации корреляционного отклика системы.

Поворотом светоделительного кубика и прямоугольной призмы совмещали в плоскости Π_4 изображение, восстановленное синтезированной голограммой, с изображением объекта, расположенным в плоскости Π_2 . В это же время при перекрытии опорного пучка в плоскости Π_4 наблюдали автокорреляционную картину синтезированной голограммы. Восстановленное изображение и автокорреляционную функцию фотографировали. Не меняя положение объекта и всех элементов сис-

темы, на место синтезированной голограммы устанавливали голографическую фотопластинку ЛОИ-2 и экспонировали на ней с различной выдержкой ряд физических голограмм.

Затем фотографировали восстановленное изображение и автокорреляционную функцию физической голограммы. Корреляционные сигналы, полученные во всех случаях, фотометрировали и сопоставляли. Синтезированные голограммы при восстановлении давали контурные изображения. Это физически можно объяснить "ограничением сверху" возможной прозрачности элементарной ячейки голограммы. Если при расчетах вводили диффузный рассеиватель, то пределы возможного изменения амплитуды сигнала в плоскости голограмм становились значительно меньше. Это приводило к тому, что восстановленное изображение было заполненным (силуэтным), т. е. больше соответствовало исходному изображению.

При регистрации физических голограмм было моделировано "ограничение сверху" (регистрацию вели на нелинейном участке фотоматериала и при специальной химико-фотографической обработке). Были получены физические голограммы и корреляционные отклики при использовании диффузного рассеивателя. Сопоставление автокорреляционных функций при применении синтезированных голограмм с рассеивателем оказалось затруднительным, поскольку физически выполнить диффузор с законом рассеивания света, выбранным при синтезировании голограмм, было невозможно.

Проведенное фотометрирование и анализ результатов позволили сделать некоторые выводы. Во-первых, энергия корреляционных сигналов для физических и синтезированных голограмм примерно одинакова (различие не более 20% в одних случаях получено при синтезированных голограммах, в других – при физических). Во-вторых, как те, так и другие в одинаковой мере чувствительны к угловым и масштабным трансформациям распознаваемого объекта. В-третьих, отношение автокорреляционных сигналов к сигналам корреляции физических и синтезированных голограмм находилось в пределах 10 . . . 100, что свидетельствует о возможности использования синтезированных голограмм в оптических корреляционных системах вместо физических. Наилучший результат может быть получен, когда объект занимает значительную часть анализируемого поля.

Таким образом, разумное сочетание физической и цифровой голографии может в определенных ситуациях дать желательный эффект.

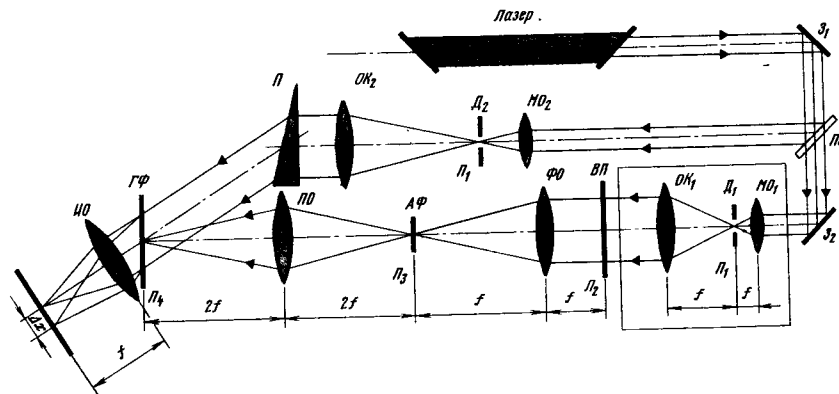


Рис. 68. Оптическая схема голографической системы

В последние годы фронт исследований сместился в область динамической голографии. В этом случае трехмерную картину стоячих волн записывают в среде непосредственно в процессе воздействия излучения. По характеру закономерностей динамическая голография представляет собой синтез голографии в трехмерных средах и нелинейной оптики.

Появилась резонансная голография. Голография с записью в резонансных средах, в которой пространственная память голограммы органически объединена с временной памятью фотонного эха, открывает принципиально новую возможность запоминать и затем точно воспроизводить динамические процессы, связанные с изменением состояния во времени и пространстве. В дальнейшем это явление станет, по мнению ряда ученых, основой для создания нового сверхскоростного инструмента регистрации физических процессов и воздействия на них.

Такие возможности голографического метода, как вычитание изображений, компьютерный синтез голограмм, позволяют нам получить "объекты", реально не существующие в природе. Например, создать голографическую линзу, которая может фокусировать лучи только определенного цвета и свободно пропускать все другие длины волн.

Еще одним научным достижением последнего времени является компьютерная томография — метод плоских сечений, разрезов, скрытых от глаза внутренних объектов, таких, как органы человеческого тела, получаемых при компьютерном синтезировании из рентгеновских, акустических и тому подобных изображений. Сочетание этого метода с голографией, т. е. синтез объемных изображений таких органов, предоставит еще большие возможности.

Развитие голографии и когерентной оптики открыло большие возможности и в решении проблемы распознавания. Созданы оптические вычислительные машины, допускающие обработку изображений, распознавание образов и анализ полей. В основе методов лежат операции линейной пространственной фильтрации, спектральный и корреляционный анализ.

Развитие цифровой голографии, машинных методов синтеза пространственных фильтров — два новых научных направления, способствующих решению проблемы распознавания, поскольку благодаря им открылись возможности создания гибридных систем, имеющих в своем составе цифровой, электронный и оптический процессоры. В сочетании с голографическими устройствами эти два направления приближают ученых и инженеров к построению высокоинтеллектуальных машинных систем с высокой производительностью и практически неограниченной памятью.

1. Микаэлян А. Л. Голография. — М.: "Знание", 1968. — 48 с.
2. Пирожников Л. Б. Что такое голография? — М.: Московский рабочий, 1976. — с.
3. Уиньон М. Знакомство с голографией: Пер. с англ. — М.: Мир, 1980. — 188 с.
4. Гик Л. Д. Акустическая голография. — М.: Наука, 1981. — 63 с.
5. Копылов П. М., Тачков А. И. Телевидение и голография. — М.: Связь, 1976. — 168 с.
6. Островский Ю. И. Голография и ее применение. — М.: Наука 1973. — 178 с.
7. Сафронов Г. С., Сафронова А. П. Введение в радиоголографию. — М.: Сов. радио, 1973. — 288 с.
8. Бахрах Л. Д., Курочкин А. П. Голография в микроволновой технике. — М.: Сов. радио, 1979. — 320 с.
9. Василенко Г. М., Цибульский Л. М. Голографические распознающие устройства. — М.: Радио и связь, 1985. — 310 с.
10. Строук Дж. Введение в когерентную оптику и голографию: Пер. с англ. — М.: Мир, 1967. — 348 с.
11. Ярославский Л. П., Мерзляков Н. С. Цифровая голография. — М.: Наука, 1982. — 220 с.
12. Оптическая голография. В 2-х томах: Пер. с англ. — М.: Мир, 1982. — Т. 1 — 2.

56

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	6
1. ФИЗИЧЕСКАЯ ГОЛОГРАФИЯ	9
1.1. В царстве света	9
1.2. Волны вокруг нас	13
1.3. Солнце и лазер	20
1.4. Интерференция света	30
1.5. Дифракция света	34
1.6. Удача и неудачи Габора	41
1.7. Принципы голографии	48
1.8. Эксперимент Лейта и Упатниекса	49
1.9. Метод Денисюка	56
1.10. Возможности физической голографии	61
2. ЦИФРОВАЯ ГОЛОГРАФИЯ	64
2.1. Цифровая обработка сигналов	64
2.2. Компьютеры вокруг нас	66
2.3. Голограмма Фурье	69
2.4. Синтезирование голограмм	75
2.5. Примеры цифровых голограмм	89
2.6. Восстановление изображения с голограмм	95
2.7. Дифференцирующий эффект бинарной голограммы	102
2.8. Примеры восстановленных изображений и их анализ	106
2.9. Возможности цифровой голографии	111
3. ПРИМЕНЕНИЕ ГОЛОГРАФИИ	114
3.1. Перстень Льва Толстого	114
3.2. Голографическое кино и телевидение	115
3.3. Голографическая память	119
3.4. Радиоголография	124
3.5. Оптимальная фильтрация	130
3.6. Симбиоз физической и цифровой голографии	136
Заключение	138
Список литературы	139

Научно-популярное издание

Федоров Борис Федорович, Цибульки Леонид Михайлович

ГОЛОГРАФИЯ

Руководитель группы "Массовой радиобиблиотеки" *И. Н. Суслова*
 Научный редактор *Л. Н. Ломакин*
 Редактор *О. В. Воробьева*
 Художник *А. Б. Юдкин*
 Художественный редактор *Н. С. Шеин*
 Технический редактор *Г. З. Кузнецова*
 Корректор *Л. А. Буданцева*

ИБ № 1664

Подписано в печать 10.07.89. Т-23751. Формат 60х90/16. Бумага офс. № 1.
 Гарнитура "Пресс-роман". Печать офсетная. Усл. печ. л. 9,0. Усл. кр.-отт. 35,38.
 Уч.-изд. л. 9,18. Тираж 54 000 экз. Изд. № 22094. Заказ № 1024. Цена 40 к.
 Издательство "Радио и связь". 101000 Москва, Почтамт, а/я 693

Типография издательства "Калининградская правда". 236000 Калининград обл.,
 ул. К. Маркса, 18

В 1989 – 1990 гг. в издательстве "Радио и связь" выйдут научно-познавательные книги для детей и юношества

Решетников В. Н., Сотников А. Н. **Информатика – что это?** (Межизд. серия "Научно-популярная библиотека школьника").

Содержатся первоначальные сведения об ЭВМ, истории, современном состоянии и направлениях развития информатики и вычислительной техники. Приводятся основы построения алгоритмов автоматизированной обработки информации и решения различных задач. Излагаются начала математического моделирования как важнейшего метода решения практических задач.

Зеленко Г. В., Панов В. В., Попов С. Н. **Домашний компьютер.** (Массовая радиобиблиотека).

Описываются структура, принцип работы, принципиальные электрические схемы и программное обеспечение персональной микроЭВМ радиолобителя, построенной на микропроцессоре типа КР580ИК80А. В качестве внешних устройств служат телевизор и кассетный магнитофон. МикроЭВМ может быть использована как универсальная ЭВМ для вычислений, управления разнообразной радиолобительской и бытовой аппаратурой и создания телеигр, а также может найти применение в качестве инструмента для разработки других микропроцессорных устройств.

Егоров Ю. Н., Голубев Н. А. **Уроки робототехники.** (Межизд. серия "Научно-популярная библиотека школьника").

В популярной форме рассказано об истоках возникновения робототехники, устройстве роботов и их основных узлов (манипуляторов, приводов, схватов). Особое внимание уделено электронным органам управления – процессорам, осуществляющим программу действий, запоминающим устройствам, телевизионным датчикам, ультразвуковым приемникам и излучателям и другим устройствам, представляющим "органы чувств" робота. Описано место роботов в современном автоматизированном производстве. Рассмотрено применение специализированных роботов на подводных работах, в атомной энергетике, в космическом пространстве.

Дворчик Ш., Василенки Л. **Мышка Программышка в стране Информатике.** Пер. с франц.

В увлекательной форме книга знакомит читателей с основными понятиями, необходимыми для игры и работы с персональным компьютером: клавиатура, курсор, байт, коррекция ошибок и т. д. В игровом представлении описываются основные операторы языка Бейсик, вводятся понятия об алгоритме, символьной информации, случайных числах и их использовании в игровых программах. В процессе изложения читателю предлагаются разнообразные задания, сложность которых постепенно возрастает.

Иванов Б. С. **В помощь радиокружку.**

Описываются самодельные конструкции радиолобительских устройств: приемников, усилителей, электромузыкальных инструментов, цветомузыкальных приставок и многих других.