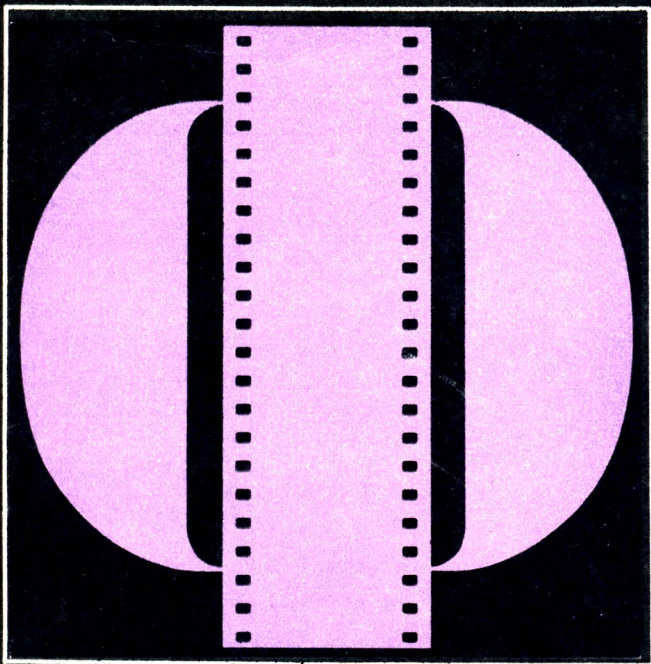


Массовая фотографическая библиотека



В. И. ВЛАСЕНКО

*Техника объемной
фотографии*

Власенко В. И.

В 58 Техника объемной фотографии. — М.: Искусство, 1978. 102 с., ил.

В книге в популярной форме изложены принципы и методы фиксации и воспроизведения статических объемных изображений, осуществляемые с помощью различных фотографических методов. Книга предназначена для читателей, имеющих техническую подготовку, у которых по роду работы может возникнуть необходимость воспроизведения статических объемных изображений с целью их применения в научных исследованиях, технических и других системах отображения.

В $\frac{32304-166}{025(01)-78}$ 142-78

ББК 37.94
77

Виктор Иванович Власенко

ТЕХНИКА ОБЪЕМНОЙ ФОТОГРАФИИ

Редактор А. Б. Долецкая. Художник А. П. Купцов. Художественный редактор Э. Э. Ринчино. Технический редактор Н. Г. Карпушкина. Корректоры Г. И. Сопова и Н. Г. Шаханова

И.Б. № 583

Сдано в набор 04.10.78. Подписано к печати 11.07.78. А07804. Формат 84×108/32. Бумага типографская № 2. Гарнитура обыкновенная. Печать высокая. Усл. печ. л. 5,46. Уч.-изд. л. 5,432. Изд. № 16675. Тираж 50 000. Заказ 755. Цена 20 коп. Издательство «Искусство», Москва 103009, Собиновский пер., 3. Ярославский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 150014, Ярославль, ул. Свободы, 97.

Сканировал Басов Н.Л. (basovnl@hotmail.com)

Все окружающие нас предметы размещены в пространстве. Объемность предметов и пространство мы воспринимаем как нечто естественное.

Пространственность видимых предметов отображается присущим человеку стереоскопическим зрением.

Слово стереоскопия происходит от греческих слов «стереос», то есть объемный, и «скопео» — смотрю, вижу. Помимо термина «стерео» используют русское слово «объемный», а также термин «трехмерный».

Изображения окружающих нас предметов, созданные художником на картине или фотографом на фотоснимке, точно так же, как и все полиграфические репродукции, не передают истинной их глубины. Мы привыкли к этому. И все же неудовлетворенность тем, что изобразительные методы не передают трехмерность пространства, издавна побуждала наиболее пытливых людей к поиску.

Еще в XV веке великий художник и изобретатель Леонардо да Винчи отмечал, что потеря подлинного ощущения глубины на картинах нежелательна, поэтому он изучал природу стереоскопического зрения, чтобы найти путь к воспроизведению объемных изображений [1]*.

В течение почти пятисот лет, прошедших с тех пор, люди различных поколений пытались решить эту задачу, но достичь оптимального результата не удалось и сегодня. В каком состоянии находится эта проблема в наши дни, читатель может узнать, прочтя эту книгу, но вначале попробуем ответить на вопрос: «А зачем нужны объемные изображения?»

Ощущение глубины появилось в процессе эволюции. Такое свойство зрительного аппарата давало заметные преимущества. Обладая стереоскопическим зрением, обезьяны, например, могут точно оценить расстояние и направление

* Здесь и далее в квадратных скобках даны ссылки на литературу (см. в конце книги).

до ближайшей ветки и перепрыгнуть на нее [2]. Первобытный человек, обладающий стереоскопическим зрением, мог успешно охотиться.

Итак, сформированный природой зрительный аппарат человека и животных обладал свойством видеть глубину и объемность предметов, поскольку это было необходимо для быстрой и точной ориентации.

И в наши дни, в условиях развитой цивилизации, аппарат ориентации необходим, но если раньше у него была только одна функция, то на более позднем этапе развития человеческой психики появились и некоторые другие функции. Так, ощущение глубины и объемности предметов является весьма сильным источником эстетического наслаждения. Известные шедевры живописи обладают множеством свойств, но одного — истинной объемности — им все же недостает. В течение столетий люди привыкали к тому, что живопись не воспроизводит натуральную глубину изображаемых предметов, и эта привычка так велика, что вопрос о том, необходимо ли это свойство для художественных изображений, в какой-то мере дискуссионный.

В одном аспекте этот спор уже решен. Когда в 1839 году была изобретена фотография, стремление получить объемные изображения сразу же стало на реальную почву. Стерефотография фактически ровесница обычной фотографии, поэтому то, что можно выразить средствами художественной фотографии, можно передать и стереоскопически.

Таким образом, одно из конкретных применений объемных изображений — фотоизображения, привлекающие людей как источник познания и как источник эстетического наслаждения.

Другим конкретным применением стереоскопии является получение объемных изображений в научных исследованиях. Сложные системы взвешенных в пространстве частиц, внутренние органы человека при рентгеновском просвечивании, неизвестные предметы на дне моря или в земных недрах, куда можно спустить только прибор, и, наконец, неизвестная обстановка на поверхности удаленных космических тел — все это для облегчения расшифровки и понимания необходимо фиксировать в виде объемных изображений.

В недавнее время возникла еще одна область применения объемных изображений, где требуется абсолютное правдоподобие, чтобы человек не мог отличить объемное изображение от реального предмета, иначе воспроизведение теряет смысл.

Чтобы открыть человеку дорогу в космос, понадобилось создать систему жизнеобеспечения на борту космического корабля, причем сложность этой системы наращивалась постепенно при переходе с околоземных орбит к лунным полетам. Однако на всех этих этапах сложнейшая система жизнеобеспечения охватывала только лишь главные физиологические потребности человека, а психологический климат на борту космических кораблей формировался непрерывной радиосвязью с землей и насыщенной программой работы.

Вероятно, в будущих длительных космических полетах появится опасность сенсорной (от латин. *sensus* — чувство, ощущение) изоляции. Экспериментами установлено, что у некоторых людей в состоянии длительной изоляции возникают галлюцинации и совершенно теряется способность концентрировать внимание или решать задачи.

Сенсорная система — это система зрительного, слухового, осязательного и др. ощущений человека, нагружаемая в обычных земных условиях непрерывным потоком информации о внешней среде. По-видимому, она нуждается в более или менее постоянном притоке информации, в противном случае сенсорная система начинает выходить из строя, как это происходит, например, в состоянии крайнего утомления.

Таким образом, задача жизнеобеспечения в космосе усложняется задачей создания искусственной биосферы, визуально не отличимой от земной.

Очевидно, что только субъективно объемные изображения земных видов — сада, леса, реки, цветов, травы, неба с облаками и т. п. — могут создать на борту космического корабля столь необходимую иллюзию земной обстановки. Правдоподобность этих объемных изображений должна быть столь велика, чтобы даже тренированный мозг космонавта хотя бы на короткое время поверил в подлинность всего, что видит его глаза. Только в этом случае возможно психологическое удовлетворение.

Итак, перспективной областью применения объемных изображений является задача создания искусственной биосферы, психологически адекватной земной, на борту космических кораблей, спутников Земли и планет, на Луне и на планетах, где отсутствует привычная среда.

В целом, техника фиксации и воспроизведения объемных изображений сейчас еще находится на относительно низком уровне. Значительный рост и соответствующее раз-

витие этой техники следует ожидать в ближайшем будущем.

В предлагаемой читателю книге предпринята попытка показать нынешнее состояние этой техники и возможные пути ее дальнейшего развития.

Большую помощь в подготовке этой книги оказал канд. техн. наук И. С. Барбанель, которому автор выражает свою искреннюю признательность.

Краткие сведения о природе стереоскопического зрения

Стереоскопическое бинокулярное зрение

Глаза человека функционируют в тесном взаимодействии, не дублируя друг друга. Мозг непрерывно сравнивает информацию, поступающую от каждого глаза, поэтому результат их совместной работы принципиально отличается от того, что было бы при действии одного глаза. Видение двумя глазами называют бинокулярным.

Роговица и хрусталик в совокупности с камерной влагой и стекловидным телом подобно объективу фотоаппарата проецируют изображения предметов на сетчатку, где образуется двухмерное, т. е. необъемное изображение. Оно аналогично тому, что мы можем увидеть на матовом стекле фотоаппарата. Двухмерные изображения, образуемые на сетчатках обоих глаз, называют сетчаточными изображениями.

Если закрыть один глаз, то картина, воспринимаемая другим глазом, и будет сетчаточным изображением.

Поставим перед глазами кисть руки, приблизительно на расстоянии 30 см, и закроем один глаз. Запомним взаимное положение кисти относительно каких-либо деталей удаленного фона, например окна. Затем, не изменяя положения руки, закроем глаз, который был открыт вначале, и откроем другой. При этом будет хорошо видно, что совершенно неподвижная рука резким скачком переместилась и занимает теперь другое положение относительно деталей удаленного фона. Повторив несколько раз этот простейший опыт, мы убедимся, что сетчаточные изображения правого и левого глаза существенно различаются. Это различие известно под названием диспаратности. Продолжая опыт, откроем оба глаза и посмотрим на кисть своей руки, находящейся в том же положении, что и прежде. Теперь мы отчетливо увидим, что рука объемна и отделена определенным расстоянием от удаленного фона. Что же произошло? Наш мозг, сравнивая два сетчаточных изображения, поступающие от двух одновременно функционирующих глаз, обнаружил их диспаратность и преобразовал

этот разностный сигнал в ощущение объемности, глубины видимого пространства *.

Таким образом, ощущение объемности и глубины создается подсознательно в результате протекающего в мозгу психофизиологического процесса, одним из элементов которого является анализ двух диспаратных сетчаточных изображений. Следовательно, и методы воспроизведения объемных изображений возможно построить по этой же схеме: сначала создать плоские диспаратные сетчаточные изображения, а затем обеспечить их бинокулярное видение.

Бинокулярное зрение — это лишь один из факторов, обуславливающих восприятие глубины, и оно функционирует только при рассматривании относительно близких предметов, в пределах 5—10 м. Чем дальше находится предмет, тем меньше диспаратность сетчаточных изображений, тем слабее ощущение объемности. Обусловлено это тем, что расстояние между центрами зрачков обоих глаз, называемое базисом зрения, сравнительно невелико и при рассматривании удаленных предметов их изображения на сетчатках глаз будут одинаковыми.

При бинокулярном видении существует также явление конвергенции: при взгляде на близко расположенные предметы оптические оси глаз сходятся и пересекаются в фиксируемой взглядом точке предмета. В соответствии с величиной поворота глазных яблок, т. е. пропорционально углу конвергенции, вырабатываются определенные сигналы, поступающие в мозг. Эти сигналы, на основе повседневного жизненного опыта человека, дают подсознательно представление о расстоянии до предмета. Можно заметить, что при взгляде на удаленные предметы оптические оси глаз сходятся под меньшим углом, а при взгляде вдаль — оси параллельны. Таким образом, возникновение ощущения объемности происходит частично и в результате явления конвергенции, при котором мышечные усилия при повороте глаз непрерывно преобразуются в нервные сигналы, посылаемые в мозг. Этот механизм работает как дальномер, сообщая расстояние до предмета, на котором пересеклись оптические оси глаз.

Однако дальномер может указать расстояние только до одного предмета, изображения которого сливаются при данном угле конвергенции. Наш зрительный аппарат обладает способностью одновременно оценивать расстояния до

* Следует указать, что если диспаратность будет слишком велика, то может возникнуть ощущение двоения видимых предметов.

многих предметов, сколько бы их не оказалось перед нами. Для этого требуется довольно сложный процесс параллельной обработки информации, что на практике и осуществляется «вычислительной техникой» мозга.

К особенностям восприятия глубины относится взаимосвязь между конвергенцией глаз и различием изображений — диспаратностью. Угол конвергенции является регулятором диспаратности. Когда глаза сконвергированы на отдаленном предмете, данная диспаратность между изображениями правого и левого глаза означает большие различия по глубине, чем в том случае, когда рассматриваются близкие предметы. Получается так, что оценка сигналов непостоянна и мозг непрерывно вносит поправку в оценку объемности, используя при этом сигналы, полученные в результате конвергенции. Такая система компенсации введена природой по той причине, что величина диспаратности обратно пропорциональна расстоянию до предметов. Если не вносить поправку, то отдаленные предметы будут казаться более близкими друг к другу, чем близкие предметы, разделенные такими же расстояниями. Поэтому, например, находясь в лесу, мы ощущаем реальные расстояния между стволами деревьев как вблизи, так и вдали.

Количественная оценка глубины и объемности предметов зависит от значения параллакса. Смещение точки изображения в одном глазу относительно одноименной точки изображения в другом глазу носит название бинокулярного или стереоскопического параллакса. Величина бинокулярного параллакса может быть выражена в угловом измерении: для этого из большего угла конвергенции, образованного пересечением осей глаз в ближней точке, вычитают меньший угол конвергенции, образованный пересечением осей глаз в удаленной точке [1]. Бинокулярный параллакс можно выражать и в линейном измерении, когда изображения образуются не на сферических поверхностях сетчаток глаз, а на плоских фотопленках при стереофото съемке.

В заключение следует отметить, что бинокулярный стереоскопический эффект имеет ряд ограничений, например невозможность различения удаленности предметов, имеющих протяженность, параллельную базису между зрачками, т. е. бинокулярное зрение не полностью определяет известные нам свойства восприятия глубины человеком. В то же время человек ощущает объемность предметов и пространство. Этому способствуют дополнительные вторичные факторы стереовидения.

В процессе пространственной ориентации участвуют психофизиологические факторы, к которым относятся: аккомодация, видимая величина предметов, линейная перспектива, воздушная перспектива, заполненность пространства предметами, загораживание одних предметов другими, распределение светотеней на поверхности предметов, различный характер кажущегося перемещения предметов при движении головы, цветовой контраст. Поскольку все это можно наблюдать и одним глазом, их иногда объединяют под общим названием — монокулярный стереоэффekt.

Монокулярный стереоэффект появляется в том случае, когда мы смотрим двумя глазами, например при рассматривании картины живописца, обычной фотографии или журнальной иллюстрации. Оба глаза конвергируются на плоскость изображения, но, поскольку диспаратность изображений на сетчатках обоих глаз отсутствует, бинокулярный стереоэффект не может возникнуть.

В живописи, лишенной возможности использовать бинокулярный стереоэффект, применяется монокулярный эффект, в основном построенный на законах линейной перспективы, распределения цветов и светотеней. Далее к факторам монокулярного стереоэффекта относится воздушная дымка, называемая воздушной перспективой. Известно, что по мере удаления предмета от наблюдателя толщина слоя воздуха между ними увеличивается. Благодаря рассеянию света в воздушной среде и появлению из-за этого светового фона контрастность и яркость цветов уменьшаются пропорционально увеличению расстояния. Это является дополнительным фактором нашего ощущения объемности. Кроме того, усиленное восприятие пространства достигается за счет динамического стереоэффекта, когда наблюдатель перемещается относительно предмета или рассматриваемый предмет поворачивается относительно наблюдателя. Это приводит к образованию параллактической разности последовательно получаемых изображений предмета на сетчатке глаза.

Конфигурация изображения на сетчатке изменяется последовательно во времени, причем за счет инерции зрительного ощущения на сетчатке одного и того же глаза могут как бы наложиться два различных изображения, отличающихся в деталях, сместившихся больше или меньше. Эта разность, отмеренная за промежуток времени,

равный зрительной инерции глаза, называется временным параллаксом, который похож по своему воздействию на бинокулярный параллакс. При относительно небольшой скорости движения предмета временной параллакс создает объемное представление о предмете, который изображен, например, на плоскости. Этот прием широко используется при киносъемках и носит название — съемка с движения. При этом производится движение съёмочной камеры относительно объекта или движение (поворот) объекта при неподвижной камере.

Для возникновения при рассматривании объекта динамического стереоэффекта не обязательно его вращение или движение, достаточно даже легкого покачивания головой. При этом удаленные предметы будут казаться неподвижными или чуть-чуть перемещающимися, в то время как ближние предметы будут двигаться с большей скоростью. Величина и скорость перемещения статических предметов при изменении точки наблюдения пропорциональна удалению их от наблюдателя. Кроме того, при покачивании головы наблюдателя можно увидеть и боковые стороны предмета, загороженные при неподвижной точке наблюдения. Периодическое или единичное перемещение предметов в поле зрения сразу же дает дополнительную информацию о пространственном их расположении. Все эти явления участвуют в формировании общего ощущения глубины и объемности предметов и распределения их в окружающем пространстве.

Итак, стереоскопическое зрение есть сложный психофизиологический процесс, суммирующий множество различных сигналов, которые дополняют друг друга, сравниваются между собой, усиливаются и, как результат бинокулярного видения и всех компонентов монокулярного стереоэффекта, создают в нашем сознании ощущение объемности.

Основные правила имитации стереоскопического зрения

Краткое рассмотрение природы стереоскопического зрения подсказывает и путь имитации этих процессов, т. е. метод воспроизведения объемных изображений. Чтобы создать у человека ощущение пространственности видимых объектов, достаточно создать на сетчатках его глаз изображения, обладающие необходимой диспаратностью и элементами вторичных факторов стереовидения. Если эти сетчаточные изображения будут в достаточной степени содер-

жать все элементы бинокулярного и монокулярного стереоэффекта, у человека возникнет ощущение объемности изображения. В случае достижения идентичности искусственно созданных сетчаточных изображений с теми изображениями, которые образуются на сетчатках глаз при наблюдении реальных предметов, в сознании человека возникнет ощущение объемности изображения, такое же, как и при рассматривании оригинала.

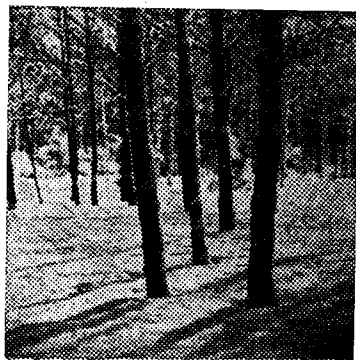


Рис. 1. Два изображения — стереопара, сфотографированные с двух позиций, раздвинутых по горизонтали на 125 мм. На этих снимках можно обнаружить характер различий, аналогичный диспаратности сетчаточных изображений в глазах человека

Таким образом, принципиальная возможность синтеза не отличимых от оригинала объемных изображений существует, причем задача для исследователей и изобретателей несколько облегчается тем, что вместо объемной модели оригинала вполне достаточно создать плоские сетчаточные изображения, что значительно проще.

Рассмотрим подробнее возможности создания нужных сетчаточных изображений, разделив их на группы, относящиеся к бинокулярному и монокулярному факторам стереовидения.

Бинокулярный стереоэффект. Для создания условий бинокулярного стереовидения необходимо иметь не менее двух изображений одного и того же объекта, полученных как бы с помощью левого и правого глаз наблюдателя и, следовательно, отличающихся друг от друга. Для получения диспаратных изображений на сетчатках глаз необходимо каждому глазу предъявлять только ему предназначенное изображение, которое другой глаз не должен видеть.

Это первое и основное правило синтеза бинокулярного стереоэффекта называют избирательным видением, а процесс реализации избирательного видения называют сепарацией (сепарация означает разделение) изображений.

Диспаратность изображений, предназначенных для правого и левого глаз, выявляется на сетчатках глаз в виде бинокулярного параллакса. Так как наши глаза в обычных условиях видения расположены на одной горизонтальной линии, то все бинокулярные параллаксы горизонтальны. Отсюда следует, что любой технический способ регистрации стереоскопических изображений должен фиксировать горизонтальные бинокулярные параллаксы. Эти параллаксы можно обнаружить только при сравнении диспаратных плоских изображений, которых, следовательно, должно быть, как минимум, два. Такие два изображения называют стереопарой.

На рис. 1 показана стереопара, при взгляде на которую весьма трудно заметить горизонтальный параллакс, зафиксированный в виде линейных величин.

Чтобы выявить бинокулярный параллакс, наложим одно изображение стереопары на другое. Результат такого наложения, выполненного оптически, представлен на рис. 2. Параллакс выявлен в виде более черных полос, причем наглядно показана основная закономерность: чем дальше от наблюдателя находится предмет, тем меньше величина параллакса. Для самых удаленных предметов параллакс равен нулю. Если каждый глаз будет видеть только одно ему предназначенное изображение стереопары, то у зрителя возникнет ощущение объемности данной картины.

Бинокулярный параллакс является основным, наиболее важным фактором в процессе создания иллюзии объемности изображения.

Монокулярный стереоэффект. Почти все факторы монокулярного стереоэффекта имеются в обычной фотографии, и они полностью переходят в стереоскопическую фотографию. К ним в первую очередь следует отнести линейную и воздушную перспективы. Объектив фотоаппарата воспроизводит на снимке линейную перспективу. Чем дальше удален предмет при съемке, тем меньше его изображение, т. е. любое фотографическое изображение, автоматически построенное по законам линейной перспективы, передает пространственное расположение предметов. Картина, где хорошо переданы цвет и светотеневой рисунок, воспроиз-

водит объем предметов и глубину пространства как результат воздушной перспективы.

Динамический стереозффект является очень важным фактором в создании ощущения глубины. Если динамический стереозффект требуется только для усиления ощущения объемности, достаточно реализовать небольшие смещения предметов на стереоизображении. В этом случае одной



Рис. 2. Результат вычитания одного изображения стереопары из другого. Черные полосы — выявленные горизонтальные параллаксы в стереопаре, показанной на рис. 1

стереопары уже недостаточно. Необходимо иметь много стереопар, сфотографированных с различных точек зрения, и в зависимости от положения головы наблюдателя давать ему возможность видеть одну пару из этого набора. Если, например, человек рассматривает реальный пейзаж и при этом отклоняет голову вправо, то в каждой новой позиции его глаза будут воспринимать все новые и новые стереопары. Эти стереопары сменяют друг друга, а человек видит, как предметы изменяют взаимное расположение при постоянной объемности рассматриваемой картины. Характер этих изменений, движение близких и далеких предметов,

частичное перекрывание их и другие меняющиеся элементы вызывают по ассоциации с прошлым опытом человека представления о пространственном расположении предметов, создавая стереоскопический зрительный образ. Поскольку человек повседневно ощущает воздействие динамического стереоэффекта, его имитация с помощью, допустим, 20—30 стереопар существенно усиливает ощущение объемности, создаваемое теми или иными техническими средствами.

К проявлениям динамического стереоэффекта следует отнести и вертикальный параллакс. Если, например, человек, рассматривая какой-либо предмет, присядет или приподнимется, то на сетчатках его глаз возникнет вертикальная последовательная серия образов, что создаст также ощущение объемности, хотя эти образы в обоих глазах будут изменяться одинаково. Такой вертикальный параллакс относительно редко встречается в повседневной жизни, поэтому воспроизведение диспаратности изображения по вертикали не оказывает большого влияния на суммарное ощущение объемности.

Итак, для имитации процессов стереоскопического зрения необходимо с помощью технических средств обеспечить следующее:

1. Изображения стереопар должны быть изготовлены по правилам перспективы, иметь правильную цветопередачу и точную передачу светотеневого рисунка. Нужна регистрация не менее двух диспаратных изображений, т. е. стереопары.

2. Показ каждому глазу только одного, этому глазу предназначенного изображения стереопары.

3. Изображение для стереоскопии должно содержать достаточный запас стереопар, снятых с различных точек зрения, а устройство для их демонстрирования должно обеспечивать зрителю возможность видения любой одной стереопары и смену их при изменении точки зрения наблюдателя относительно прибора.

Перечисленные пункты в разной степени реализуются известными способами воспроизведения объемных изображений. Результат их изобразительных возможностей определяется совершенством технического выполнения этих требований.

Растровая стереоскопическая фотография

Принцип сепарации изображений с помощью растров

Чтобы понять принцип растровой сепарации различных изображений, сделаем несложный опыт. Разрежем изображение, показанное на рис. 3, на узкие полоски, рассекая его



Рис. 3. Рассечение полутонового снимка на узкие полоски для использования изображения в растровой системе

вертикальными линиями. Затем наклеим каждую полоску на грань прямоугольной рейки. Каждую рейку повернем на угол 45° , не меняя ее местоположения, как изображено на рис. 4. Если смотреть на эти рейки слева, как показано стрелкой А, то мы увидим нормальное изображение, как

на рис. 3. Даже стыки между полосками могут быть незаметными.

В то же время, если мы посмотрим на эти рейки справа, как показано стрелкой *Б*, мы не увидим левого изображения. Продолжим опыт. Разрежем на такие же вертикальные полоски какое-нибудь другое изображение и наклеим их на правые грани реек. Теперь и справа можно наблюдать изображение. Описанный прием разделения (сепарации) изображений не нов, он издавна используется для создания рекламных щитов.

Отметим их основные свойства:

а) в одной и той же плоскости (если пренебречь ребристостью) и в пределах одного и того же зрительного поля (рамки) содержатся два различных изображения;

б) эти изображения в полном, неискаженном виде можно наблюдать с различных точек, причем наблюдая одно изображение, мы не видим другого.

Последнее очевидное свойство и является простейшим примером сепарации, т. е. раздельного видения двух различных изображений, находящихся в одной и той же плоскости и рамке. Однако для сепарации двух изображений стереопары рассмотренный способ непригоден. Если посмотреть на рис. 4, то видно, что точки наблюдения *А* и *Б*, в которых полностью проявляется эффект сепарации, находятся далеко друг от друга. Расстояние между этими точками заведомо больше самого изображения. В то же время известно, что изображения стереопары предназначены для зрительного аппарата человека и их сепарация должна осуществляться при заданном расстоянии между точками одновременного наблюдения *А* и *Б*. Это расстояние, называемое базисом зрения, приблизительно равно 62—74 мм.

Чтобы убедиться, что и для этого случая возможна сепарация двух изображений, продолжим наш опыт. Возьмем оба комплекта полосок, ранее размещенных на рейках, и разместим их в одной плоскости, например наклеив их на кусок картона. Полоски правого и левого изображений окажутся наклеенными через одну. Если посмотреть на кар-

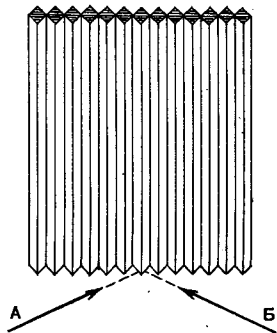


Рис. 4. Простейший растр, состоящий из реек квадратного сечения, способный вместить два разных изображения

тон, то будут видны оба изображения одновременно, причем цельность каждого будет нарушена чересстрочным способом наклейки полосок. Никакой сепарации.

Продолжим опыт. Установим на некотором расстоянии от плоскости нашего смешанного изображения плоскую решетку, состоящую из вертикальных непрозрачных полос

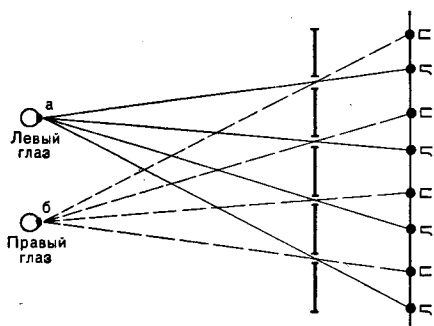


Рис. 5. Схема, поясняющая принцип действия щелевого раstra

с прозрачными промежутками между ними. На рис. 5 показан разрез плоскости картона и решетки перед ним. При соответствующем подборе ширины непрозрачных полосок решетки, ширины ее щелей и расстояний между плоскостью изображения, плоскостью решетки и местонахождением наблюдателя происходит полная сепарация двух изображений при рас-

стоянии между точками *a* и *b*, соответствующем базису зрительного аппарата человека. Если в точке *a* находится левый глаз, а в точке *b* — правый глаз человека, каждый глаз наблюдает только одну картину и не видит другой.

Если описанным выше способом будут разрезаны на полоски не случайные изображения, а стереопара, и оба изображения размещены поэлементно через один, то при наблюдении по схеме на рис. 5 возникнет ощущение объемности, т. е. появится стереоэффект.

Рассмотренные опыты показывают, что стереоэффект можно наблюдать невооруженным глазом. В этом случае роль прибора играет решетка и само преобразованное изображение.

Такую решетку называют растром, а сепарацию изображений, осуществляемую с ее помощью, — растровой сепарацией.

Сепарация изображений с помощью линзового раstra

Практическое применение щелевого раstra (см. рис. 5) нецелесообразно, так как черные непрозрачные полоски, накладываемые на изображение, в значительной степени ухудшают его качество, за счет поглощения ими

света, что снижает яркость. Более совершенным является способ сепарации изображений с помощью линзового растра (рис. 6).

Растр состоит из большого количества плоско-выпуклых цилиндрических линз*, собранных вплотную друг к другу в едином блоке. Своей плоской стороной линзовый растр обращен к изображению. Радиус кривизны всех

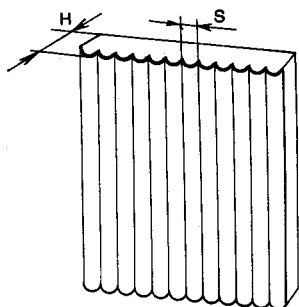


Рис. 6. Общий вид линзового растра, состоящего из множества цилиндрических линз, собранных в монолитный блок

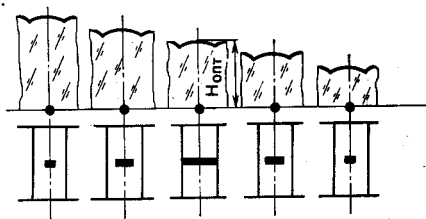


Рис. 7. Схема, поясняющая способ выбора оптимальной толщины линзового растра. При отклонениях толщины в любую сторону изображение точки не превращается в риску, равную ширине линзы, в результате чего не получается слитное изображение

линз одинаков и толщина растра H постоянна по всей площади растра. Ширина линз S одинакова для всех линз растра и ее называют шагом растра. Величина H выбирается такой, чтобы каждый элемент изображения, наблюдаемый сквозь линзу, заполнял всю ширину этой линзы. Это достигается при определенном соотношении между фокусным расстоянием линз и толщиной растра, что иллюстрируется схемой на рис. 7. Там же показан вид элемента изображения, если толщина растра отличается от оптимальной. Очевидно, только в случае оптимальной толщины растра каждый элемент изображения сливается с соседним, а изображение в целом будет мозаичным, но слитным. При этом слитное мозаичное изображение образуется на основе линий, каждая из которых имеет ширину, значительно меньшую ширины линзы.

* Особенность цилиндрических линз состоит в том, что в одном направлении они работают как плоскопараллельные пластины, а в другом, перпендикулярном к первому, — как сферические линзы.

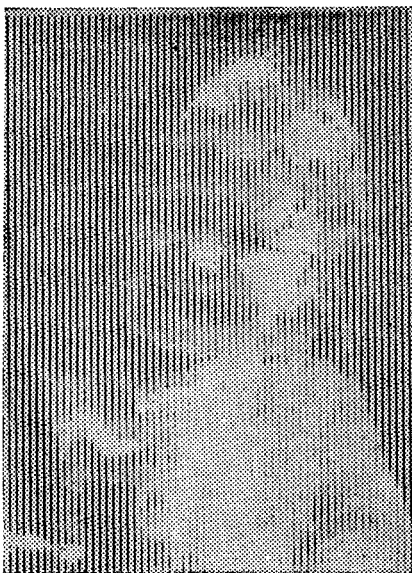


Рис. 8. Изображение (см. рис. 3), собранное линзовым растром в совокупность линий переменной интенсивности. Значительная часть площади эмульсии осталась свободной и может быть использована для размещения других изображений в том же кадре



Рис. 9. Мозаичное изображение, полученное при наложении линзового раstra на линейчатое изображение (см. рис. 8). Сравнение с исходным изображением (см. рис. 3) показывает, что кодирование и декодирование привело к некоторой потере четкости оригинала.

На рис. 8 показана совокупность линий, которая достаточно для получения мозаичного изображения. На рис. 9 видно слитное мозаичное изображение, которое можно наблюдать, наложив линзовый растр на линейное изображение.

Сравнение обоих изображений подтверждает, что визуально приемлемое цельное мозаичное изображение может быть получено с помощью линзового растра при использовании очень малой площади фотослоя, поскольку линии на рис. 8 занимают лишь малую часть площади кадра. Остальная площадь фотослоя остается свободной, причем на этом свободном поле можно разместить другие, тоже

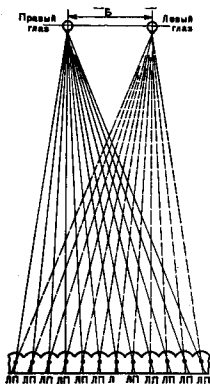


Рис. 10. Схема, поясняющая принцип сепарации двух изображений с помощью линзового растра

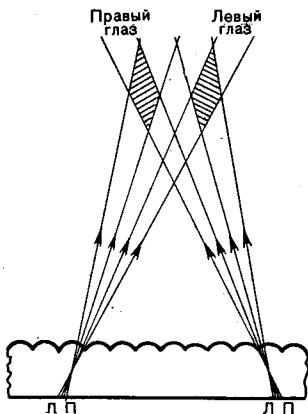


Рис. 11. Схема, поясняющая принцип образования зон избирательного видения. Перемещение глаз в заштрихованных зонах не нарушает процесса сепарации правого и левого изображений стереопары

линейчатые, изображения, а затем с помощью линзового растра наблюдать их как цельные мозаичные изображения.

Схема сепарации двух изображений дана на рис. 10. Оптические оси зрачков правого и левого глаза проходят через центры кривизны линз растра и доходят до двух различных элементов разложенного по строкам изображения стереопары. Каждый глаз видит только те элементы изображения, которые находятся на его оптической оси, и не видит другие, что и обеспечивает сепарацию изображений. При этом обеспечивается восприятие стереоизображения.

Рассмотрим пределы, в которых сохраняется условие сепарации, т. е. обеспечивается стереоэффект. На рис. 11 показана схема хода лучей, идущих от элементов изображения стереопары и проходящих через линзовый растр в направлении наблюдателя. Заштрихованные зоны показывают пространство, в котором можно размещать глаза на-

блюдателя и обеспечивать при этом сохранение условий сепарации двух изображений, т. е. стереоэффекта. Эти зоны называют зонами избирательного видения (стереовидения).

При использовании линзового растра зоны стереовидения располагаются параллельно плоскости растра, а в сечении представляют собой фигуры, близкие по форме к ромбу. Чем больше размеры зон, тем большую свободу ощущает человек, рассматривающий стереоскопическое изображение. Специальными техническими приемами стремятся увеличить размеры зон избирательного видения. Одним из наиболее эффективных способов является расширение элементов изображения стереопар, которые рассматривают сквозь линзы растра.

Параметры линзовых растров

В стереоскопических открытках, выпускаемых в нашей стране и за рубежом, встречается большое разнообразие параметров линзовых растров. Какие же из них следует считать лучшими, оптимальными по своим параметрам?

Одним из важных параметров растра является его толщина, которая различна по многим причинам, например из-за принятого радиуса кривизны линз или показателя преломления материала растра.

Однако есть различие в толщинах, которое диктуется необходимостью. Имеется в виду различие толщин линзового растра, установленного в фотоаппарате (его называют съёмочным растром), и линзового растра, который накладывают на кодированное изображение, чтобы декодировать его и увидеть объемное изображение. Этот растр называют декодирующим. Его шаг должен быть обязательно равным шагу съёмочного растра, но толщина может быть различной.

При съёмке необходимо выбрать такую толщину растра, чтобы точно сфокусировать снимаемое изображение в плоскости фотопленки, прилегающей к плоской стороне растра (рис. 12, а). Фотосъёмка с таким растром обеспечивает регистрацию максимального количества стереопар в кодированном изображении.

Если этот же растр наложить на кодированное изображение, то стереоэффект наблюдаться будет, но из-за остроты фокусировки малейшее смещение стереоизображения, которое находится в руках у наблюдателя, движение головы (и то и другое практически неизбежно) приводит к из-

менению его вида, поскольку размеры зон стереовидения относительно малы и на фотопленке нет одинаковых участков изображения стереопары. Непрерывное флюктуационное изменение вида изображения делает его неустойчивым.

Чтобы такие динамические флюктуации не были заметны, а наблюдаемое объемное изображение было более устойчивым и не утомляло зрителя, прибегают к дефокусировке изображения.

Толщину растра делают меньше, чем при съемке, при одинаковом фокусном расстоянии линз растра (рис. 12, б). При сдвигах наблюдателя в любую сторону обеспечивается устойчивость видимого изображения, так как размеры зон избирательного видения достаточно велики.

Каково же должно быть оптимальное значение толщины растра? Декодирующий растр должен быть по возможности тонким, так как его обычно наклеивают на стереоизображение и чрезмерная его толщина делает фотоснимок слишком толстым и тяжелым. Мы привыкли к тонким и легким фотоснимкам и желательно, чтобы появление объемных фотографий не сопровождалось ухудшением параметров фотоизображения. Однако сделать произвольно тонкий декодирующий растр невозможно, так как толщина растра зависит от фокусного расстояния линз растра, которое связано с шириной линзы — шагом растра. При заданной ширине линз можно изготовить их с различными фокусными расстояниями. Для этого нужно изменять радиус кривизны линзы. Чрезмерное уменьшение радиуса кривизны приводит к резкому возрастанию aberrаций (ведь линзы растра никакой коррекции не имеют), поэтому применяют обычно радиус кривизны больший, чем шаг растра. Если, следовательно, считать соотношение радиуса кривизны и шага растра постоянным, то толщина растра будет зависеть только от шага растра. Эта закономерность приблизительно выдерживается в применяемых растрах, причем чем больше шаг растра, тем больше его толщина. Отметим, что для съемочного растра толщина не имеет значения, поскольку он размещается в кассете фотоаппарата.

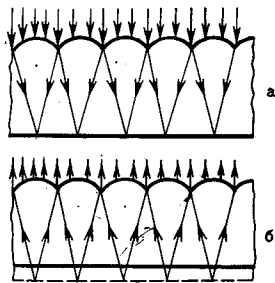


Рис. 12. Схема различной настройки линзовых растров за счет толщины: а — съемочный, т. е. кодирующий растр; б — растр декодирующий, т. е. растр, сквозь который рассматривают кодированные изображения

Таким образом, толщина растра зависит от его шага, причем первичным является выбор шага, а затем следуют остальные параметры.

Какой же шаг следует выбирать для декодирующего растра? То, что стереофотография или полиграфическая стереооткрытка предназначены для одного зрителя, предопределяет выбор постоянного шага растра. При этом учитывают среднее расстояние, с которого человек рассматривает стереофотографию небольшого размера. Это расстояние обычно равно 25—30 см. В идеальном случае шаг декодирующего растра должен быть настолько малым, чтобы его величина была за пределами разрешающей способности глаза. При этом отдельные линзы будут неразличимы, а элементы мозаики, наблюдаемые через растр, сольются в цельное изображение достаточной четкости.

Однако это на первый взгляд необходимое условие противоречит требованиям передачи максимального параллакса, т. е. получению наибольшего стереоэффекта. Чем больше шаг растра, тем больший параллакс может быть передан и тем сильнее наблюдаемый стереоэффект.

В связи с этим желательно всегда увеличивать шаг растра.

Но в каких пределах можно увеличивать шаг? Наиболее достоверный ответ можно получить только экспериментальным путем, однако приближенно можно судить о величине шага на основе следующих соображений. Как известно, основную информацию об объекте несет его контур, выделяемый в изображении объекта. Стереоэффект может быть получен даже на стереопаре, где рисунок дан только контуром.

Следовательно, оценку степени возможного увеличения шага растра следует производить, рассматривая только лишь нарушение контура объекта.

Зрительный аппарат человека наделен большой способностью интегрировать дискретные изображения и дает ощущение слитного изображения. Здесь, по-видимому, играет роль не только ограниченная разрешающая способность глаз, но и неравномерная концентрация внимания наблюдателя на элементах рассматриваемого изображения при сканировании глаз по контурам изображения. По этой причине груболинейчатое изображение на экране телевизора нам кажется сплошным, если мы, например, увлечены содержанием наблюдаемого, хотя, не меняя положения глаз, мы могли бы увидеть линейчатость изображения, если бы усилием воли обратили на это внимание.

Еще больше отвлекает наблюдателя от различения раstra ощущение объемности при рассматривании растрового стереоизображения. Сосредоточившись на этом необычном явлении, наблюдатель не замечает вертикальных полос линзового раstra. Кроме того, тоновый и цветовой контраст между линиями обычно невелик.

На рис. 13 показаны две схемы образования столбиковой аппроксимации контура, рассматриваемого сквозь линзовый растр. Даже при максимальном контрасте (черное и белое) отклонение от первоначального плавного контура составляет примерно половину шага раstra. Это отклонение — либо черный треугольник, выходящий за пределы контура, либо белый треугольник, вырезающий часть контура, — равное в среднем $s/2$, и есть та дискретность, которую предстоит сгладить нашему зрению.

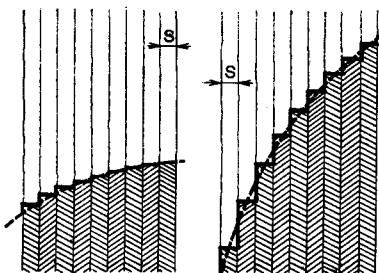


Рис. 13. Схема образования ступенчатых контуров в мозаичном изображении

Какова абсолютная величина, доступная сглаживанию? Обратимся к примеру растровых черно-белых изображений в газетах, где применяют линиатуру 20—30 *лин/см*. Эти изображения хотя и грубомозаичны, но способность зрительной системы к сглаживанию дискретности делает их вполне терпимыми.

Следовательно, величину $1/20$ *см* можно считать максимально допустимым отклонением от контура. Если исходить из схемы (см. рис. 13), то можно считать максимально допустимым шагом раstra 1 *мм*.

Для полиграфических открыток применяют шаг раstra 0,3÷0,4 *мм*, что улучшает вид контура, но снижает возможность передачи максимальных параллаксов и ухудшает видимый стереоэффект.

Значительное увеличение шага раstra не применяется в открытках и по той причине, что при этом неизбежно возрастает толщина раstra.

Растры с большим шагом, по-видимому, более приемлемы для больших стереокартин, типа торговой рекламы или художественных изображений (эстампов), заключенных в раму и размещаемых обычно на стене. В этом случае тол-

шина растра не имеет значения, а рассматривание таких картин с расстояния 1—2 м делает линии и вовсе не видимыми, поэтому шаг растра может быть увеличен до 1 мм.

Кодированное изображение и его структура

Изображение (см. рис. 8), которое называют кодированным, состоит из нескольких различных изображений и поэтому не дает правильного ощущения и понимания сюжетов, если рассматривать его невооруженным глазом.

Если на такое кодированное изображение наложить линзовый растр, играющий роль ключа к коду, можно увидеть целостно воспринимаемые изображения. На упрощенной схеме (см. рис. 8) кодированное изображение содержит только два обычных изображения, но осталось достаточно много свободного места, где можно разместить еще несколько изображений.

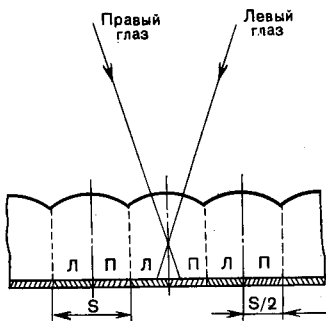


Рис. 14. Упрощенная схема распределения правых и левых изображений в кодированном изображении с одной стереопарой

Размеры элемента изображения, видимого через линзу растра, примерно в 10—20 раз больше по ширине, чем сам элемент, т. е. под каждой

линзой растра можно разместить еще 10—20 таких элементов, а линза позволит рассматривать их отдельно друг от друга.

Площадь, расположенная под одной цилиндрической линзой (рис. 14), называется зоной кодированного изображения. Число зон равно числу линз в растре. Оптическая ось каждой линзы делит зону пополам. Соответственно, каждая зона состоит из двух полузон. Все зоны кодированного изображения являются сдвинутыми относительно средней зоны симметрично по отношению к центру. Этот сдвиг тем больше, чем больше горизонтальный размер стереоизображения, поскольку нормальный базис B остается постоянным (см. рис. 10).

Если кодированное изображение содержит одну стереопару, распределение элементов изображения по полузонам относительно простое. Каждая полузона заполнена элементами одного, например, левого изображения стереопары,

тогда другая полузона заполнена элементами правого изображения стереопары. Наблюдение такого стереоизображения затрудняется необходимостью отыскания такой позиции, с которой наблюдается стереоэффект. Для этого следует поместить глаза в сравнительно небольшие зоны избирательного видения (см. рис. 11).

По такому принципу (одна стереопара изображений) работает безочковое стереокино с растровой сепарацией, разработанное С. Ивановым. В этих стереокинофильмах на экран проецируют только одну стереопару, в чем и состоит принципиальный недостаток такого рода стереоизображений. Более сложную структуру имеют изображения, содержащие не одну, а много стереопар. Здесь каждая зона заполнена информацией, причем элемент изображения в данной зоне может принадлежать как правому, так и левому изображению стереопары, в зависимости от позиции наблюдателя. Порядок размещения правых и левых элементов подобен во всех зонах изображения. Такой способ размещения информации легче понять по аналогии с клавиатурой рояля, которая разделена, как известно, на октавы. В нашей аналогии каждая октава соответствует зоне кодированного изображения, а двенадцать звуков октавы, каждому из которых соответствует определенная высота звука, соответствуют точкам, каждой из которых соответствует определенная степень принадлежности к левому или правому изображению стереопары.

Пусть наблюдатель смотрит двумя глазами сквозь линзовый растр на это кодированное изображение (рис. 15). Он видит в каждой зоне только два элемента a и b , причем расстояние между ними будет постоянным, а его величина зависит от базиса зрения, расстояния наблюдения и кривизны линз растра. Если наблюдатель сдвинется в сторону, то он увидит уже другие два элемента, разделенные тем же интервалом $a-b$. Два новых элемента представляют уже другую стереопару. Новый сдвиг — новая стереопара видна сквозь растр, причем одни и те же элементы стереопар могут использоваться многократно, входя в те

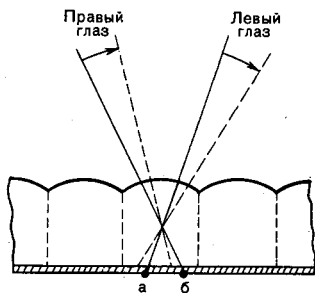


Рис. 15. Упрощенная схема распределения правых и левых изображений в кодированном изображении, содержащем много стереопар

или иные стереопары. Такая система кодированных стереоизображений получила название параллакс-панорамограммы. Очень важным ее свойством является возможность оглядывания объемных изображений с разных точек зрения и значительно увеличенные размеры зон стереовидения.

На рис. 16 сплошными линиями показаны крайние положения двух глаз наблюдателя, определяющие

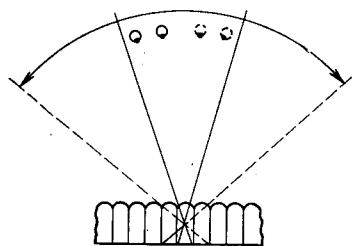


Рис. 16. Схема зон избирательного видения, если кодированное изображение содержит множество стереопар (сравните с рис. 11)

центральный сектор избирательного видения. Приближение или удаление глаз от стереоизображения не приводит к полной потере стереоэффекта, но несколько ухудшает его. Пунктирными линиями показаны боковые секторы избирательного видения, которые образуются, когда наблюдатель рассматривает сквозь линзу не ту зону, которая расположена под ней, а соседнюю. Все три сектора обычно сливаются воедино.

Итак, стереоизображение с параллакс-панорамограммой обеспечивает наблюдение объемных изображений в очень широком секторе, достигающем до 120° , что допускает подвижность наблюдателя и создает естественность восприятия.

Способы получения кодированного изображения

Рассмотрим основные отличительные особенности процесса фотосъемки при получении кодированных изображений. Возможны два пути: кодирование во время съемки объекта и кодирование стереопары, т. е. после предварительной съемки объекта двухобъективным или многообъективным аппаратом.

Схема, приведенная на рис. 17, поясняет процесс кодирования, выполняемый непосредственно во время съемки. Фотоаппарат оснащен двумя объективами 1 с центральными затворами. Позади объективов установлены призмы 2, предназначенные для нормализации базиса стереосъемки. Перед фотопленкой 3 установлен линзовый растр 4.

Если с помощью этого аппарата произвести экспонирование фотопленки, то на ней появится линейчатое кодированное изображение, в котором будут заключены два изо-

бражения стереопары, аналогичные показанным на рис. 9. Линзовый растр, установленный перед фотопленкой, разделяет изображение на элементы (линии), ширина которых в 10—20 раз меньше ширины линзы, т. е. всей зоны кодированного изображения. В каждой полузоне будет только один элемент изображения. Мы уже знаем, что для расширения зон избирательного видения необходимо полностью заполнять каждую полузону кодированными элементами изображения. Для этого необходим специальный механизм, который будет осуществлять смещение лучей света, образованных линзовым растром, относительно светочувствительной эмульсии во время экспозиции. Это смещение можно осуществить тремя способами: перемещением фотопленки относительно неподвижного растра; перемещением линзового растра относительно фотопленки; поворотом пленки и растра вокруг вертикальной оси симметрии пленки.

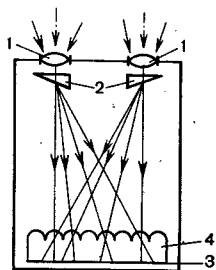


Рис. 17. Схема фотоаппарата, позволяющего во время съемки кодированное изображение, содержащее одну стереопару

К механизму предъявляют два основных требования:

1) за время экспонирования лучи, образуемые линзовым растром, должны переместиться поперек полузоны, не выходя за ее границы;

2) перемещение лучей света должно осуществляться с постоянной скоростью.

Указанные задачи весьма сложны и к настоящему времени еще не решены для малого времени экспозиции, например при моментальной съемке. Если же снимать статические объекты, когда возможна выдержка в несколько секунд, то механизм становится достаточно простым.

Процесс заполнения полузон кодированного изображения можно выполнить и в лаборатории, имея в качестве исходного материала одну стереопару. Результат будет таким же, как и в случае использования фотоаппарата (см. рис. 17).

Для этого используют стереоувеличитель, схема которого показана на рис. 18. Два фонаря 1 освещают два кадровых окна, где установлены негативы стереопары, например левое изображение 2 и правое 3. Два объектива 4 и 5 проецируют оба изображения на доску 6 увеличителя, причем для обеспечения совмещения обоих изображений перед

объективами установлены оптические клинья 7. На доске увеличителя лежит фотопленка 8 эмульсией вверх, а на фотопленке расположен линзовый растр 9, прижатый плоской стороной к светочувствительной эмульсии. Электродвигатель 10 с помощью ходового винта 11 может сдвигать растр на нужную величину. Соответственно, совместив изображения стереопары, можно экспонировать фотопленку при условии непрерывного сдвига растра во время экспозиции. В результате получают кодированное изображение со структурой, показанной на рис. 14. Этот способ имеет существенное преимущество, которое заключено в том, что стереопара снимается обычным двухобъективным аппаратом, например с выдержкой $1/30$ с, и возможна моментальная фотосъемка.

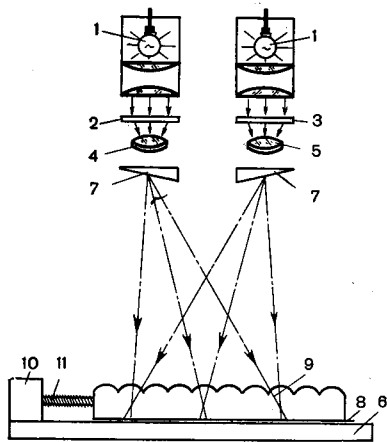


Рис. 18. Схема стереоувеличителя, позволяющего получить в лаборатории кодированное изображение с одной стереопары

Разновидностью моментальной фотосъемки с последующей шифровкой в лаборатории исходных плоских изображений в единое кодированное изображение является фотосъемка многообъективными фотоаппаратами. В настоящее время в патентной литературе описаны семиобъективные фотоаппараты. Было сообщение о постройке тринадцатипроекторной камеры, съемка которой дает комплект негативов или слайдов, содержащий множество стереопар. Такой комплект изображений является группой стереопар одного и того же сюжета, снятого во многих ракурсах.

Шифровка этих негативов или слайдов производится на многообъективном фотоувеличителе, схема которого представлена на рис. 19. Группа независимых проекторов 1 в количестве от 7 до 20 направлена на одну и ту же доску увеличителя, так что их оптические оси сходятся в одной точке. В каждом проекторе установлен один негатив или слайд из комплекта, снятого многообъективной камерой. На доске 2 находится фотопленка 3, поверх которой размещен линзовый растр 4.

Каждая линза растра изображает соответствующий кадр каждого проектора в форме элемента, но поскольку проекторов много, то и элементов изображений под каждой линзой набирается много. При большом количестве проекторов и достаточно широких элементах можно добиться заполнения всей зоны под линзой при неподвижном растре.

Существует еще один интересный и наиболее популярный сейчас способ получения кодированного изображения — съемка однообъективной фотокамерой и получение при этом объемного изображения с параллакс-панорамограммой.

Отличительная особенность этого способа в том, что съемку производят однообъективной фотокамерой, непрерывно перемещающая ее по горизонтальной дуге, в центре которой находится объект, в то время как все стереокамеры, описанные выше, в момент съемки неподвижны.

Схема фотосъемки однообъективной камерой показана на рис. 20. Объект 1 установлен перед объективом 2 на нужном расстоянии, например R . Перед фотоэмульсией 3 установлен линзовый растр 4, причем светочувствительная эмульсия находится в фокальной плоскости линз растра.

Плоская сторона растра прижата к эмульсии, но сила прижима не препятствует их взаимному скольжению. Корпус фотокамеры установлен на каретке 5, которая может перемещаться по рельсам 6, имеющим, например, вид дуги. Фотосъемку производят при равномерном и непрерывном движении камеры (по стрелке A) по дуге с радиусом R . Одновременно двигается и линзовый растр 4 (по стрелке a) относительно неподвижной фотоэмульсии 3. Затвор открывают в начале дуги и закрывают ее в конце, т. е. выдержка при такой съемке весьма длительная.

Экспонирование светочувствительной эмульсии в таком аппарате производится последовательно, линия за линией, причем этот процесс аналогичен накоплению множества

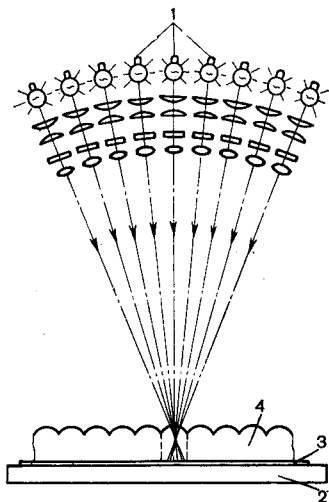


Рис. 19. Схема стереоувеличителя, позволяющего получить в лаборатории кодированное изображение, содержащее множество стереопар

линейчатых изображений в фотопленке. Вначале появляется одно (см. на рис. 8), затем рядом с ним, вплотную к первому — другое (см. на рис. 9), но это изображение уже будет отличаться от первого, поскольку весь аппарат сдвинулся на рельсах в сторону и теперь «смотрит» на объект уже с другой позиции. Затем вплотную к первым двум добавляется третье линейчатое изображение и т. д. Процесс

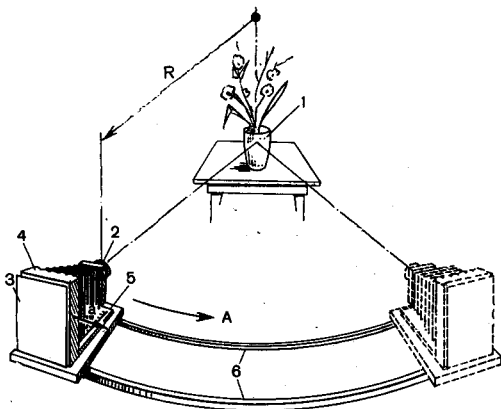


Рис. 20. Схема, поясняющая принцип действия растрового однообъективного фотоаппарата, позволяющего получить кодированное изображение, содержащее множество стереопар

регистрации идет непрерывно, так как перемещение аппарата по рельсам сопровождается синхронным сдвигом линзового раstra относительно фотопленки. В таком аппарате механизм смещает растр за время съемки на величину, равную ширине зоны. Сфокусированные лучи света (рис. 21) одновременно по всей площади кадра записывают различные ракурсные изображения объекта, но в пределах одной зоны запись ведется строго последовательно и только в одном направлении (сдвиг раstra по стрелке *a*).

Вернемся к рис. 8, из которого видно, что каждая деталь объекта проецируется объективом фотоаппарата на определенное место кадра и линзовым растром регистрируется на светочувствительной эмульсии в виде тонких линий с переменной плотностью почернения.

Таким образом, в параллакс-панорамограмме, получаемой при съемке однообъективным фотоаппаратом, произ-

водится уплотнение записи только в горизонтальном направлении.

Указанное уплотнение соответствует обычно неиспользованному резерву разрешающей способности светочувствительной эмульсии, поэтому для получения стереоскопических изображений с параллакс-панорамограммой вполне

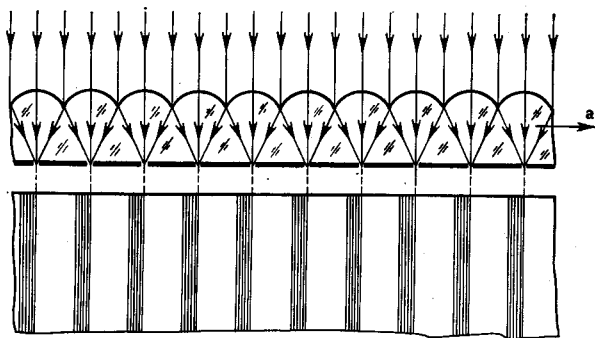


Рис. 21. Схема хода световых лучей сквозь съёмочный растр фотоаппарата и пояснение процесса последовательного экспонирования линейчатых участков фотоэмульсии, заполняющих в конечном итоге всю площадь

пригодны обычные фотоматериалы с разрешающей способностью 50 лин/мм (например, современные цветные многослойные фотопленки). Эта особенность выгодно отличает растровую стереофотографию от других методов синтеза объемных изображений.

Изобразительные и технические возможности растровой стереофотографии

Содержанием первых стереофотографий чаще всего являлись изображения натюрмортов, кукол и различных макетов. Это понятно, если учесть, что стереооткрытки по своим свойствам рассчитаны на неподготовленных зрителей. В этом случае главным является легкость восприятия стереоэффекта, без поиска особой позиции наблюдения или какой-либо настройки глаз. Этим условиям удовлетворяют только стереоизображения с параллакс-панорамограммой. Как известно, съемка параллакс-панорамограммы обычно производится с длительным временем экспозиции. В этих условиях наиболее доступным сюжетом является натюрморт, который можно снимать со сколь угодно длительной выдержкой.

Позднее научились снимать и пейзаж, но статический, поскольку время экспозиции осталось весьма длительным. Можно сделать и портрет при условии, что человек остается неподвижным в течение нескольких секунд, необходимых для съемки однообъективным стереофотоаппаратом.

Стремление к моментальной съемке привело к созданию многообъективных фотокамер, которые одновременно снимают 9—13 кадров. Эти негативы затем собирают фотографически воедино по схеме, показанной на рис. 19.

Известен способ моментальной съемки параллакс-панорамограммы с помощью объектива большого диаметра [1]. Диаметр объектива должен быть по крайней мере больше нормального стереоскопического базиса (65 мм). В этом случае ширина объектива по горизонтали заменяет перемещение всего корпуса фотоаппарата по горизонтали (см. рис. 20). Если, например, однообъективный фотоаппарат при съемке двигался по своим рельсам на расстояние 300 мм, то заменяющий это движение объектив должен иметь диаметр 300 мм. Трудности изготовления таких объективов очевидны. Однако в научных исследованиях, где стоимость аппарата и технологические трудности его изготовления не играют первостепенной роли, применение стереоаппарата с объективом большого диаметра может оказаться весьма эффективным. Моментальная съемка динамических объемных картин в свете мощной ксеноновой лампы-вспышки или импульсного лазера позволяет получить параллакс-панорамограмму, где во множестве ракурсов можно рассматривать изучаемую пространственную систему.

Параллакс-панорамограмма содержит избыточную информацию, распределенную среди множества стереопар, поэтому различные наложения снимаемых объектов не могут помешать разглядеть их все раздельно. Эффект оглядывания в научном варианте растрового стереоизображения может быть очень большим.

Ограниченный эффект оглядывания в выпускаемых стереооткрытках объясняется тем, что при полиграфическом воспроизведении существенно теряется резкость изображения. В конечном итоге, в одной зоне кодированного изображения на полиграфическом оттиске может содержаться самое большее четыре изображения при шаге растра 0,3 мм, поскольку максимальная разрешающая способность лучших полиграфических растров 12 лин/мм.

В то же время обычная светочувствительная эмульсия обеспечивает 100 и даже 500 лин/мм. Следовательно, при

соответствующей оптике параллакс-панорамограмма может содержать в той же зоне с шириной 0,3 мм почти 170 элементов (а не 4), т. е. около 80 стереопар. В случае применения черно-белой фотопленки с высокой разрешающей способностью, например типа «Микрат», параллакс-панорамограмма может обеспечить высокую стереоскопичность изображения при большом угле оглядывания, что делает ее пригодной даже для количественных измерений сложных пространственных динамических систем.

Для стереофотосъемки объектов научного исследования важным параметром является глубина резко изображаемого пространства. Следует отметить, что применяемые сейчас обычные фотоаппараты доказали свою приемлемость как средство регистрации плоских изображений. Аналогичная оптика может быть использована и для стереофотосъемки.

Принцип съемки параллакс-панорамограммы однообъективным аппаратом (см. рис. 20) может быть реализован и в малоформатном варианте с короткофокусным объективом. Параллакс-панорамограмма малого формата, например 24×36 мм, может быть затем увеличена до нужного формата. При этом следует придерживаться простого правила: кратность увеличения должна быть равной отношению шага декодирующего растра к шагу съемочного растра.

Поясним это правило примером. Пусть шаг съемочного растра 0,1 мм, а шаг декодирующего растра 1 мм, тогда допустимо только десятикратное линейное увеличение. Если негатив параллакс-панорамограммы имеет формат 24×36 мм, то формат увеличенного стереоизображения будет равен 24×36 см. На увеличенном стереоизображении, разумеется, будет та глубина резко изображаемого пространства, которая была получена на исходном кадре при использовании короткофокусного объектива (34 или 50 мм). Таким образом, глубина пространственных сцен, которую можно зафиксировать методами растровой стереоскопической фотографии, определяется известными возможностями современной съемочной оптики.

В целом растровая стереофотография, ее технические параметры ничем не отличаются от обычной плоской фотографии, но на изображениях появляется третье измерение, т. е. глубина изображаемого пространства. Достигается это только лишь за счет некоторого усложнения аппаратуры и более полного использования возможностей светочувствительной эмульсии при повышении плотности записи информации.

Интегральная фотография

Принцип интегральной фотографии Липпмана

Принцип интегральной фотографии был предложен в 1908 году Г. Липпманом [3]. Метод такой фотографии был назван так потому, что изображение сфотографированного предмета суммируется (интегрируется) из мно-

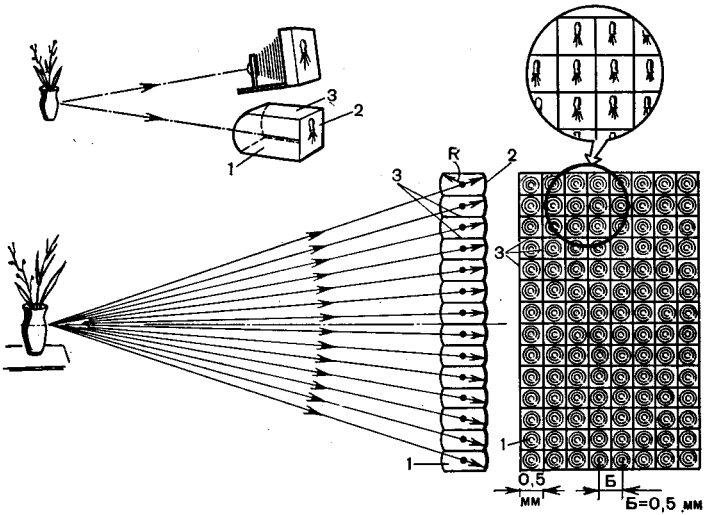


Рис. 22. Общая схема интегральной фотографии. Сверху показано, что действие каждой ячейки интегральной пластинки аналогично действию отдельного фотоаппарата, а пара соседних ячеек является стереокамерой

жества маленьких изображений размером $0,4 \times 0,4$ мм и меньше. В каждом кадрике содержится полное изображение объекта со всеми его деталями. Однако при рассмотрении интегральной фотографии глаз человека не видит этих микроизображений, но они, суммируясь оптически, воссоздают пространственное изображение.

На рис. 22 изображена схема фотографирования с помощью интегральной пластинки Липпмана. Пластинка состоит из большого количества линз 1, с двумя сферическими поверхностями. Одна поверхность, играющая роль объектива, обращена к объекту, а на другую, заднюю сферическую поверхность нанесена светочувствительная эмульсия 2. Все линзы отделены друг от друга непрозрачными перегородками 3. Изображение объекта фокусируется каждой линзой на эмульсию.

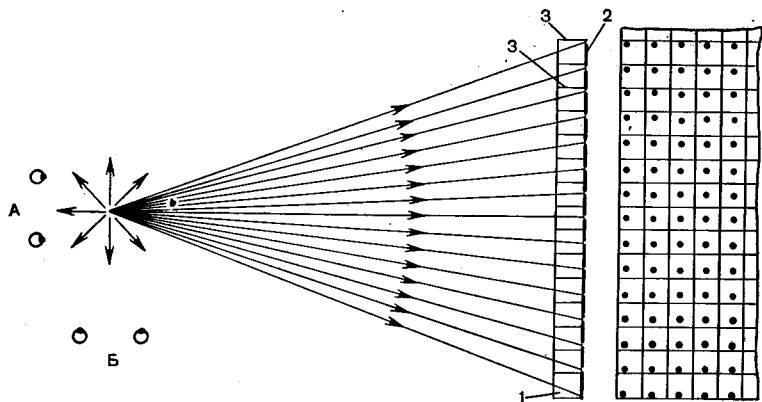


Рис. 23. Схема фотографирования светящейся точки с помощью интегральной пластинки

Таким образом, каждая линза с перегородкой и светочувствительной эмульсией является своего рода сверхминиатюрным фотоаппаратом. Они плотно прилегают друг к другу и заполняют все поле интегральной фотопластинки, размеры которой должны быть достаточно большими, чтобы ее можно было рассматривать с относительно большого расстояния, не различая этих микролинз.

На том же рисунке схематично показан увеличенный фрагмент участка светочувствительной эмульсии пластинки Липпмана с проявленными микроизображениями. Фото съемка производится без какого-либо дополнительного объектива, поскольку каждая линза действует независимо как объектив, но так как у этих микрофотоаппаратов нет затвора, нужная экспозиция должна быть получена с помощью какого-то затвора, открывающего и закрывающего всю интегральную фотопластинку.

Чтобы упростить понимание процессов фотографирования и восстановления интегрального изображения, заменим линзы маленькими отверстиями. Именно с помощью таких отверстий П. Соколов воспроизвел в 1911 году процессы интегральной фотографии [1, 4].

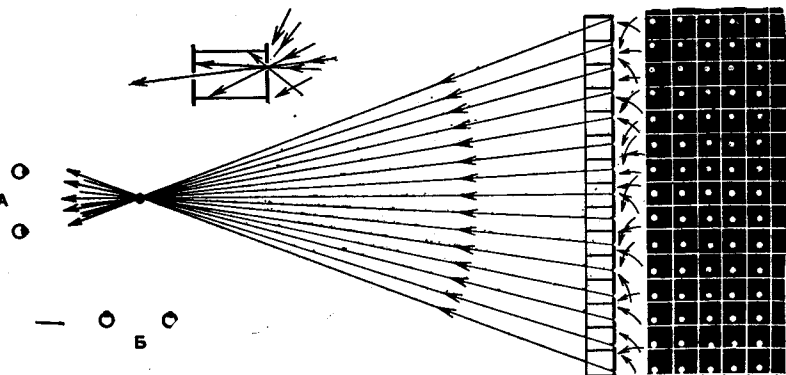


Рис. 24. Схема восстановления интегрального изображения точки

На рис. 23 упрощенно показана схема фотографирования светящейся точки с помощью интегральной пластинки. Лучи света попадают на светочувствительную эмульсию в каждой микрофотокамере и фиксируют изображение точки. Поскольку микрофотокамеры находятся в разных местах на большой интегральной фотопластинке, изображения точек окажутся на различных участках эмульсии, что нетрудно заметить. Этот разброс точек изображения по площади светочувствительной эмульсии в каждой элементарной ячейке подчиняется закону параллакса. Каждая пара изображений является миниатюрной стереопарой с базисом, равным диаметру линзы, например 0,4 мм. В отличие от двухобъективного аппарата, в интегральной фотопластинке регистрируются не только горизонтальные, но и вертикальные параллаксы, благодаря чему эффект оглядывания возможен и по вертикали (позиции рис. 23 совпадают с рис. 22).

Экспонированную интегральную пластинку с изображением точки проявляют с обращением, чтобы получить позитивное изображение. В нашем случае позитивом явится черное поле всего кадрика с единственной прозрачной точкой, как показано на рис. 24. В линзовой части условные объективы расположены регулярно (по сетке), а в

эмульсионном слое прозрачные точки расположены различным образом, в зависимости от геометрических условий экспонирования.

Восстановим интегральное изображение точки. Для этого нужно осветить рассеянным светом интегральную пластинку со стороны эмульсии. В каждой микрокамере интегральной пластинки можно условно считать, что есть только два отверстия, сквозь которые может пройти узкий луч света. Одно из них находится на передней плоскости, а другое — на задней плоскости, и они удалены друг от друга на значительное (по сравнению с диаметром отверстий) расстояние, поэтому в паре составляют своеобразный коллиматор*.

На схеме одной ячейки (рис. 24) показано, как этот коллиматор выбирает из пучка диффузно рассеянного света, падающего на пластинку со стороны эмульсионного слоя, только один прямой луч определенного направления, которое обусловлено в основном положением прозрачной точки на задней, эмульсионной стороне интегральной пластинки. Положение прозрачных точек на светочувствительной эмульсии определяется положением объекта (в данном случае светящейся точкой) и размерами интегральной пластинки.

Следовательно, направление каждого луча, прошедшего сквозь проявленную интегральную пластинку (множество микроколлиматоров) определено условиями фотографирования.

В итоге лучи света, выделенные интегральной пластинкой при восстановлении изображения, сходятся в одной точке, как показано на рис. 24. Рассматривая глазами пространство перед пластинкой (положение А), мы увидим светящуюся точку, поскольку лучи света будут попадать в наши глаза точно так же, как и в случае рассматривания реальной светящейся точки. Более того, смещаясь в любую сторону на относительно небольшое расстояние, при неподвижной пластинке, когда оба глаза будут находиться в пределах определенного угла, мы будем видеть эту точку висящей в пространстве в том же самом месте, где находилась светящаяся точка при фотографировании ее интегральной пластинкой: появляется эффект оглядывания. Следует отметить, что, как и в случае параллакс-панорамограммы, угол оглядывания невелик. Стоит только

* Коллиматор — оптическое устройство для создания пучка параллельных лучей.

поставить глаза в положение *В*, и точка уже не будет видна, что, естественно, не относится к реальному объекту, хорошо наблюдаемому и с позиции *В* (см. рис. 23) и с любой другой позиции вокруг этой светящейся точки.

Рассмотрим некоторые особенности восстановленного интегрального изображения. Если в точку, где все лучи сошлись, поставить матовое стекло, то на нем будет видна яркая светящаяся точка, а если поместить фотопластинку, то после экспонирования и проявления на ней будет зафиксирована одна черная точка, т. е. обычный негатив, поэтому это изображение называют действительным.

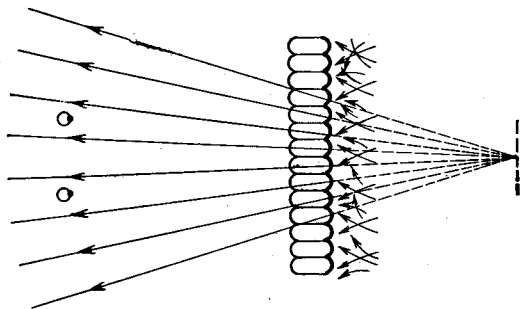


Рис. 25. Схема образования мнимого интегрального изображения

С помощью интегральной пластинки можно получить и другой тип изображения, когда лучи света начинают расходиться от плоскости интегральной пластинки (рис. 25). Продолжение этих лучей (показано пунктиром) создает иллюзию нахождения изображения объекта позади пластинки. Если мы там поставим фотопластинку (см. пунктир), то на пластинке ничего не зафиксируется, в связи с чем и принято называть это изображение мнимым. Мнимое изображение может быть получено оптической печатью с интегральной негативной пластинки на интегральную позитивную, что также было предложено Липшманом.

Интегральное изображение замечательно тем, что оно (точка на рис. 24) существует в пространстве как оптическая копия оригинала и обладает его оптическими свойствами, правда в ограниченном угле наблюдения. Такое изображение имеет еще особое свойство, которое заключается в том, что по мере удаления от него наблюдателю кажется, что оно уменьшается, а по мере приближения —

увеличивается. Об этом интересном эффекте Липпман писал еще в своем первом сообщении [3].

Приведенная на рис. 24 схема восстановления интегрального изображения точки, произвольно помещенной в пространстве, поможет читателю понять суть восстановления объемного изображения сложного предмета. Любой сложный предмет может рассматриваться как совокупность точек, распределенных в пространстве, но не произвольно, а вполне определенно. Вазочка с цветами (см. рис. 22) — это тоже совокупность точек, образующих ее поверхность. Каждая точка этой поверхности отражает падающий на нее свет и превращается таким образом в источник света. Зафиксировав на светочувствительной эмульсии интегральной пластинки изображения всех этих бесчисленных точек, получим интегральный позитив в плоскости, а восстановив интегральное изображение, получим объемное интегральное изображение, т. е. наблюдатель может увидеть вазочку с цветами, находящуюся в пространстве перед интегральной пластинкой. Это будет оптическая копия объекта съемки.

В приведенных пояснениях ничего не было сказано об интенсивности суммирующихся лучей. В случае таких моделей, как самосветящиеся точки, для простоты изложения интенсивность их свечения была принята одинаковой. Однако при съемке реальных предметов, например вазочки с цветами, освещенной посторонним источником света, неизбежно появится светотень, а микроизображение на фотоэмульсии будет полутоновым.

Схему на рис. 24 можно представить в новом варианте, с полутонами, т. е. интенсивность лучей, образующих одну точку, равна какому-то значению, а интенсивность другой совокупности лучей имеет уже другое значение. Нетрудно видеть, что, располагая в пространстве точки различных интенсивностей, можно создать объемное изображение предмета с нужным распределением светотеней.

Приведенные пояснения сущности интегральной фотографии опирались на схемы построения с интегральными пластинами, где линзочки были заменены маленькими отверстиями. Эти отверстия не условный прием для популярного изложения. Они были использованы вместо линз при интегральной фотосъемке П. Соколовым и другими исследователями. Однако светосила таких «объективов» настолько мала, что в качестве объекта можно было использовать только ярко светящуюся нить лампы накаливания, поэтому практически следует вернуться к линзам.

Интегральное изображение можно получить с помощью линзового растра, состоящего из множества сферических линз, например размером $0,5 \times 0,5$ мм. Количество линз в растре форматом 100×100 мм будет 40 000, а если взять формат фотоснимка 18×24 см, то будет 172800 линз. На эмульсионном слое при съемке фиксируется такое же число полных изображений объекта — микрокадров.

Если, например, фотопленка была отделена от линз для проявления, то трудности совмещения матрицы из 172 800 кадров с таким же количеством объективов линзового растра вполне очевидны. Поэтому Липпман и все, кто повторял его опыты с интегральной фотографией, не решались отделить пленку от линзового растра. Эмульсионный слой наносили на линзовый растр и обрабатывали фотоизображения, не отделяя эмульсию от растра.

Такой способ съемки обеспечивает оптимальное совмещение линзового растра с микрокадриками, но порождает особое свойство восстановленного интегрального изображения. Это изображение псевдоскопическое (т. е. перевернутое по сравнению с объектом), создающее псевдостереоэффект* и обратное движение деталей объекта при оглядывании. Поскольку Липпман и другие ограничивались в своих экспериментах простейшими объектами, они не сразу заметили это явление, но позднее был обнаружен псевдостереоэффект интегрального изображения.

Причину этого явления можно понять, выделив из бесчисленного множества микрофотоаппаратов интегральной пластинки только два с базисом *B* (см. рис. 22).

Две жестко соединенные фотокамеры, имеющие общую фотопленку и делающие одновременную съемку, дают псевдостереопару.

Первое решение, устраняющее псевдоскопию, предложил Липпман. Ортоскопическое** интегральное изображение получается при двухступенчатом процессе, когда сначала снимают негативное изображение по схеме на

* Под псевдостереоэффектом в данном случае понимают явление, при котором левые изображения видны правым глазом, а правые — левым.

** Ортоскопическое — стереоизображение с нормальным стереоэффектом.

рис. 22, а затем печатают с него позитив. Однако печать ведут не контактным способом, как в обычной фотографии, а оптическим (рис. 26), причем позитивным фото материалом является такая же интегральная пластинка Липпмана. Над позитивной интегральной пластинкой 1, обращенной линзами вверх, устанавливают на определенном расстоянии негативную интегральную пластинку 2,

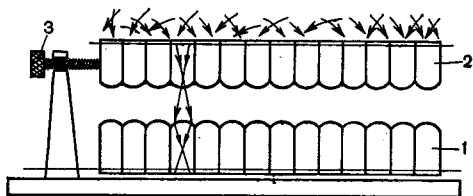


Рис. 26. Схема двойного линзового растра для получения ортоскопического интегрального изображения

обращенную линзами вниз, а негативным эмульсионным слоем вверх. Затем оба растра тщательно совмещают, изменяя ориентацию, например негативного растра, микрометрическими винтами 3 в двух взаимно перпендикулярных направлениях, да еще поворачивая растр вокруг центра в горизонтальной плоскости. Необходимо добиться, чтобы все линзы обоих растров оказались на общих оптических осях. Если растры не совмещены по оптическим осям, появляется муаровая сетка, налагающаяся на изображение. Совместив растры, освещают негатив 2 сверху белым рассеянным светом, экспонируя тем самым позитивную интегральную пластинку 1.

При оптическом копировании происходит перевертывание каждого отдельного изображения (см. рис. 26). Эта операция соответствует разрезанию и перестановке кадров стереопары.

Следует отметить, что оптическая копия возможна только в случае, если удалось совместить линзовые растры. Липпман экспериментировал с небольшими фрагментами интегральных пластинок, где ячейки были относительно большими, примерно 5 мм в диаметре, и были только грубой моделью, пригодной для лабораторного исследования. Если же у растра ячейка имеет размер $0,5 \times 0,5$ мм и таких ячеек в одной пластинке многие тысячи, точность совмещения должна находиться в пределах $1/1000$ мм. К то-

му же растр обладает неустранимым разбросом его шага. Следовательно, в практическом аспекте совмещение двух линзовых растров дело, по-видимому, безнадежное, даже если бы удалось изготовить два идентичных по шагу растра, что тоже сомнительно.

Весьма остроумное решение, устраняющее указанные трудности, было предложено спустя 60 лет после опытов Липпмана [5]. Суть этого решения заключается в том, что с помощью специального экрана создают полное псевдоскопическое интегральное изображение, причем это действительное изображение. А поскольку оно действительное, его можно вновь сфотографировать на интегральную

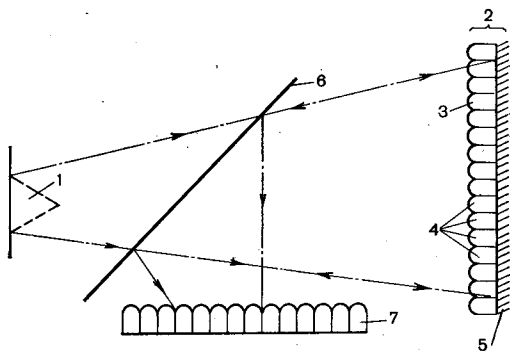


Рис. 27. Схема получения ортоскопического интегрального изображения путем оптической инверсии псевдоскопического изображения

пластинку. При этом происходит дополнительное перевертывание каждого микроизображения. Проявив эту эмульсию с обращением, получают позитивное ортоскопическое интегральное изображение.

Схема устройства для оптической инверсии показана на рис. 27. Объект 1, например конус, освещен со стороны (или сам светится), а отраженные им световые лучи падают на экран 2, составленный из множества микролинзочек 3, разделенных перегородками 4, т. е. это обычная интегральная пластинка Липпмана, но вместо фотоэмульсии в общей фокальной плоскости линзочек установлена зеркальная поверхность 5. Световые лучи, пройдя сквозь преломляющую поверхность каждой линзочки, образуют на зеркальной поверхности микроизображение объекта, которое отражается зеркалом. Лучи, пройдя вторично сквозь преломляющую поверхность линзочек, образуют в

пространстве перед экраном 2 интегральное изображение. Это изображение, разумеется, будет псевдоскопичным, поскольку процессы, происходящие в экране 2, аналогичны одноступенчатому процессу интегральной фотографии, а именно: проход лучей от объекта к зеркалу — фотографирование, а проход лучей от зеркала обратно — восстановление действительного изображения. Далее все лучи действительного изображения отбрасываются полупрозрачным зеркалом 6 на интегральную пластинку 7, которая фотографирует еще раз интегральным способом это псевдоизображение, обращая его в ортоскопическое при последующем восстановлении в белом рассеянном свете.

Нетрудно видеть, что при этом способе необходимость совмещения двух линзовых растров отпадает, так как положение интегральной пластинки 7 уже не играет никакой роли. Пусть она сдвинется в любую сторону на любое расстояние, при этом изображение объекта будет сфотографировано в другом ракурсе, и только.

Схему инверсии можно применить как при фотосъемке, так и при рассматривании изображений.

Для инверсии псевдоизображения была также предложена схема сдвоенного линзового раstra [6]. Перед интегральной пластинкой, состоящей из линз и светочувствительной эмульсии, установлен еще один линзовый растр, удаленный от интегральной пластинки на расстояние, большее фокусного расстояния линз этого раstra. Благодаря этому в воздушном промежутке между растрами каждое элементарное изображение объекта перевертывается, т. е. инверсия интегрального изображения происходит в процессе экспонирования интегральной пластинки. Теперь при восстановлении интегрального изображения рассеянным светом создается ортоскопическое объемное изображение предмета.

Этот способ обладает тем же недостатком, что и предложенный Липпманом способ оптического копирования интегральных изображений — здесь неизбежна крайне кропотливая операция совмещения двух линзовых растров.

Техника и материалы интегральной фотографии

С момента изобретения интегральной фотографии в 1908 году последователи Липпмана ограничивались только лишь проверкой ее принципов, сооружая различные устройства, характерные для лабораторного физического эксперимента.

Техники, подобной обычной фотографической, в интегральной фотографии пока не существует, хотя многие энтузиасты предпринимали попытки «оживить» интегральную фотографию. Причиной этого являются технические трудности, которые до настоящего времени еще не удалось преодолеть. Среди них следующие:

1) процесс изготовления линзовых растров очень сложен, причем оптимальная структура растров еще не реализована;

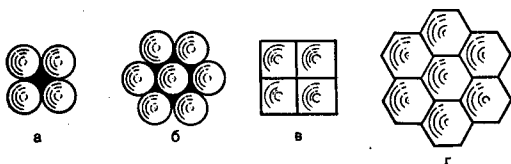


Рис. 28. Основные разновидности линзовых растров для интегральной фотографии

2) для получения нормального качества микроизображений требуется светочувствительная эмульсия с высокой разрешающей способностью;

3) проблему цвета в интегральном изображении пока даже не пытались решить из-за ее сложности.

Линзовые растры являются двумерной матрицей сферических линз. Заметим, что рассмотренные в предыдущих главах способы растровой стереофотографии основаны на применении матриц, составленных из цилиндрических линз, способы изготовления которых относительно просты. Изготовление же сферических линзочек не только само по себе сложно, но и порождает новую проблему — осуществление нулевого стыка между линзами в двух измерениях.

На рис. 28 показаны варианты взаимного расположения линзочек в растре: *a* — квадратное расположение, *б* — гексагональное. Очевидно, при квадратном расположении нерабочая площадь, зачерченная на рисунке, больше, чем при гексагональном. Растр с такими нерабочими участками обладает существенным недостатком: сетка из этих темных участков просматривается при восстановлении интегрального изображения, нарушая его слитность, что производит неприятное впечатление. В связи с этим при изготовлении линзовых растров следует стремиться к нулевой площади нерабочих (неактивных) участков растра.

На рис. 28, *в* и *г* показаны те же два вида расположения линз с нулевой неактивной площадью. Трудности изготовления таких растров существенно возрастают.

Способы изготовления линзовых растров со сферическими линзами чрезвычайно сложны и кропотливы. Простой и доступной технологии пока нет, что ограничивает число лиц, имеющих возможность заниматься экспериментами по интегральной фотографии. Наилучших результатов в изготовлении линзовых растров со сферическими линзами добился С. Иванов [7], но опыты по интегральной фотографии не получили должного развития на основе его растров.

Необходимо рассмотреть еще одну особенность работы линзового раstra в качестве интегральной пластинки. Все линзовые растры, изготовленные в виде монолита, не имеют, естественно, перегородок между линзами, которые показаны на рис. 28 и в других схемах. Это приводит к тому, что при падении лучей света на элементарные линзочки за пределами критических углов поле микроизображения выходит за площадь микрокадра. В результате соседние микрокадры на части своей площади получают двойную экспозицию, т. е. изображения одного и того же объекта частично перекрываются.

При восстановлении интегрального изображения это создает сильные помехи [8], для предотвращения которых необходимы непрозрачные перемычки между линзочками раstra. Перемычки должны проходить сквозь весь растр, от поверхности линз до эмульсионного слоя, создавая тем самым миниатюрные фотокамеры, изолированные друг от друга.

Для растровой стереофотографии эта задача, применительно к раstrу с цилиндрическими линзами, решается относительно просто. Контролируют величину сдвига раstra, не допуская перехода через границы зон кодированного изображения.

Однако в случае интегральной пластины экспонирование производится одновременно по всей площади эмульсионного слоя, и здесь нужно либо ограничивать апертуру падающих лучей в нужной мере, либо ввести упомянутые перемычки, которые не допустят перехода изображений из одной зоны в другую. Оба решения задачи связаны с серьезными техническими трудностями.

Эмульсионный слой, где регистрируется каждое микроизображение, должен иметь очень высокую разрешающую способность. Для оценки требований к эмульсии, обеспе-

чивающей возможность получения интегрального изображения, сравним хорошо известные фотолюбителям кадры малоформатного фотоаппарата типа «Зенит» 24×36 мм и среднего кадра из матрицы интегральной пластинки $0,5 \times 0,5$ мм. Исходя из разрешающей способности обычной цветной негативной или обратимой фотопленки, равной в среднем 50 мм^{-1} , вычислим число точек в изображении для каждого из кадров. В наших рассуждениях пренебрежем разрешающей способностью объективов, которая заведомо меньше, чем для пленки, поскольку нужен только относительный результат. Из простейших расчетов следует, что изображение кадра 24×36 мм содержит 2 160 000 элементов. Следует отметить, что этого достаточно большого количества едва хватает для получения удовлетворительного по качеству изображения. Микрокадр $0,5 \times 0,5$ мм будет содержать только 625 элементов. Большая разница в качестве этих двух кадров очевидна.

При восстановлении интегрального изображения имеет место очень большое линейное увеличение. Пусть, например, воссоздадут интегральное изображение с пластинки, где в связи с применением обычной цветной фотопленки в каждом кадрике содержится всего 625 точек. Если интегральная пластинка имеет размер 25×25 см, то увеличение изображения кадрика (размером $0,5 \times 0,5$ мм) до размера 250×250 мм будет равным 500. Увеличение в 500 раз такого мозаичного изображения приведет к резкому ухудшению фотографического качества.

Очевидно, для качественного интегрального изображения желательно получить высокоразрешающий микрокадр. Полагая, что такое изображение должно содержать не менее чем 2×10^6 элементов (как на негативе формата 24×36 мм цветной негативной пленки), вычислим нужную разрешающую способность для кадра размером $0,5 \times 0,5$ мм.

Предположим, что на длине $0,5$ мм располагается 1000 элементов и они должны быть зафиксированы светочувствительной эмульсией, следовательно, ее разрешающая способность должна быть равной 2000 мм^{-1} .

Это обстоятельство создает значительные трудности, препятствующие реализации интегральной фотографии, поскольку выпускаемые высокоразрешающие фотопленки не цветные.

В настоящее время налажено производство высокоразрешающих пленок, которые обеспечивают разрешение 2000 мм^{-1} и даже больше. Разумеется, эти пленки или

пластинки можно использовать для интегральной фотографии, однако такие фотослои обладают крайне низкой светочувствительностью, приблизительно равной 0,003 ед. ГОСТ.

При обычной съемке фотолобитель в худшем случае пользуется фотопленкой светочувствительностью 22 ед. ГОСТ. Если сравнить эти цифры, отличающиеся почти в 7000 раз, то очевидно, что при применении таких высоко разрешающих пленок необходимо очень большое время экспозиции, которая достигает нескольких минут [8].

Из сказанного выше следует, что низкая чувствительность фотоэмульсии существенно снижает изобразительные возможности интегральной фотографии, причем проблема чувствительности не может быть просто решена. Известно, что, выигрывая в чувствительности, мы неизбежно теряем в разрешающей способности, и наоборот. Поскольку для интегральной фотографии решающим является разрешающая способность, то приходится мириться с малой чувствительностью.

К сожалению, это еще не все трудности, связанные с возможностью получения микроизображений. Упомянем здесь еще две, хотя на самом деле их больше.

Из самого принципа интегральной фотографии вытекает необходимость получения элементарного изображения, обладающего всеми деталями сфотографированного объекта. Известно, что детали в полутоновом изображении могут быть переданы удовлетворительно, если светочувствительная эмульсия обладает достаточной фотографической широтой. Широта тем меньше, чем выше контрастность эмульсии. Высокора разрешающие фотослои обладают особенно большой контрастностью, что неизбежно сужает фотографическую широту. Проявление интегральных фотопластинок с обращением еще больше уменьшает фотографическую широту. В целом, получить нормальную передачу градаций, полутонов на высокоразрешающих фотоматериалах в настоящее время, по-видимому, невозможно.

Все соображения, особенно те, которые относятся к четкости изображения в микрокадре, были отнесены только к фотопленке и ее свойствам. Требуя, чтобы фотопленка передала изображение с четкостью 1000×1000 строк, мы ничего не сказали о том, откуда такое изображение возьмется. Совершенно очевидно, что оптические элементы, создающие изображение, должны обладать не меньшей, чем пленка, разрешающей способностью.

Известно, что в микрофотографии [9] для этого используется высокоразрешающий микроскоп с многокомпонентным корригированным объективом.

В интегральной фотографии вместо микроскопа с тщательно корригированной оптикой применяется простейшая плоско-выпуклая линза с единственной преломляющей поверхностью. Эта положительная линза характеризуется всеми аберрациями, которые определяют размеры кружка рассеяния в плоскости эмульсии. В итоге все вычисленные для примера количества передаваемых в микроизображении элементов не будут воспроизводиться таким простейшим объективом, как линза интегральной пластинки. При восстановлении интегрального изображения в обратном ходе лучей света каждый элемент на фотоэмульсии, размытый из-за несовершенства линзы, будет давать свой, еще более увеличенный кружок рассеяния при наблюдении. Следовательно, изображение будет низкого качества.

Известные работы по интегральной фотографии, даже самые современные [5, 8], не затрагивают вопроса о цветном интегральном изображении. Действительно, разрыв между реальной разрешающей способностью лучшей цветной обрабатываемой пленки типа «Орвоколор» с разрешающей способностью 100 мм^{-1} и требуемой разрешающей способностью 2000 мм^{-1} слишком велик. При взгляде на эти две цифры можно даже потерять веру в то, что интегральная фотография станет когда-либо цветной. В то же время, современное объемное изображение должно быть цветным. Это бесспорно, так как окружающий нас мир мы видим цветным и к этому привыкли.

Современные изобразительные средства, например кино, телевидение и полиграфические открытки, приучили нас также к цветному изображению. Черно-белые изображения терпимы в кино, в книжной графике, но никто не станет смотреть на объемные черно-белые изображения, тем более что выпускаемые стереоскопические открытки известны нам только в цвете, причем цвет очень хороший.

В связи с этим в следующем параграфе будет рассмотрена одна из потенциальных возможностей получения цветного интегрального изображения, которая экспериментально никем не проверялась, но при надлежащей проработке сможет, по-видимому, обеспечить получение цветных интегральных фотографий.

Все рассмотренные фотографические процессы и все практические приемы, известные фотолюбителям, основаны только на одном свойстве света — его воздействии на светочувствительную эмульсию. Под воздействием световых лучей в эмульсии образуется скрытое изображение, которое с помощью проявителя переводится в видимое изображение. Для образования этого изображения, т. е. локальных потемнений, пропорциональных интенсивности света в той или иной точке фотоэмульсии, используется лишь суммарная энергия света, усредненная за некоторый промежуток времени. Волновая природа света при этом никак не используется и не влияет на режим фотосъемки.

Хотя такой принцип работы более ста лет служит фундаментом классической фотографии, он не является единственным способом регистрации изображений. Умелое использование волновой природы света открывает необычайные возможности перед фотографией.

В течение долгого времени крупнейшие физики спорили и различным образом объясняли природу света. Одни считали, что свет это поток частиц, а другие говорили, что свет это волна. Теорию света как поток частиц — корпускул — излагал Ньютон, а первым, кто выдвинул волновую теорию света, был Гюйгенс [10], но спор продолжался.

И все же волновые свойства света были практически обнаружены и наглядно показаны еще в 1802 году Юнгом. Поскольку световые колебания непосредственно наблюдать невозможно, Юнг нашел способ доказать их существование косвенным путем. Для понимания материала, изложенного далее в этой книге, необходимо вспомнить основные понятия в области волновых процессов. Начнем с самого наглядного примера.

Что такое волна? Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо вспомнить, как бегут волны по полю спелой ржи под порывами ветра. Мы хорошо видим поступательное движение этих волн, но отлично знаем, что каждый стебель ржи остается на месте. Так что же движется? Особенностью процесса здесь является то, что движется не вещество, а состояние вещества. Колоски только качаются на стеблях. Если взять другой пример — волны на воде, то и здесь частицы воды движутся вверх и вниз, а волна, пробегающая по поверхности пруда или бассейна, не является движением воды в направлении движения волны. Оба ви-

да упомянутых волн являются только лишь моделями процессов, где движется не само вещество, а энергия, распространяющаяся в веществе. Это правило о движении одной лишь энергии не зависит от вида среды, в которой она распространяется, т. е. распространение механической энергии в виде волн на воде, или звуковых волн в воздухе, или электромагнитных световых волн в пространстве — все это распространение энергии, а не среды, и все это волновые процессы.

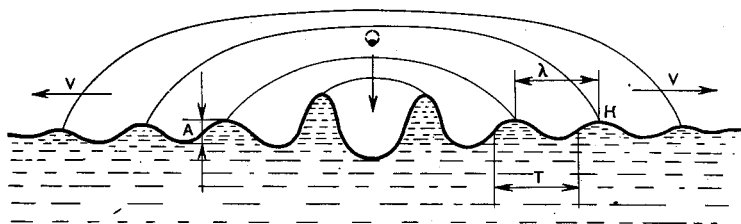


Рис. 29. Пример образования волн на поверхности воды и их основные параметры

Бросим на спокойную, зеркально-гладкую поверхность воды бассейна небольшой камушек. На поверхности воды образуются расходящиеся кругами волны, которые движутся от источника (места падения камушка) во все стороны с определенной скоростью. Одним из важных параметров этого процесса является длина волны, обозначаемая буквой λ , т. е. расстояние между двумя соседними гребнями волн; расстояние между средними точками волны, как показано на рис. 29, называют периодом волны и обозначают T .

Если в точке K , положение которой неизменно относительно краев бассейна, отмечать прохождение гребней волн, то можно заметить, что, чем больше расстояние между гребнями волн, тем реже гребни будут проходить через эту точку. Частота прохождения гребней через точку K и есть частота колебаний, обозначаемая обычно буквой f . Очевидно, чем больше скорость распространения v , тем больше будет частота f , а чем больше длина волны λ , тем меньше будет частота при том же значении v . Высоту гребня волны относительно впадины, обозначенную на рис. 29 буквой A , называют амплитудой колебаний. Очевидно, что, если мы бросим в воду не маленький, а большой камень, амплитуда будет больше, чем в первом случае.

Бросая камушки в воду и присматриваясь к происходящим волновым процессам, можно установить некоторые их особенности. Так, круговая волна пересекает бассейн приблизительно за одно и то же время при повторении опыта, если условия бросания камушков одинаковы. Из этого следует, что скорость распространения волн постоянна для данной среды. Действительно, волны на водной поверхности распространяются настолько медленно,

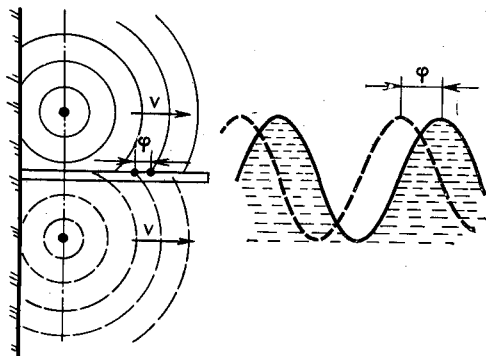


Рис. 30. Схема, поясняющая образование фазового сдвига в волновых процессах

что мы без напряжения прослеживаем взглядом их движение. Колебания воздуха, т. е. звуковые колебания, распространяются со скоростью свыше 965 км/ч, а световые колебания имеют скорость примерно 300 000 км/с. Приведенный пример определения одного из физических параметров колебательного процесса показывает, что даже примитивный инструмент исследования (бассейн и камушки) может быть полезным в наглядном представлении других параметров, которые нам необходимо понять при рассмотрении принципа цветной фотографии Липпмана и рассматриваемой далее голографии.

Весьма важным параметром волнового процесса является фаза колебаний. Воспроизведем этот параметр в бассейне. Разделим бассейн так, чтобы волны не влияли друг на друга, для чего установим в воде перегородку, выступающую над поверхностью воды. Бросим в каждую часть бассейна по камушку, чтобы возбудить две волны. При этом оба камушка бросим в одно и то же место относительно стенок бассейна. Кроме того, один камушек бросим чуть-чуть позже другого.

На рис. 30 показаны обе волны, причем круговые гребни волны от первого камушка показаны сплошными линиями, а круговые гребни другой волны от брошенного позже камушка показаны пунктирными линиями. Выберем произвольную точку на перегородке, разделяющей бассейн. Очевидно, поскольку скорость распространения волн в бассейне постоянна и одинакова для обеих частей бассейна, гребень второй волны от запоздавшего камушка

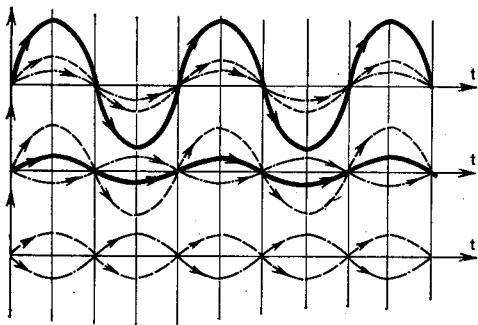


Рис. 31. Схема интерференции волн в различных случаях

будет проходить через эту точку тоже с некоторым запаздыванием. Это запаздывание называют фазой и обозначают буквой φ . На рис. 30 справа показан профиль обеих волн в плоскости перегородки. Если рассматривают две таких волны совместно, о них говорят: «Волны имеют сдвиг по фазе».

Рассмотрим теперь явление интерференции волн [11]. Интерференцией называют явление, возникающее при наложении двух или более световых волн. При этом в различных точках пространства происходит усиление или ослабление результирующей амплитуды световых колебаний в зависимости от соотношения между фазами колебаний волн в этих точках. Наибольшая величина амплитуды, равная сумме амплитуд обеих волн, достигается при разности фаз, равной периоду волны. Наименьшая величина амплитуды волны, равная разности амплитуд обеих волн, достигается при разности фаз, равной половине периода. Оба эти случая изображены на рис. 31. Наиболее четкая картина интерференции наблюдается при равенстве амплитуд, поскольку результирующая амплитуда будет либо равна удвоенной амплитуде, либо нулю. Если же ампли-

туды интерферирующих волн неодинаковы, то суммарные амплитуды имеют какие-то средние значения между нулем и удвоенной амплитудой. Этот случай также показан на рис. 31. Интерференцию волн можно наблюдать в бассейне, если бросить на поверхность воды сразу два камушка рядом. Круговые волны, пересекаясь, будут интерферировать.

Именно с помощью интерференции Юнг подтвердил волновую природу света. В настоящее время используются оптические приборы, основанные на интерференции света, их называют интерферометрами. С помощью такого прибора создают стоячие световые волны [11].

Стоячие волны возникают вследствие интерференции двух бегущих волн равной частоты, распространяющихся в противоположных направлениях, т. е. навстречу друг другу. Для получения встречного движения световых волн используют зеркала. В этом случае отраженная волна налагается на прямую и происходит их интерференция, причем не только частота, но и амплитуда оказывается одинаковой.

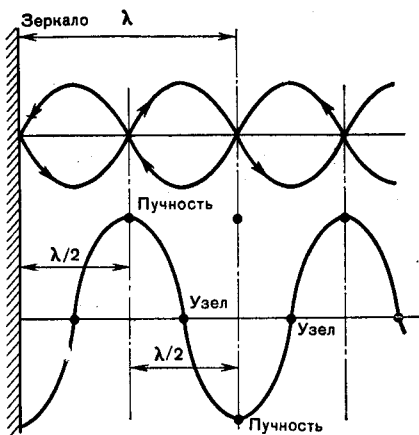


Рис. 32. Схема образования стоячей волны

На рис. 32 показана интерференция таких волн и образование стоячей волны. В начальный момент времени разность фаз прямой и отраженной волн равна половине периода, поэтому волны гасят друг друга. В некоторые моменты времени сдвиг по фазе будет равен нулю, и амплитуда волн сложится, т. е. удвоится. В других случаях будут получены промежуточные значения амплитуд. Таким образом, две бегущие навстречу друг другу световые волны порождают стационарную картину, т. е. волна останавливается и может в течение длительного времени оставаться неподвижной. Гребень стоячей волны называют пучностью, а точку, где амплитуда стоячей волны имеет нулевое значение, узлом.

Следовательно, в точках пучностей концентрируется максимальное количество световой энергии, а в узлах минимальное, причем расстояние между пучностями всегда равно $\lambda/2$.

Еще опытами Винера в 1890 году показано, что пучности стоячих световых волн воздействуют на фотоэмульсию, и в тех местах, где пучности пересекались с эмульсией, после проявления возникали почернения, т. е. волны здесь регистрируются фотографически. Винер использовал этот эффект только для измерения длины волны света, однако Липпман пошел дальше.

Как получить цветное интегральное изображение

Казалось бы, просто. Нужно только приложить к линзовому растру не обычную светочувствительную эмульсию, а цветную, хорошо нам известную. Ведь каждая элементарная ячейка интегральной пластинки это обычный фотоаппарат, только маленький. К сожалению, самые лучшие современные эмульсии, предназначенные для цветной фотографии, не обладают нужной для интегральной фотографии разрешающей способностью*. Более того, их разрешающая способность меньше требуемой приблизительно в 20 раз.

Этот разрыв слишком велик, и поэтому возникает вопрос: пригоден ли принятый сейчас метод многослойных эмульсий с химическими красителями для создания высокоразрешающих цветных фотографических эмульсий?

Рассмотрим иную принципиальную возможность решения этой задачи.

История цветной фотографии началась с небольшим отставанием по сравнению с историей обычной, черно-белой фотографии. Если существование черно-белой фотографии принято отсчитывать с 1839 года, когда Дагер продемонстрировал свои первые снимки, то уже в 1848 году Беккерель получил цветные снимки с фотохимическим окрашиванием изображения. К настоящему времени цветная фотография имеет солидную собственную историю [12] и после многих сменявших друг друга успехов и неудач

* Разрешающая способность характеризует свойство светочувствительной эмульсии разделять очень мелкие детали и выражается числом разделяемых штрихов на 1 мм, причем ширина штрихов и интервалов между ними одинакова.

достигла современного, известного нам уровня в виде цветных обрабатываемых пленок и фотобумаг.

Сущность современной цветной фотографии заключается в экспонировании белым светом трех светочувствительных слоев, наложенных один на другой с желтым светофильтром после первого слоя. В каждом слое светочувствительной эмульсии заложен компонент красителя, который в процессе цветной обработки образует соответствующее цветное изображение — красное, синее и желтое.

В аспекте проблемы создания высокоразрешающих фотослоев эта структура и принцип окраски весьма неудачны. Во-первых, окраска слоев с помощью химических красителей, синтезируемых непосредственно в слое желатина, не способствует получению высокоразрешающих слоев в связи с неизбежной диффузией красителя в некоторый объем желатина, окружающий место химической реакции, выделяющей данный краситель.

Во-вторых, расположение трех эмульсий в виде слоев, наложенных друг на друга, неизбежно приводит к размытости цветного элемента изображения, состоящего из трех цветовых компонентов, распределенных в трех слоях эмульсии. Размеры каждой детали изображения в нижнем слое существенно увеличиваются по сравнению с ее размерами в верхнем слое этой же эмульсии. Это вызвано рассеянием света в двух верхних слоях эмульсии. В результате разрешающая способность слоев цветной эмульсии неодинакова, например: верхний слой имеет 62 мм^{-1} , средний слой — 55 мм^{-1} , а нижний слой только 27 мм^{-1} .

Вероятно, задачу получения высокоразрешающих цветных фотопленок следует решать иным путем, а не на основе многослойной светочувствительной эмульсии.

Цветную фотографию пытались осуществить многие известные ученые прошлого века, но наиболее изящное решение, с нашей точки зрения, предложил Липпман, который изобрел позднее интегральную фотографию. Он не только предложил идею, но и реализовал свой метод и показывал студентам в Сорбонне цветные фотоснимки.

Первое сообщение о своем методе Липпман сделал в 1891 году [13], затем описал подробно метод цветной фотографии [14], а в 1908 году за изобретение цветной фотографии был удостоен Нобелевской премии. Казалось бы, такое признание работы Липпмана обеспечит развитие цветной фотографии, но этого не произошло. Его метод почти полностью забыт, хотя по точности цветопередачи и

по чистоте цветов он остается до сих пор не превзойденным никакими современными методами.

Основной причиной, по которой метод Липпмана не применяют, является малая светочувствительность эмульсионного слоя. К тому же, как отмечает в своей работе Фридман [12], цветные снимки Липпмана можно рассматривать только под определенным углом зрения, в результате чего «...липпмановский процесс остался игрушкой ученых». Тем не менее этот способ представляет интерес,

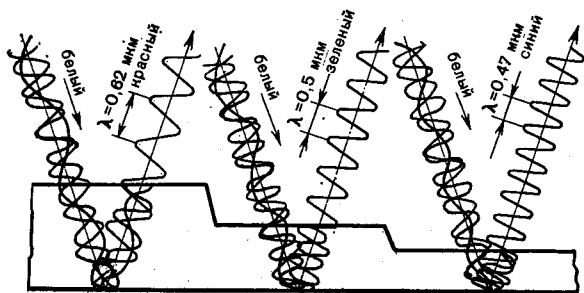


Рис. 33. Схема получения различного цвета световых лучей из белого света при интерференции на тонких пленках

поскольку он сочетает в себе то, что необходимо для цветной интегральной фотографии, а именно: очень высокую разрешающую способность (2000 лин/мм) и хорошую передачу цветов.

Идея метода получения цветного изображения, по Липпману, основана на известном явлении интерференции при отражении света от поверхностей тонких пленок, если толщина их соизмерима с длиной волны света. Подобное явление можно наблюдать в жизни, например, рассматривая радужную окраску мыльных пузырей. На это ссылается Липпман в своем докладе Французской Академии наук [13]. Он заметил, что изменение толщины стенки мыльного пузыря ведет к изменению наблюдаемого цвета, следовательно, цвет, получаемый в результате интерференции, поддается управлению. Было также очевидно, что управление можно осуществить, изменяя только толщину пленки.

На рис. 33 упрощенно изображена возможная схема получения цветного изображения, основанная на интер-

ференции света в тонкой пленке. На участках пленки различной толщины могут образоваться цветные элементы, составляющие в целом изображение. При этом красному цвету будет соответствовать наибольшая толщина пленки, средняя толщина передает зеленый цвет, а более тонкая — синий цвет. Все другие возможные цвета и оттенки могут быть получены путем вариации толщины пленки. Аналогичные, но случайные вариации толщины пленки бензина или масла, растекающихся по поверхности воды, создают радужные цвета, которые мы часто наблюдаем. Однако эти цвета неуправляемы, а для создания цветного изображения надо ими управлять. В чем же суть управления, почему изменяется цвет?

В результате интерференции при одном соотношении фаз двух волн их амплитуды складываются, а при другом соотношении результирующая окажется нулевой (см. рис. 31). Таким образом, результат интерференции зависит от фазы, а фаза при постоянной скорости света зависит от величины пройденного пути. Если учесть, что мыльный пузырь и нашу схематичную пленку на рис. 33 освещает белый свет, являющийся комплексом различных длин волн, то можно заметить, что волны интерферируют только после отражения от обеих стенок тонкой пленки. Однако волны, отраженные от нижней стенки, проходят несколько более длинный путь, чем волны, отраженные от верхней стенки. Следовательно, волны, оразившиеся от нижней стенки, чуть-чуть запаздывают, т. е. у них появляется сдвиг по фазе (которого раньше не было), а дальнейшая интерференция усиливает только волну, у которой фазовый сдвиг равен длине волны и одновременно гасит все другие волны, у которых фазовый сдвиг иной. Таким образом, интерференция выделяет только одну длину волны, т. е. только один цвет из белого света.

Схематично показано в трех вариантах, что изменение толщины пленки, т. е. разности хода, определяет сдвиг по фазе и управляет процессом интерференции. Создавая различные расстояния между двумя отражающими плоскостями и делая эти пары плоскостей достаточно малых размеров по площади, можно создать, в принципе, цветное изображение любого объекта: цветка, пейзажа, портрета.

Открытие Липпмана заключалось в том, что он нашел способ изготовить фотографическим путем такие отражающие плоскости, расстояние между которыми было пропорционально цвету объекта в данной точке изображения и соизмеримо с длиной волны света.

Для осуществления своего метода Липшман изготовил специальную прозрачную и высокоразрешающую светочувствительную эмульсию и полил ею стеклянную пластинку необыкновенно толстым слоем, в десять раз более толстым (примерно 50 мкм), чем эмульсии, предназначенные для обычной фотографии.

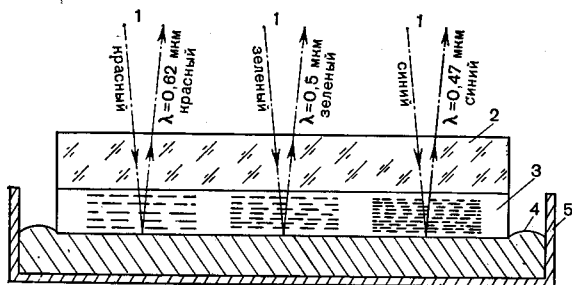


Рис. 34. Схема интерференционной цветной фотографии Липшмана на фотопластинке с толстым слоем эмульсии

Такая эмульсия явилась уже объемным регистрирующим материалом, где по толщине регистрировались различные потемнения. Обычная эмульсия, где по всей ее толщине в данной точке степень почернения одинакова, является практически двумерной регистрирующей средой, так как ее толщина не только невелика (примерно 5 мкм), но и вовсе «не работает».

На рис. 34 показана схема фотографирования по методу Липшмана. Как и в предыдущей схеме, возьмем три точки, окрашенные в синий, зеленый и красный цвета. Объектив фотоаппарата направляет окрашенные световые пучки 1 на фотопластинку, состоящую из стеклянной пластинки 2 и толстого слоя фотоэмульсии 3. Эмульсия обращена не к объективу, как обычно, а прикасается к поверхности ртути 4, которая налита в ванночку 5.

Во время съемки объекта различные участки эмульсии 3 освещаются различно окрашенными световыми пучками. Условно избранные нами световые волны — синяя, красная и зеленая — проходят сквозь стеклянную пластинку 2, эмульсию 3 и попадают на зеркальную поверхность ртути 4. Отразившись от нее, волны начинают распространяться в обратном направлении. Поскольку волны, идущие от объектива, падают на пластинку почти перпендикулярно

но, отраженные от ртути волны совпадают по направлению с падающими и направлены навстречу. В результате их взаимодействия возникают стоячие волны. Пучности, где интенсивность световой энергии максимальна, будут неподвижными в пространстве, благодаря чему за определенное время экспозиции в этих местах светочувствительная эмульсия окажется экспонированной, в то время как в других местах эмульсия останется неэкспонированной, т. е. там не произойдет никаких фотохимических реакций.

После проявления пластинки в эмульсии, в тех местах, где были пучности, образуются плоскости из выделившегося металлического серебра. Плоскостями они являются потому, что падавшая на фотопластинку волна была плоской. Эти плоскости изображены на рис. 34 в виде параллельных пунктирных линий. Каждая плоскость полупрозрачна, т. е. часть света отражает, а часть света пропускает. Можно вычислить и расстояние между плоскостями и их количество. Поскольку пучности располагаются на расстоянии $\lambda/2$, то для синего света, где $\lambda = 0,47$ мкм, расстояние между плоскостями будет 0,23 мкм, для красного света с $\lambda = 0,62$ мкм это расстояние будет равно 0,31 мкм, а для зеленого света с $\lambda = 0,5$ мкм расстояние будет равно 0,25 мкм. Соответственно количество плоскостей для эмульсии с толщиной 50 мкм составит: для синего 220, для красного 155, а для зеленого 200.

Здесь необходимо отметить, что если по слою с толщиной 50 мкм размещается в среднем 200 линий (плоскостей), то для их регистрации разрешающая способность соответствующей эмульсии, необходимой для осуществления интерференционной регистрации, должна быть не меньше 4000 мм⁻¹. Поэтому для интерференционной цветной фотографии необходима высокоразрешающая эмульсия.

На рис. 35 показано увеличенное сечение фотопластинки, экспонированной и проявленной. Эта фотопластинка с толстослойной эмульсией совсем не похожа на те пленки, к которым привыкли фотолюбители, имеющие дело с обычными негативами и позитивами. Изображение объекта, которое в ней зафиксировано, состоит из множества элементарных участков, где полупрозрачные слои серебра образуют «этажерку», уходящую в глубь эмульсии от ее поверхности и до стеклянной подложки. Примечательно, что это обычная черно-белая эмульсия, проявленная в обычном черно-белом проявителе, а изображение, наблюдаемое на ней, — цветное. Но рассматривать его следует в отраженном свете.

В отраженном свете эта пластинка является позитивом, передающим объект в натуральных цветах, причем цвета очень чистые и яркие.

Рассмотрим процесс восстановления изображения. Пусть на фотопластинку падает поток белого света, причем угол падения должен быть таким же, как и при экспонировании пластинки. На рис. 35 приведен маленький участок пластинки, где показаны три варианта плоскостей с расстояниями между плоскостями 0,32; 0,25 и 0,23 мкм. Каждая пара отражающих плоскостей в «этажерке» аналогична по действию тонкой пленке, после отражения от которой

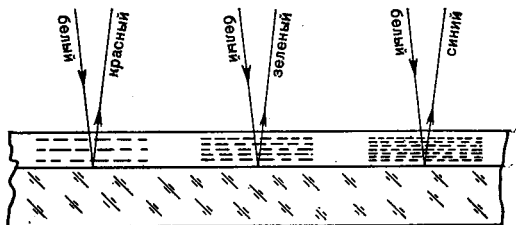


Рис. 35. Структура толстослойной фотопластинки Липпмана, где в черно-белом изображении содержится цветное, получаемое в процессе интерференции световых волн при освещении пластинки белым светом

происходит интерференция и выделение только одного светового луча, длина волны которого зависит от оптической разности хода. В пластинке Липпмана эта зависимость весьма проста, поскольку лучи падают перпендикулярно, а расстояния между плоскостями равны половине длины волны. Действительно, если первый луч отразился от первой, самой верхней плоскости, то второй луч, отразившийся от второй (более низкой) плоскости, придет в точку отражения первого луча с оптической разностью хода, равной удвоенному расстоянию между плоскостями, т. е. со сдвигом на целую длину волны. А это означает, что фаза обоих колебаний совпадает и они будут усиливать друг друга. Следовательно, от данной системы плоскостей отразится луч только той длины волны, которая создала эти плоскости при экспонировании. Если, например, система плоскостей создана синим светом, то плоскости, при освещении их белым светом, отразят только синий свет. Аналогично будут действовать и системы с расстоянием между плоскостями 0,32 мкм, отражая красный свет, и системы с рас-

стоянием 0,25 мкм, отражая зеленый свет. Так же действуют и другие системы плоскостей, характерных промежуточными расстояниями, которые позволяют получить все нужные цвета.

Интерференция волн происходит и в глубине эмульсии, по мере отражения от всех глубоко расположенных пар плоскостей. Каждая пара этих отражающих плоскостей добавляет свой «вклад» в результирующее отраженное в данном месте излучение. Этот «вклад» заключается в том, что избранный цвет усиливается, а все остальные ослабляются.

По подсчетам Липпмана, в слое эмульсии с толщиной $\frac{1}{20}$ мм (т. е. 50 мкм) содержится до 200 отражающих слоев. Цвет отраженных от фотопластинки световых лучей становится чище и правильнее с ростом числа отражающих слоев. В связи с этим вполне объяснимо, что окраска мыльного пузыря очень неяркая. Там ведь только две отражающие поверхности, т. е. в 100 раз меньше, чем в пластинке Липпмана. Соответственно яркость и насыщенность цветных снимков Липпмана в 100 раз больше, чем окраска мыльных пузырей. Такие чистые краски трудно даже представить; по-видимому, никакие современные методы цветной фотографии не могут обеспечить цветов, которые можно получить по методу Липпмана.

Из изложенного видно, что цветное интегральное изображение может быть получено, если использовать липпмановский процесс, так как разрешающая способность фотоэмульсии, необходимой для получения цветной фотографии этим способом, совпадает с величиной разрешающей способности эмульсии, необходимой для регистрации микроизображений в интегральной фотографии.

Каковы здесь трудности и каковы возможности?

Трудность в том, что отсутствует конкретный опыт в создании микроизображений на толстослойных эмульсиях. Сам Липпман, по-видимому, не пытался их изготовить, а с точки зрения обычных понятий микрофотографии требуется, наоборот, очень тонкая эмульсия. Остается нерешенной проблема, отсутствующая в обычной фотографии, т. е. избирательность по направлению наблюдения. Неясно также поведение интерференционной системы под линзовым растром, если, например, толстослойную эмульсию ввести в состав интегральной пластинки Липпмана.

Однако есть и положительные факторы, позволяющие надеяться, что забытый интерференционный метод цветной фотографии Липпмана будет возрожден. Главным фак-

тором являются фундаментальные работы Ю. Н. Денисюка [15, 16], который предложил использовать эмульсии Липпмана для регистрации голограмм.

В аспекте рассматриваемого вопроса появление объемных голограмм может повлиять на дальнейшую судьбу метода Липпмана. Во-первых, все авторы, работающие с объемными голограммами, ссылаются на работы Липпмана по цветной интерференционной фотографии, не интересуясь, впрочем, ею как объектом исследования на современном уровне. Но при этом работа Липпмана постепенно выходит из забвения, длившегося почти 65 лет. Во-вторых, развитие работ с объемными голограммами приводит к накоплению конкретного опыта у многих экспериментаторов, а промышленность осваивает производство толстослойных прозрачных эмульсий для объемных голограмм, которые пригодны для цветной фотографии. Все это в целом может привести к возрождению интерференционной цветной фотографии, может быть, даже в сочетании с интегральной.

Изобразительные возможности интегральной фотографии

Из сказанного об интегральной фотографии становится ясно, что нерешенных проблем, к ней относящихся, гораздо больше, чем решенных. Поэтому с 1908 года и до наших дней интегральная фотография все еще является оригинальной идеей, которая время от времени проходит лабораторные исследования.

И все же совсем отказаться от этой идеи представляется неразумным, так как изобразительные возможности интегральной фотографии не дублируются никакими другими видами съемки объемных изображений.

В связи с этим интересно оценить перспективу использования интегральной фотографии, условно считая разрешенными упомянутые технические трудности.

С помощью интегральной фотографии можно отобразить объект в виде действительного изображения и в виде мнимого. Действительные изображения — это точная оптическая копия объекта, что и поражает наше воображение. Предмет кажется висящим в воздухе перед интегральной пластинкой. Он выходит из нее и может рассматриваться с вариациями ракурса в различных направлениях, в пределах некоторого угла, что существенно усиливает ощущение объемности. Изображение можно заново сфотографировать с разных точек зрения, как и реальный предмет. Эти не-

обычные свойства изображений и являются главным, что могло бы оправдать усилия по разработке техники интегральной фотографии.

Однако область применения действительных интегральных изображений ограничивается тем, что:

а) размер интегральной пластинки (по Липпману) должен быть вдвое больше размеров объекта съемки;

б) изображение объекта восстанавливается там, где был объект при съемке;

в) увеличение изображения или изменение его местоположения в пространстве пока не представляется возможным.

Таким образом, сюжетом интегральной фотографии с восстановлением действительных изображений могут являться неподвижные предметы: портреты, скульптуры, натюрморты, букеты цветов, отдельные архитектурные детали. Все это может найти применение в нашей повседневной жизни, например:

а) украшение витрин магазинов, помещений в театрах, клубах и других общественных учреждениях;

б) распространение копий классических скульптур, которые имеются только в музеях;

в) изготовление и быстрая смена театральных декораций.

Что касается декораций, то необходимость в них ощущается уже сейчас, причем работники театров давно применяют новые формы. В состав театральных декораций часто вводят киноэкран, на котором демонстрируются изображения, связанные с действием на сцене. Интегральная фотография больших размеров могла бы создать на сцене, например, изображение «медного всадника», причем не в виде плоской диапроекции, а в виде объемной оптической копии натуральных размеров, расположенной на сцене там, где необходимо. Поставить и убрать копию такой скульптуры, изготовленную обычным способом из дерева и проклеенных холстов, — дело хлопотное, да и где хранить такой реквизит? Заменить лист фотопленки с изображением множества кадров дело несложное и может быть выполнено автоматически, свертыванием пленки в рулон.

Интересно, что в случае интегральной пластинки размером, например, 5×5 м многие трудности, рассмотренные выше, отпадают. Микрокадр $0,5 \times 0,5$ мм может превратиться в микрокадр с размером 50×50 мм, где будет уже не 625 точек, а $6,25 \times 10^6$ точек и даже при большом линей-

ном увеличении качество изображения будет высоким, таким, как, например, в широкоформатном кино. Требования к точности совмещения матрицы изображений с линзовым растром тоже резко снизятся, что откроет возможность устанавливать и менять эти пленки, заменяя тем самым декорации на сцене, быстро и автоматически. Однако главное это то, что современная трехслойная цветная обрабатываемая пленка оказывается в этом случае вполне удовлетворительной по разрешающей способности.

Что касается мнимого изображения, то интегральная фотография не имеет существенного преимущества перед растровой стереофотографией с параллакс-панорамограммой.

Изобразительная голография

Дополнительные сведения по волновым процессам света

Известно, что окружающие нас предметы становятся видными благодаря тому, что они отражают падающий на них свет. Этот свет попадает в наши глаза, а затем, после соответствующего преобразования, сигналы поступают в мозг, вызывая зрительное ощущение.

Законы отражения света от реального объемного предмета весьма сложны, поэтому для уточнения понятий возьмем наиболее простой предмет — точку.

На рис. 36, а показана схема видения точки, где световая волна 1 с плоским фронтом* падает на точку 2, как мы говорим, — освещает ее. В поле падающей световой волны точка сама превращается в осциллятор, излучающий вторичную волну во все стороны, т. е. отраженные волны расходятся от точки в виде серии концентрических сферических оболочек 3. Если в одном из направлений находится глаз 4, эти волны им улавливаются и человек видит точку. Если в подобном волновом аспекте рассмотреть процесс видения более сложного, чем точка, предмета, то будет очевидна невероятная сложность происходящего процесса.

На рис. 36, б изображен довольно простой предмет — пирамида. В поле падающей на нее плоской световой волны каждая точка ее поверхности является центром излучения сферических волн, причем все они излучают независимо друг от друга. На этом рисунке изображены волны, расходящиеся от трех произвольно избранных точек, причем можно видеть, что картина отраженных волн весьма сложна. Даже простенькая пирамида может рассматриваться как огромное число точек, определяемое длиной волны света и размерами пирамиды. Отраженные световые волны взаимодействуют между собой, и наши глаза

* Волновой фронт — поверхность, на которой фаза волны одинакова. Плоская волна — параллельный пучок лучей.

улавливают суммарную световую волну очень сложной формы, по которой мы узнаем предмет, находящийся перед нами. Эту суммарную световую волну и называют волновым фронтом.

Это уже не плоский волновой фронт, аналогичный параллельному пучку лучей, а очень сложная поверхность, отображающая конфигурацию предмета, создавшего такой волновой фронт.

Изобретатель голографии — Габор — впервые доказал [17], что такой волновой фронт можно создать не только с помощью самого предмета, но и при отсутствии предмета, если заменить его системой непрозрачных элементов на фотопластинке. Он так и назвал свой метод — «Метод восстановления волнового фронта». Чтобы понять суть этого метода, необходимо дополнительно вспомнить некоторые понятия, кроме уже рассмотренных.

Когерентность и некогерентность светового излучения. Волны на поверхности воды являются идеальным примером когерентной волны (см. рис. 29). Слово когерентность (лат.

coherentia) в переводе означает сцепление, связь. В оптике под этим подразумевают такую связь колебаний, при которой между ними имеется постоянное соотношение фаз. В целом, если амплитуда, частота, фаза и направление распространения световой волны постоянны или изменяются не хаотически, а по определенному закону, — такая волна когерентна.

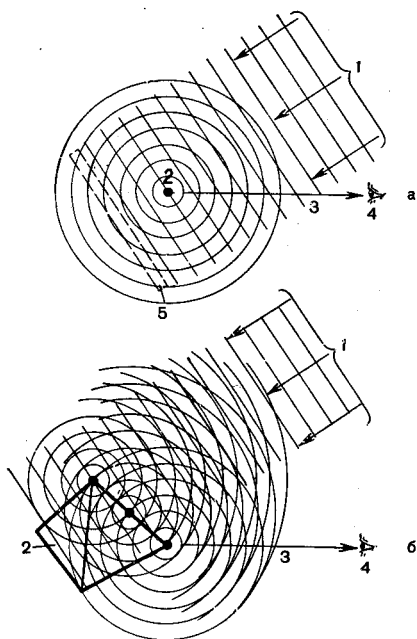


Рис. 36. Обобщенная схема видения предметов в аспекте волновой природы света: а — наблюдение одной точки посредством рассеянного ею света; б — наблюдение предмета сложной формы как совокупности точек, каждая из которых автономно рассеивает излучение внешнего источника света

Как легко получить когерентную волну, бросив камень в воду, и насколько труднее получить когерентную световую волну.

Во всяком теле, излучающем свет, фаза излучаемых колебаний непрерывно меняется. Излучение тел складывается из излучений многих отдельных атомов. Последние, как установлено опытом, излучают световую энергию в течение весьма малого промежутка времени (порядка 10^{-8} с). Благодаря этому начальная фаза результирующих электромагнитных колебаний, излучаемых светящимся телом, быстро и хаотично меняется. При наложении волн от двух различных источников света, например двух электролампочек, разность фаз колебаний быстро и беспорядочно меняется от совпадающего значения до противоположного. Поскольку нет возможности как-либо зарегистрировать такие сверхкороткие состояния, мы наблюдаем усредненное значение энергии за относительно большой промежуток времени, при этом интерференция наблюдаться не будет и такое световое излучение называют некогерентным. Все мы с момента рождения наблюдаем именно такой некогерентный свет. И горящая спичка, и электрическая лампочка, и солнце излучают некогерентный свет, поскольку природа излучения у них одинакова. Фотография, существующая более ста лет, тоже основана на использовании некогерентного света.

В классической оптике известны также способы получения когерентных волн от источника некогерентного излучения, но эти способы практически неприемлемы для голографии.

Источником когерентного излучения, давшим путевку в жизнь голографии, являются лазеры, по которым имеется обширная литература, поэтому здесь мы не рассматриваем их устройство и принцип действия. Для понимания сути голографии не обязательно знать принцип действия лазера, но наиболее любознательному читателю можно рекомендовать небольшую книгу [18], где в популярной форме описан принцип действия лазера. Можно более подробно ознакомиться с лазером в [19, 20].

Читателю необходимо также знать понятия: временная когерентность и пространственная когерентность.

Если разность фаз двух колебаний в данной точке пространства меняется достаточно медленно, то говорят, что колебания остаются когерентными в течение некоторого времени, которое называют временем когерентности. Временная когерентность излучения полностью опре-

деляется спектральным составом. Если газовый лазер излучает только одну частоту в течение нескольких минут, то этого достаточно для получения голограммы, т. е. временная когерентность определяет конкретные возможности экспонирования в свете лазера.

Однако для голографии важен еще второй тип когерентности — пространственная когерентность, т. е. расстояние, на котором сохраняется постоянная разность фаз в фиксированный момент времени.

У излучения некоторых газовых лазеров длина когерентности достигает нескольких метров. На всей этой длине можно расположить предметы по глубине, и все они будут отображены на объемном голографическом изображении.

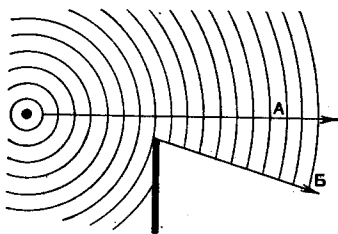


Рис. 37. Явление дифракции волн на краю предмета

Дифракция света. Все мы хорошо помним, как прямолинейно распространяется свет на примере луча карманного фонарика или прожектора. Действительно, эти лучи прямолинейны, как и во всех других примерах распростра-

нения света, наблюдаемых нами. И все же прямолинейность распространения света не всегда соблюдается. В тех случаях, когда пучок света проходит вблизи непрозрачных тел или сквозь узкие щели, часть его отклоняется от первоначального направления движения. Аналогичное явление наблюдается в случае звуковых волн. Если, например, за углом не пронизаемого для звука каменного строения находится источник звука, например шумит мотор трактора, то мы услышим этот звук, хотя трактор нам не виден. В этом случае звуковые волны огибают препятствие и становятся слышными для нас, причем здесь мы имеем в виду, что другие причины слышимости, например отражение от других зданий, отсутствуют. Явление дифракции можно наблюдать и в бассейне, установив на пути бегущей волны перегородку, частично перекрывающую путь волне. Схема такого опыта показана на рис. 37, где волна, образовавшаяся от брошенного в воду камня, встречаясь с препятствием, частично отклоняется от первоначального направления (стрелка А) и, пройдя мимо его края, начинает распространяться и в другом направлении (стрелка В).

Таким образом, все волновые процессы сопровождаются явлением дифракции у края непрозрачного экрана. Другой случай, когда волна с плоским фронтом проходит сквозь узкую щель, сопровождается отклонением направления распространения в двух направлениях, как показано на рис. 38, т. е. по стрелке *Б* и *В*.

Узкая щель может рассматриваться как два препятствия (рис. 37) с приближением друг к другу достаточно близко, т. е. дифракция на щели эквивалентна дифракции на двух краях прямолинейного непрозрачного экрана. Общность механизма дифракции для всех волновых процессов позволяет рассматривать схемы на рис. 37 и 38 как для случая волн на воде, так и для звуковых или световых волн.

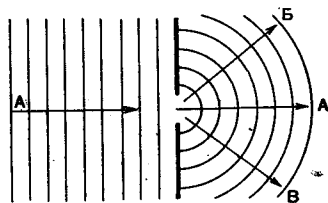


Рис. 38. Явление дифракции волн на щели

Итак, дифракционное отклонение направления распространения световых волн позволяет из световой волны с плоским фронтом сделать любую сложную комбинацию сходящихся и расходящихся световых пучков только путем надлежащего расположения в плоскости дифракционных щелей.

Принцип голографии Габора — Лейта — Денисюка

Изобретатель голографии Габор назвал фотопластинку, на которой зарегистрирована оптическая информация о предмете, голограммой*, так как на пластинке была записана вся информация — как амплитудная, так и фазовая**.

Голография как процесс состоит из двух этапов: а) записи голограммы на фотопластинке; б) восстановления волнового фронта при помощи этой голограммы.

Оба процесса удобно рассмотреть на примере голографирования простейшего предмета — точки. Если позади точки 2 (см. рис. 36, а) установить фотопластинку 5, изображенную пунктиром, то на каждую точку ее поверхно-

* От греческого слова «весь», «целый» (holos).

** На обычной фотопластинке регистрируется только амплитудная информация.

сти будет попадать энергия двух волн, а именно: плоской волны 1 и сферической 3 . Если падающая плоская волна 1 когерентна, то отраженная от точки волна будет интерферировать с ней и в определенных точках пространства волны будут либо усиливаться, либо ослабляться. Результат интерференции в плоскости фотоэмульсии будет зарегистрирован в виде почернений или отсутствия таковых. Усиленные за счет интерференции волны дадут почернение, а места, где волны ослабились или вовсе уничтожились, дадут серые или совсем светлые места.

Нетрудно видеть по рис. 36, *a*, что геометрическое место точек, где условия интерференции будут одинаковыми, является окружностью, а по мере удаления от точки 2 условия интерференции будут периодически повторяться в соответствии с изменением разности хода лучей отраженной сферической волны 3 и падающей одинаково по всей площади пластинки волны 1 .

Итак, голограмма точки — это система концентрических колец, зафиксированных на фотопластинке. Такая голограмма была известна задолго до изобретения голографии под названием зонной решетки Френеля. Ее общий вид можно наблюдать в любом учебнике по оптике.

Рассмотрим теперь процесс восстановления волнового фронта изображения точки (рис. 39). Пусть на пластинку 1 , где на фотоэмульсии содержатся изображения концентрических колец, падает плоская волна 2 монохроматического и когерентного света. Отметим, что кольцевые щели на пластинке 1 по ширине соизмеримы с длиной волны падающего на пластинку света. В этом случае, в соответствии с приведенной ранее схемой на рис. 38, на краях щели будет происходить дифракция света и кроме первоначального направления A появятся два направления — B и B' . Поскольку щели на этой голограмме кольцевые, лучи света, идущие по направлению B , будут расходиться позади пластинки, а лучи света, идущие по направлению B' , сойдутся в одной точке B' и после пересечения в ней будут вновь расходиться. Увидев эти расходящиеся лучи, мы воспримем светящуюся точку, расположенную на некотором расстоянии от плоскости голограммы. Эта точка и есть результат восстановления волнового фронта с помощью голограммы и лазера. Изображение в точке B' называют действительным, поскольку точка B' излучает свет точно так же, как и реальная точка, а поместив на место точки B' фотопластинку, мы получим на ней почернение, как от действительного предмета. Лучи света B , расходя-

щиеся от голограммы I , создают мнимое изображение B' той же точки. Если лучи B рассматривать визуально, можно увидеть точку B' , расположенную позади голограммы. Изображение B' называют мнимым, поскольку точка B' не испускает никаких лучей (направления на эту точку показаны условно пунктирными линиями), а лучи исходят только от плоскости голограммы. Кроме изображения точки можно видеть, что сквозь голограмму проходит прямой пучок света от лазера по направлению A . Очевидно, при попытке рассматривания действительного изображения он создает вредную засветку, чем ухудшает условия наблюдения.

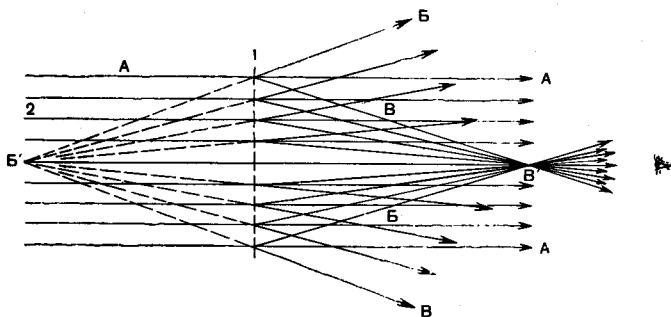


Рис. 39. Схема восстановления изображения точки с помощью простейшей голограммы

Прежде чем перейти к описанию более сложных схем голографирования, назовем общепринятые термины, применяемые при описании таких схем.

Опорный пучок — не измененный пучок когерентного света от лазера, падающий непосредственно на фотопластинку. Он предназначен для обеспечения процесса интерференции с волной, идущей от объекта.

Предметный пучок — когерентное с опорным излучение, рассеянное предметом и достигающее фотопластинки. Предметный пучок всегда интерферирует с опорным.

Волновой фронт нулевого порядка — волна от лазера, проходящая сквозь голограмму в направлении его излучения (направление A на рис. 39).

Рассмотренный полный цикл голографирования и восстановления изображения точки не может, конечно, охватить всех особенностей процесса и приведен в качестве пер-

вого, наиболее простого пояснения сути голографии. Голограмму более сложного предмета (например, пирамиды на рис. 36, б) можно рассматривать как наложение голограмм от множества отдельных точек предмета. Изобразить графически процесс интерференции огромного количества сферических волн (как дано для трех точек на рис. 36, б) не представляется возможным. Читателю можно предложить только простую и наглядную модель, хотя неспособную достаточно строго отобразить процесс.

Бросим на зеркальную гладь пруда один камешек (см. рис. 29). Круговые концентрические волны от него будут отдаленно напоминать зонную решетку Френеля или голограмму, поскольку она создается одной точкой, и мы бросили только один камень. Бросим теперь горсть камней. Кольцевые волны пересекутся и их кругообразность станет менее заметной. Затем бросим в пруд ведро щебня, камешки которого одновременно вызовут множество круговых концентрических волн, но мы не видим ни одного круга. Поверхность воды будет на какое-то мгновение разбита на множество хаотически распределенных островков. Так, по мере увеличения количества источников сферических волн на глади воды пруда все меньше остается чистых концентрических круговых волн, вызываемых камешками.

В соответствии с приведенным примером на голограмме предмета, состоящего из множества точек, регистрируются уже не кольца, а огромные скопления черных точек, граничащих с прозрачными участками пластинки. Поскольку и точки и прозрачные щели между ними соизмеримы по величине с длиной волны света, их невозможно разглядеть невооруженным глазом. Голограмма на вид кажется обычной, серой, равномерно засвеченной и проявленной фотопластинкой, однако голограмма — это бесконечно сложная дифракционная решетка с миллионами щелей, расположенных в таком порядке и в такой ориентации, что световые лучи, отклоненные на этих щелях, создают оптическую копию исходного предмета, копию, сотканную из миллионов лучей света.

Схема голографирования, впервые испытанная Габором, показана на рис. 39. Существенным недостатком схемы была помеха от волнового фронта нулевого порядка.

Американские ученые Лейт и Упатник изменили схему Габора, разделив по углам распространения предметный и опорный пучки света. Их схема изображена на рис. 40. Лазер 1 дает исходный пучок света. С помощью линз 2 и 3 пучок расширяют до величины, определяемой

суммарным размером предмета съемки 4 и зеркала 5. При голографировании предметный пучок 6 и опорный пучок 7 направляются на фотопластинку 8, на которой и регистрируется голограмма.

Восстановление изображения производят точно так же, как это было сделано для одной точки. Направляют на голограмму пучок света от лазера в том же направлении, в котором шел опорный пучок при голографировании. Если посмотреть на схему рис. 41, то видно, что теперь уже волновой фронт нулевого порядка не мешает рассматривать или фотографировать восстановленные изображения, поскольку глаза наблюдателя находятся чуть сбоку и волновой фронт нулевого порядка ему не виден (позиции на рис. 41 совпадают с рис. 40).

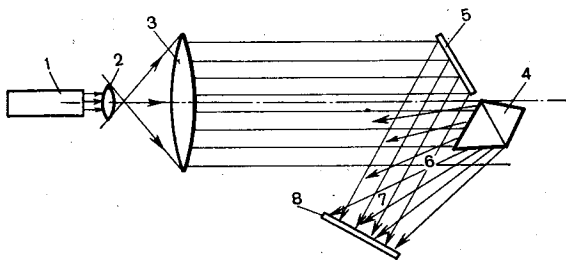


Рис. 40. Схема получения голограммы объекта сложной формы

Рассмотренные схемы Габора и Лейта были основаны на пропускании восстанавливаемого пучка сквозь голограмму при восстановлении изображения. Однако это не единственная возможность. Выше был изложен интерференционный способ цветной фотографии Липпмана. Этот способ указал новое направление в голографии, основанное на создании пространственных дифракционных решеток в слое относительно толстой светочувствительной эмульсии.

Советский ученый Денисюк первый в мире удачно сочетал метод Липпмана с особенностями современной голографии [15, 16]. Позднее аналогичные исследования были проведены Строуком и Лаберье [21].

Суть поиска заключалась в том, чтобы найти возможность восстанавливать волновой фронт в белом, некогерентном свете. Исключение лазера значительно упрощало процесс восстановления изображения.

Как известно из приведенного в предыдущей главе описания, толстослойная эмульсия, в которой в результате экспозиции и последующего проявления образовалась система этажерок из серебряных отражающих слоев, работает как монохроматор, выбирающий из сплошного спектра только одну длину волны и ее отражающий. Если, например, неэкспонированную пластинку Липпмана засветить красным светом, то после проявления она будет отражать только красный свет, если освещать ее будут белым светом.

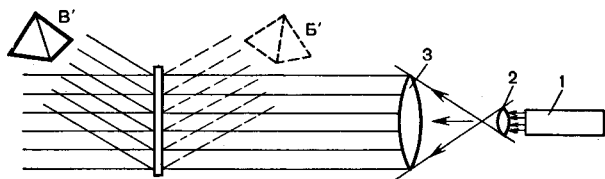


Рис. 41. Схема восстановления голографического изображения объекта

Благодаря тому, что падающий белый световой пучок отражает около двухсот отражающих плоскостей, расположенных в виде этажерки по глубине толстой фотоэмульсии, отраженный световой пучок обладает очень высокой монохроматичностью, сравнимой даже с монохроматичностью газового лазера, хотя и лазер не обеспечивает идеальной монохроматичности.

На примерах восстановления голографического изображения (см. рис. 39 и 41) мы уже видели, что голограмму следует освещать когерентным и монохроматичным светом лазера.

Можно ли считать, что пластинка Липпмана эквивалентна лазеру и даже может заменить его? По этому вопросу существуют различные мнения. Одни ученые, занимающиеся голографией (см. Энциклопедию по квантовой электронике [11], стр. 90), утверждают, что «...строгая монохроматическая волна всегда когерентна». Другие доказывают, что отождествление когерентности и монохроматичности оправдано лишь в простейших приложениях (см. Послесловие к [19]). Трудно сказать, является ли толстослойная отражательная голограмма Денисюка тем самым простейшим приложением, но принцип интерференционного монохроматора Липпмана позволяет восстановить объемное изображение вовсе без лазера. Достаточно обычного

совсем некогерентного белого света от солнца или от лампы фонаря. Следовательно, толстослойная эмульсия каким-то образом заменяет лазер в процессе восстановления голографического изображения, как бы поддерживая точку зрения, согласно которой строго монохроматическая волна всегда когерентна.

На рис. 42, а показана схема записи голограммы по Денисюку. Опорный пучок 1, идущий от лазера, проходит сквозь фотопластинку 2 с толстым слоем эмульсии и, отразившись от предмета 3, создает предметный пучок. Два

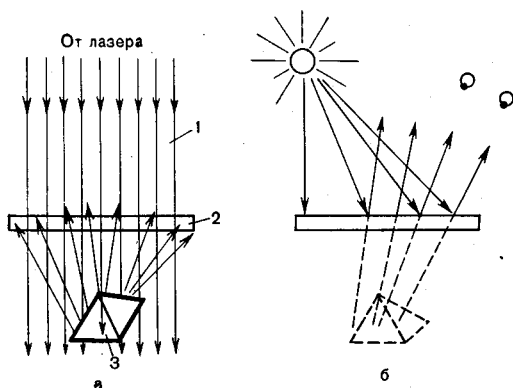


Рис. 42. Схема регистрации голограммы в толстослойной эмульсии по Денисюку и восстановление объемного изображения при освещении голограммы белым некогерентным светом

встречных пучка образуют в пространстве, где они пересекаются, стоячие волны, благодаря чему в светочувствительной эмульсии экспонируются участки, образующие системы полупрозрачных отражающих плоскостей, причем по глубине эмульсии эти плоскости образуют интерференционный монохроматор, а по площади эмульсии элементы плоскостей образуют голограмму данного предмета.

Для восстановления голографического изображения достаточно осветить фотопластинку обычным солнечным светом или лампочкой накаливания, как показано на рис. 42, б. Отраженные лучи будут по длине волны точно равны длине лучей лазера, который использован при голографировании, а монохроматические лучи, выделенные пластинкой из белого света, будут отражаться в соответствии со структурой голограммы и создадут мнимое объемное изображение.

ние. Это изображение будет видно наблюдателю, как сквозь окно. Замечательное свойство такой голограммы в том, что она не создает действительного изображения и не отражает пучок нулевого порядка.

Интересно, что Липпман был очень близок к схеме Денисюка, т. е. он был на пороге открытия голографии еще в 1891 году, но этого открытия он не сделал. Стоячие волны у Липпмана были образованы (по современной терминологии) двумя направлениями одной и той же предметной волны, т. е. голограмма у него получиться не могла.

Как создаются голографические объемные изображения

Рассмотренные примеры записи голограммы и восстановления изображения, поясняющие основные принципы голографии, были основаны на использовании направленного света лазера, освещающего объект. Освещение предмета плоской или сферической волной обладает рядом недостатков, поэтому на более позднем этапе развития голографии было предложено освещать предмет диффузным светом. Для этого между световым пучком от лазера, направленным на предмет, и самим предметом устанавливают прозрачный, диффузно рассеивающий экран, например матовое стекло. Опорный пучок направляют на фотопластинку по схеме, изображенной на рис. 40.

Голограмма, полученная при диффузном освещении предмета, обладает замечательными свойствами, главным из которых является то, что на каждую точку голограммы падает свет от всех точек предмета. Из этого следует, что при восстановлении можно видеть полное мнимое изображение предмета, используя любую точку голограммы. При восстановлении изображения с голограммы становится возможным наблюдать изображение предмета в разных ракурсах. Смысл этого явления поясняется схемой на рис. 43.

Суть регистрации трехмерного изображения на голограмме удобно рассматривать, ссылаясь на интегральную пластинку Липпмана, но нельзя ее считать аналогом голограммы.

Пусть достаточно большая по формату интегральная пластинка Липпмана 1 (рис. 43, а) установлена на некотором расстоянии от предметов 2, а линзы раstra обращены к предметам. Тогда в каждой элементарной ячейке интегральной пластинки на фото пленке может быть зарегист-

рировано полное изображение этих предметов. Вид каждого элементарного изображения будет зависеть от пространственного положения ячейки относительно снимаемых предметов.

Так, например, в ячейке 3, расположенной в левом верхнем углу пластинки, будет изображение, показанное на рис. 43, б сверху. Нетрудно видеть, что предметы рассматриваются слева и немного сверху.

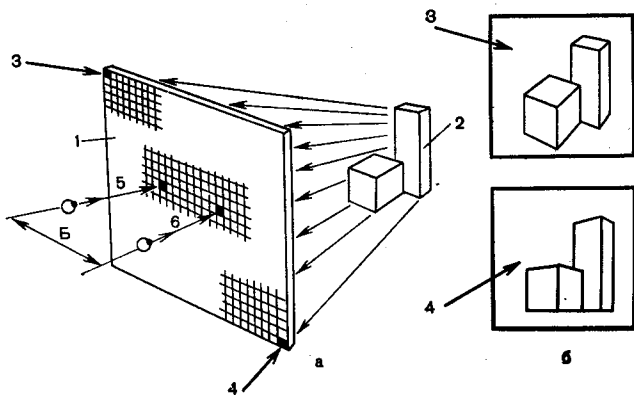


Рис. 43. Схема, поясняющая принцип возникновения объемного голографического изображения: а — схема получения и наблюдения объемного предмета с помощью интегральной пластинки; б — два изображения объекта, фиксируемые противоположными ячейками интегральной пластинки. Аналогичные по ракурсам изображения регистрируются и голограммой, но без такой явной локализации, как на интегральной пластинке

В то же время в ячейке 4, расположенной в правом нижнем углу пластинки, изображение будет на рис. 43, б внизу. Здесь уже иная конфигурация предметов, определяемая низкой точкой наблюдения, расположенной правее предыдущей на ширину пластинки.

Различие этих изображений нетрудно понять, поскольку каждая ячейка интегральной пластинки аналогична маленькому фотоаппарату, который собирает оптическую информацию со всех точек снимаемого предмета. Все остальные ячейки, разумеется, регистрируют различные промежуточные виды снимаемого сюжета, как это было бы при изменении положения фотоаппарата относительно предметов. Если мы будем поочередно рассматривать все микроизображения этой интегральной пластинки (например, через микроскоп), то заметим, что по горизонтали изобра-

жения имеют различный горизонтальный параллакс. Если двигаться по вертикали, можно заметить вертикальный параллакс.

Два изображения на рис. 43, б отличаются одновременно как горизонтальным, так и вертикальным параллаксом, т. е. все как в действительности.

Теперь представим, что пластинка 1 не интегральная, а голограмма, освещаемая лучом лазера, причем эта голограмма была записана при диффузном освещении тех же предметов, которые были расположены точно так, как показано на рис. 43, а.

Тогда, как и в предыдущих примерах, на месте предметов (уже убранных после съемки) возникает мнимое изображение, каждый элементарный участок этой голограммы содержит всю информацию о предметах, но она уже не выглядит так, как показано на рис. 43, б, а представлена в виде сложнейшей дифракционной решетки, состоящей из непрозрачных точек и прозрачных щелей между ними.

Диаметр элементарного участка голограммы, с которого можно восстановить полное изображение предмета, может быть равным 2—3 мм. Такой небольшой участок аналогичен по размерам одному кадрику интегральной пластинки, который тоже содержит полное изображение предмета. Поскольку полный формат голограммы или интегральной пластинки обычно в сотни раз больше указанного размера элементарной площадки, можно считать, что и голограмма и интегральная пластинка содержат в среднем до 10 000 ракурсов изображений одного и того же предмета, сфотографированного с десяти тысяч точек зрения.

Есть, однако, существенное различие. В интегральной пластинке каждый из десяти тысяч кадров отделен четкой границей от соседних кадров, а на голограмме никаких границ между элементарными участками нет. Понятие элементарного участка весьма условно.

При освещении лучом лазера голограммы все ракурсы изображения из десяти тысяч восстанавливаются в виде единого волнового фронта, но наблюдатель не видит их все сразу.

Посмотрим теперь на голограмму одним глазом, как показано стрелкой 3. В этом случае мы увидим мнимое изображение сверху (рис. 43, б), так как элементарный участок голограммы в точке 3 зафиксировал при голографировании вид предметов с этой же верхней и левой точки зрения.

Посмотрим теперь на голограмму, как показано стрелкой 4. Мы увидим мнимое изображение таким, каким оно было на рис. 43, б снизу.

Из сказанного следует, что способность голограммы малой своей частью восстанавливать полное изображение объекта позволяет видеть мнимое изображение в разных ракурсах, пользуясь для наблюдения только малой частью голограммы.

Если теперь посмотрим на голограмму двумя глазами, как показано стрелками 5 и 6, то каждый глаз будет видеть мнимое изображение, восстанавливаемое различными элементарными участками голограммы. Эти изображения являются плоскими, поскольку они создаются маленькими участками голограммы, но эти плоские изображения различаются из-за горизонтального параллакса, т. е. составляют стереопару, и в сознании наблюдателя возникает ощущение объемности предметов [22].

Именно так голограмма создает объемные изображения, которые отличаются исключительной реалистичностью, поскольку при любом положении глаз человека относительно голограммы всегда находятся два элементарных участка, создающих стереопару на сетчатке его глаз и ощущение объемности предмета. Это ощущение объемности усиливается еще и наличием вертикального параллакса, чего нет в стереоизображениях с параллакс-панорамограммой.

Сильнейшим фактором усиления ощущения объемности является присутствие очень плавного динамического стереоэффекта, т. е. смены точек наблюдения при движении головы наблюдателя относительно голограммы.

Как известно, одна голограмма может содержать информацию, зашифрованную в конфигурации ее дифракционных щелей, о десятке тысяч ракурсов одного и того же предмета. Сам принцип восстановления волнового фронта светового излучения, идентичного волновому фронту, который создает сам объемный предмет, подтверждает это. Действительно, если перед нами реальный объемный предмет, мы можем по своему желанию взглянуть на него только один раз и увидим его в одном ракурсе. Если мы захотим, можем посмотреть на него с двух, трех, десяти позиций. Именно так, например, рассматривают хорошую скульптуру в музее. А если скрупулезно отметить все возможные виды находящейся перед нами реальной скульптуры, то можно найти многие тысячи таких видов. Следовательно, реальный предмет обеспечивает практически неограниченное количество ракурсов, причем эта свобода

выбора и плавность смены ракурсов усиливают ощущение объемности, что стало чуть ли не обязательным условием объемного видения.

Голограмма является единственным способом имитации процесса объемного видения, который обеспечивает нам аналогичную возможность.

При наблюдении мнимого изображения наблюдатель воспринимает правым и левым глазом лучи, формируемые различными участками голограммы. Таким образом, каждый глаз наблюдателя воспринимает изображение объекта с разных точек зрения. Правым глазом он видит объект чуть справа, а левым глазом — чуть слева. В результате на сетчатках его глаз образуются диспаратные изображения. Получив по нервным каналам информацию об этих изображениях, мозг производит соответствующую обработку информации (как показано на рис. 2, см. также [2]) и создает в сознании наблюдателя ощущение объемности данного предмета. При изменении позиции наблюдения голограммы изображения, воспринимаемые глазами, будут сформированы лучами, проходящими уже через другие участки голограммы. На сетчатках его глаз образуется новая стереопара, и он увидит объемный предмет в новом ракурсе.

Смена ракурсов наблюдения голографического изображения не ограничена какой-либо цифрой, как и в случае рассматривания реального предмета. Именно это обстоятельство является причиной исключительно сильного ощущения объемности, во много раз превосходящей то, что возможно при растровой стереофотографии.

Однако читатель, по-видимому, заметил, что сам принцип возникновения объемного изображения в голографии ничуть не отличается от обычной стереофотографии. В конечном итоге процесс объемного видения сводится к одному и тому же: правый глаз наблюдателя видит только правое изображение (это один участок голограммы), а левый глаз — только левое изображение (это другой, соседний участок голограммы). То же самое было и в стереоскопах XIX века, только там был зафиксирован один единственный ракурс и тем самым была уничтожена свобода выбора ракурса и, следовательно, существенно снижен стереоэффект.

Как создаются голографические цветные изображения

Голографическое изображение, восстановленное в лучах лазера, имеет один чистый цвет. В большинстве экспериментов это красно-оранжевый цвет, т. е. цвет монохроматического излучения данного лазера.

Известно, что для получения белого и всех остальных цветов достаточно трех цветов, называемых основными или первичными: красного, зеленого и сине-фиолетового [2].

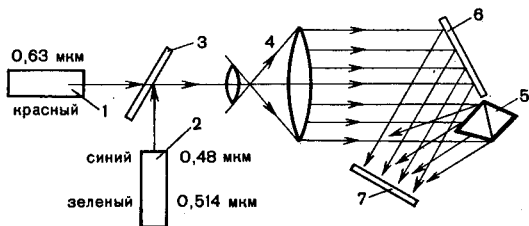


Рис. 44. Схема, поясняющая принцип регистрации голограммы для получения цветного голографического изображения. Для его восстановления необходимы эти же три лазера, т. е. три когерентных цветных луча

Цветные световые пучки трех основных цветов попадают в наши глаза независимо друг от друга и, раздражая различные элементы сетчатки, вызывают ощущение того или иного цветового оттенка.

Такой способ оптического смешения цветов, получаемый как бы сложением основных цветов, называется аддитивным, или слагательным.

Примером аддитивного смешения может служить современное цветное телевидение, где на экране кинескопа имеются три люминофора, способных испускать три основных цвета — красный, зеленый и синий. Благодаря этому экран цветного телевизора показывает нам одновременно три изображения — красное, зеленое и синее, причем на самом экране они не смешиваются, а попав на сетчатку глаза и раздражая в определенной пропорции три типа рецепторов, вызывают в сознании человека ощущения многоцветного изображения с множеством оттенков.

По аналогии с цветным телевизором можно создать и цветное голографическое изображение. Для этого следует соединить в одном и том же месте три монохроматических

голографических изображения, а именно: красное, зеленое и синее. Рассматривая эти три наложенные друг на друга изображения в основных цветах, мы увидим многоцветное изображение.

Схема получения многоцветной голограммы [23] приведена на рис. 44. Лазер 1 излучает красный свет, лазер 2 — синий и зеленый. С помощью полупрозрачного зеркала 3 оба световых пучка совмещаются в пространстве и направляются в систему линз 4, расширяющих пучок до нужного сечения. Таким образом, объект 5 и зеркало 6 освещаются одновременно тремя основными цветами излучения. На фотопластинку 7 падает предметный пучок трех цветов и опорный пучок трех цветов, причем интерференция происходит независимо в трех участках спектра. На этой голограмме образуются три дифракционные решетки, каждая из которых должна взаимодействовать со своим цветом излучения.

Для восстановления волнового фронта, т. е. цветного изображения, необходимо использовать тот же комплекс лазеров. При этом красный свет дифрагирует на «красной» решетке и создает красное изображение предмета; зеленый свет дифрагирует на «зеленой» решетке и дает зеленое изображение предмета; синий свет дифрагирует на «синей» решетке и дает синее изображение предмета. Объединяясь в одной плоскости, эти три независимо существующие изображения дают многоцветное изображение.

Однако красный свет дифрагирует также на «зеленой» и «синей» решетках и дает еще два изображения красного цвета, несколько отличающихся размеров и смещенных относительно основного многоцветного изображения. Аналогично дифрагируют на «чужих» решетках синие и зеленые лучи, благодаря чему помимо многоцветного изображения образуется еще шесть дополнительных одноцветных (трех цветов) изображений, искаженных по размерам и смещенных различным образом. Эти шесть изображений могут накладываться друг на друга или на основное цветное изображение, поэтому схему на рис. 44 следует рассматривать только как иллюстрацию метода.

На этапе восстановления изображения голограмма Ю. Н. Денисюка с толстой эмульсией обладает большим преимуществом перед тонкослойной голограммой, рассмотренной выше. Ложные изображения полностью устраняются, а при восстановлении уже не нужны три лазера. Пространственная дифракционная решетка Липпмана выделяет из белого света лампы накаливания или дневного света

использованные при записи голограммы три монохроматические волны основных цветов — красного, зеленого и синего, заменяя лазеры.

Таким образом, при помощи объемной среды регистрации в голограмме Денисюка можно получить цветное голографическое изображение. Однако и в этом случае регистрация цветного изображения должна выполняться по схеме, аналогичной приведенной на рис. 44, т. е. с помощью трех основных цветов излучения.

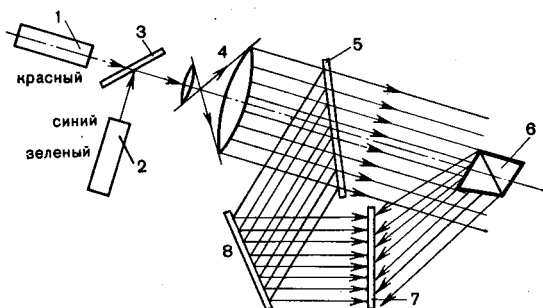


Рис. 45. Схема, поясняющая принцип регистрации голограммы в толстослойной эмульсии для получения цветного голографического изображения. Для восстановления этого изображения достаточно белого света

Чтобы оценить возможность получения цветного голографического изображения, удовлетворяющего современным требованиям, рассмотрим схему, показанную на рис. 45. Лазер 1 дает красное излучение, лазер 2 — синее и зеленое; затем с помощью полупрозрачного зеркала 3 лучи совмещаются в пространстве и направляются на линзы 4, где сечение пучка расширяется. После этого трехцветный пучок разделяется на два пучка полупрозрачным зеркалом 5. Один из этих пучков освещает предмет 6, и отраженные от него лучи создают предметный пучок, падающий на фотопластинку 7 с одной стороны. С другой стороны на эту же пластинку падает опорный пучок, отраженный от зеркала 8 и выделенный из основного пучка полупрозрачным зеркалом 5.

Если предположить, что регистрация голограммы выполняется по схеме Денисюка, а восстановление изображения будет производиться в белом свете, то нетрудно понять, что результирующая цветопередача, т. е. точность

воспроизведения цвета оригинала, будет заложена при регистрации голограммы.

Каким образом можно влиять на цветопередачу? Во-первых, длины волн излучения лазеров должны быть выбраны правильно, т. е. соответствовать трем основным цветам. Во-вторых, необходимо иметь возможность плавно и независимо друг от друга изменять вклад каждой цветной компоненты в суммарное изображение.

Известно, что основные цвета избраны не произвольно, а в соответствии со спектральной чувствительностью трех типов рецепторов, имеющих в сетчатке глаза человека. В работе [2] приведены кривые цветовой чувствительности глаза, причем максимум чувствительности красного цвета соответствует длине волны порядка 0,58 мкм, т. е. максимум относится к оранжевому цвету. «Зеленый» максимум соответствует $\lambda = 0,54$ мкм, а «синий» максимум соответствует $\lambda = 0,45$ мкм.

В соответствии с этим, для записи цветных голограмм нужно было бы иметь лазеры с излучением аналогичных длин волн. Однако газовый лазер с наперед заданной длиной волны излучения пока не создан. Ниже приведены существующие лазеры, приближающиеся по виду излучения к основным цветам.

Из табл. 1 видно, что уже при подборе триады излучений начинается нарушение цветопередачи из-за того, что не существует лазеров, излучающих свет основных цветов.

Таблица 1 [11]

Основные цвета, мкм физиологические	Имеющееся излучение, мкм	Мощность, мВт	Тип лазера
Красный $\lambda = 0,58$	$\lambda_1 = 0,63$	50	Гелий-неоновый
	$\lambda_2 = 0,65$	150	Криптоновый
Зеленый $\lambda = 0,54$	$\lambda_1 = 0,50$	150	Аргоновый
	$\lambda_2 = 0,51$	700	Аргоновый
	$\lambda_3 = 0,52$	60	Криптоновый
Синий $\lambda = 0,45$	$\lambda_1 = 0,46$	50	Аргоновый
	$\lambda_2 = 0,48$	30	Криптоновый
	$\lambda_3 = 0,47$	250	Аргоновый

К тому же разброс мощности излучения существующих лазеров весьма велик.

На практике сейчас применяют для цветного голографирования два лазера [22, 23]: 1) гелий-неоновый с $\lambda = 0,63$ мкм, т. е. красный; 2) аргоновый с $\lambda_1 = 0,51$ мкм (зеленый) и $\lambda_2 = 0,49$ мкм (синий).

Второе условие получения правильной цветопередачи требует плавного изменения мощности излучения каждого лазера, причем необходима независимая регулировка каждой цветовой компоненты, т. е. мощности данного цвета. Это более трудная задача, в настоящее время еще практически не решенная.

В целом современная голографическая техника не обеспечивает возможности коррекции цветопередачи цветного изображения, поэтому все полученные экспериментаторами цветные голографические изображения имеют, как правило, какой-то доминирующий цвет [24].

Однако есть еще дополнительный фактор, усугубляющий трудности воспроизведения правильных цветов. После проявления фотопластины, фиксирования, промывки и сушки происходит усадка желатиновой эмульсии, причем усадка достигает 15—20%. В результате этого отражающие плоскости объемной дифракционной решетки Липпмана сближаются и начинают выделять из белого света гораздо более короткую волну, чем нужно. В связи с этим неизбежно появление синего оттенка цветного изображения. Для компенсации этой усадки предложено промывать голограмму в растворе триэтаноламина [23].

Итак, хорошее по цветопередаче цветное изображение с газовыми лазерами создать весьма трудно из-за приближенного соответствия имеющихся излучений трем основным цветам, невозможности плавно управлять мощностью излучения лазеров и существенного изменения цвета из-за усадки желатина. Однако все эти недостатки, пожалуй, не являются главными, поскольку основным препятствием к практическому применению цветной голографии с использованием газовых лазеров является слишком сложная техника записи голограмм, которая будет рассмотрена ниже.

Цветные голографические изображения могут быть получены и с помощью импульсных лазеров, когда съемка производится моментально. Однако в настоящее время имеется только рубиновый импульсный лазер, дающий красное излучение. Более сложным путем можно получить импульсы зеленого излучения, а лазер синего излучения, по-видимому, еще не создан.

Для оценки применимости голографического метода как средства стереоскопии рассмотрим кратко технику голографирования с газовыми лазерами. Газовые лазеры непрерывного излучения, как видно из табл. 1, имеют относительно малую мощность, поэтому длительность экспонирования в их пучках составляет от минуты и до десятков минут.

В то же время из самого принципа голографии следует, что фазовые сдвиги между интерферирующими пучками должны определяться только конфигурацией предмета. Однако возможен фазовый сдвиг за счет смещения деталей голографической установки. Конечно, такой сдвиг не несет полезной информации и является помехой, поскольку он изменяет картину интерференции. Когда смещение деталей достигает $\lambda/2$, интерференцированная картина полностью размывается, т. е. получение голограммы становится невозможным.

Это предъявляет особенно жесткие требования к стабильности положения тех оптических деталей, через которые свет проходит или от которых он отражается. Отражающие и рассеивающие свет оптические детали (включая и предмет съемки), как правило, не должны смещаться более чем на $\lambda/8$. Для примера возьмем среднюю длину волны — зеленую с $\lambda = 0,54$ мкм. Тогда допустимое смещение будет 0,0675 мкм. Это исчезающе малая величина, и обеспечить такую стабильность чрезвычайно трудно.

Причины смещения относятся к двум категориям: тепловые явления и механические явления [24].

Тепловые явления. Обычно фотопластинку устанавливают незадолго до регистрации голограммы. Прикосновение пальцев экспериментатора вызывает местное повышение температуры и деформацию желатины вследствие ее расширения. Такие же деформации возникают в любых деталях голографической установки, к которым прикасаются руки человека перед съемкой. Следовательно, необходимо дождаться установления теплового равновесия и только потом приступить к голографированию.

Турбулентность воздуха вызывает случайные локальные изменения его показателя преломления, что приводит к дополнительным изменениям фазы и меняет картину интерференции. Турбулентность воздуха может быть вызвана также присутствием экспериментатора возле установки.

Чтобы устранить такие возмущения, желательнее поместить установку внутрь достаточно изолированной камеры.

Механические явления. После закрепления деталей и поддерживающих элементов на рабочем столе форма их меняется также за счет созданных внутренних напряжений и колебаний. Следовательно, надо также ждать, пока наступит статическое равновесие всей установки.

Очень трудно исключить влияние внешних ударов и вибраций, возбуждаемых уличным движением, работой каких-либо механизмов и т. д. Эти сотрясения передаются рабочему столу через землю и даже через воздух.

Чтобы снизить вибрации до указанной величины ($1/8\lambda$), детали установки обычно располагают на массивной гранитной, бетонной или стальной плите, которая, в свою очередь, покоится на накачанных автомобильных камерах. Предложено использовать разметочные плиты, выпускаемые нашей промышленностью. Такая плита весит около тонны, причем ее можно разместить на автомобильных камерах.

Голографический стол, описанный в [25], делают из стального каркаса, который с обшивкой весит 500 кг. Рабочая плита размещается на крышке, сделанной из 40-мм досок. Рабочая плита представляет собой заполненный бетоном короб, сделанный из 2-мм стали. Размер короба $2 \times 1 \times 0,1$ м. После заливки бетоном короба на него кладут сверху 6-мм стальной лист. Весит такая плита 500 кг. Между каркасом и крышкой лежат три сообщающиеся автомобильные камеры с давлением $0,3 + 0,4$ атм.

Все изложенные трудности отпадают, если в качестве источника излучения использовать импульсный лазер. Тем не менее применение таких лазеров в голографии не получило пока большого распространения из-за небольшой длины когерентности, низкого качества изображения, сложности запуска и высокой стоимости этой установки [24].

Читателю, усвоившему основные принципы голографии, не нужно доказывать, что для регистрации голограммы необходима светочувствительная эмульсия с чрезвычайно высокой разрешающей способностью, поскольку размеры элементов на голограмме соизмеримы с длиной волны света.

В обычной фотографии длина волны не имеет решающего значения для регистрации изображения, поскольку почернение эмульсии пропорционально суммарной энергии многих длин волн, получаемой ею во время экспозиции. В голографии необходимо считаться с длиной волны, поскольку она имеет уже прямое отношение к регистрации

изображения. В то же время спектральные характеристики светочувствительной эмульсии играют очень важную роль, так как все лазеры испускают монохроматические пучки и максимум чувствительности эмульсии по возможности должен совпадать с длиной волны излучения лазера.

В то время как в обычной фотографии достаточно иметь разрешающую способность $50 \div 100$ лин/мм, в голографии требуется $1500 \div 3000$ лин/мм, т. е. почти в 30 раз больше. Для регистрации голограмм в толстослойной светочувствительной эмульсии применяют слои с разрешающей способностью до 5000 лин/мм.

Таким образом, первой важнейшей для голографии характеристикой эмульсии является ее разрешающая способность, причем требуются фантастические, с позиций обычной фотографии, значения.

Вторая важная для голографии характеристика — светочувствительность эмульсии, которая меняется обратно пропорционально ее разрешающей способности, т. е. первая и вторая характеристики находятся в противоречии, порождающем значительные трудности.

Очевидно, поступиться разрешающей способностью нельзя, так как голограмма не получится вообще. Тогда следует примириться с низкой светочувствительностью, которая обуславливает необходимость применения мощных лазеров или длительного экспонирования. Газовые лазеры, как известно, обладают низкой мощностью, поэтому их использование связано с исключительно высокими требованиями к температурной и механической стабильности. Даже если использовать «простой» голографический стол [25], желательно всячески уменьшать экспозицию, чтобы снизить вероятность того, что какой-то непредвиденный механический удар превысит стабилизирующие возможности голографического стола и испортит голограмму.

В книге [23] приведена таблица с перечнем имеющихся голографических фотопластинок и фотопленок.

Третья важная характеристика — спектральная чувствительность. В книге [22] приведены графики спектральной чувствительности некоторых эмульсионных слоев. Из них только пленка «Кодак 649F» имеет равномерную чувствительность по всему видимому спектру. Другие пленки имеют относительно узкие зоны чувствительности, что требует точного подбора длины волны, излучаемой лазером при работе с той или иной эмульсией.

Рассмотренные три характеристики не исчерпывают всех специфических требований голографии. Так, необхо-

дим, чтобы неравномерность толщины фотопластины не превышала половины длины волны. Это относится и к толщине эмульсионного слоя и стеклянной подложки. Наличие большей неравномерности порождает крупномасштабный шум. Очевидно, такие условия требуют исключительной тщательности в изготовлении фотопластинок, что в конечном итоге существенно увеличивает их стоимость. Кроме того, за счет флюктуации прозрачности желатинового слоя, а также за счет зернистости появляется мелкомасштабный шум, в результате чего мелкие детали не передаются на восстановленном изображении. При химической обработке изменяется плотность эмульсии, что также ухудшает качество изображения.

В итоге можно отметить, что голография требует решения множества сложнейших проблем в части фотоматериалов, не известных в классической фотографии.

Возможности изобразительной голографии

Суть основных методов голографии была рассмотрена весьма кратко, причем было опущено множество технических подробностей и обращено внимание читателя только на три основных понятия, а именно:

1. Каким образом возникает голографическое изображение?

2. Как делают объемные голографические изображения, и почему они объемные?

3. Как делают цветные изображения в голографии?

Теперь можно перейти к оценке изобразительных возможностей голографии. Объективная оценка этих возможностей, сделанная на основе конкретных знаний, существенно отличается от поверхностно-популярных оценок и прогнозов типа газетных интервью, из которых следует, что голография может все.

Итак, принцип создания объемного изображения с помощью голограммы не отличается от известного принципа стереоскопии, т. е. на сетчатки глаз человека проецируются плоские изображения, отличающиеся друг от друга бинокулярным параллаксом, а уж вследствие этого в сознании человека возникает ощущение глубины пространства и объемности изображаемых предметов.

Голография, растровая стереоскопия и интегральная фотография имеют своей целью обеспечить человека возможностью наблюдать множество стереопар, которые затем и создают иллюзию объемности изображаемых предметов.

Таким образом, в том, что голография создает трехмерные изображения, нет никаких таинственных преимуществ перед другими методами создания стереоизображений. Все равно человек наблюдает эти новейшие голографические чудеса через обыкновенную стереопару, как, впрочем, он наблюдает и реальные объемные предметы, тоже пользуясь стереопарой.

Необходимо отметить, что голография отличается от растровой стереофотографии и интегральной фотографии только принципиально новым способом записи оптической информации на фото пленке, но не принципом создания ощущения у человека объемности изображений.

Из сказанного очевидно, что принцип этот стар как стереофотография, рождение которой можно отнести к 1839 году, когда французский ученый Дагер продемонстрировал первые в мире фотографии, а первый стереоскоп был создан в 1833 году, т. е. за шесть лет до появления фотографии. С тех давних пор и начался процесс совершенствования техники воспроизведения стереоскопических изображений.

Можно ли считать голографию венцом в развитии техники воспроизведения стереоизображений?

Приводимый ниже краткий анализ возможностей голографии является попыткой ответить на этот вопрос.

Фотографические средства отображения окружающих нас предметов показывают их в уменьшенном виде. Однако мы привыкли к этому, и если, например, мы видим на фотографии изображение дома высотой 5—6 см, а людей возле него ростом в несколько миллиметров, мы не удивляемся.

Такие изображения построены по законам линейной перспективы и потому создают у нас иллюзию правильных размеров.

Все объекты, видимые непосредственно на природе, никогда не представляются зрителю несоответствующими своим размерам и форме. Наблюдая на природе, например, многоэтажный дом и людей с некоторого расстояния, мы видим его тоже маленьким, но твердо знаем и даже ощущаем его действительную величину.

Как известно, создателями науки о перспективе были художники. Они разработали методы изображения предметов на рисунках различного формата в соответствии со зрительным восприятием. Появившаяся позднее фотография удивительно легко повторила опыт художников, сохраняя линейную перспективу на фотоснимках.

Таким образом, различные виды изобразительного искусства и фотография имеют общее и совершенно необходимое свойство — они могут уменьшать в любой степени изображение предметов с сохранением линейной перспективы.

Предметы окружающего нас мира, как правило, слишком велики, и чтобы воспроизвести их изображение, его надо сильно уменьшить до формата картины или фотоснимка. Очень редко изображают их в натуральную величину.

Совсем другое положение создается в голографии, где на фотопленке записывают амплитуды и фазы световых волн, а потом восстанавливают их. Отсюда следует, что этот способ по самому принципу получения изображений всегда воспроизводит объект в натуральном масштабе, кроме комбинированных методов.

Это свойство голографического изображения является, пожалуй, самым серьезным препятствием использования голографии как изобразительного средства в стереоскопии.

У читателя может возникнуть вопрос: «А нельзя ли какими-либо техническими приемами изменить масштаб изображения?» Можно. И с этого фактически началось изобретение голографии. Д. Габор разработал метод восстановления волнового фронта именно для целей микроскопии, т. е. для увеличения изображений. Он предлагал использовать при восстановлении изображения с голограммы излучение со значительно большей длиной волны, чем на стадии получения голограммы. Увеличение должно быть равно отношению длин волн.

Следующее ограничение — это большая трудность или даже признаваемая ведущими специалистами [22] невозможность получения цветных изображений с точной цветопередачей.

Очевидно, в наше время, когда широко развито цветное кино, цветная фотография и даже цветное телевидение, одноцветные изображения не могут быть признаны средством изобразительного искусства.

Все упомянутые виды изобразительного искусства длительное время не имели цвета, но обеспечивали получение черно-белых изображений, что было вполне приемлемо. Однако голография не может дать даже черно-белого изображения. Объемные изображения, восстановленные с голограммы, как правило, красные или оранжевые. Это обусловлено тем, что голографирование производится в монохроматических лучах лазера, причем восстанавливается

именно та длина волны, которая была использована первоначально.

Выше было показано, каким образом можно создать цветное голографическое изображение, но приведенные пояснения только демонстрируют принцип. На практике все обстоит сложнее. Дело в том, что сейчас пока еще только газовые лазеры способны испускать свет различной длины волны, т. е. разного цвета. Испускаемое различными типами лазеров монохроматическое излучение различных длин волн позволяет приблизительно подобрать триаду основных цветов для синтеза многоцветного изображения.

Однако все газовые лазеры дают непрерывное и маломощное излучение, следовательно, голограмму можно создать только при условии, что за несколько минут экспозиции предмет не сдвинется даже на какую-то долю длины волны света ($\lambda/8$). Отсюда следует, что голографирование нужно производить в специальной установке, рассмотренной выше, а предметами для съемки могут быть пока только мелкие игрушки или фарфоровые статуэтки.

Таким образом, цветные голографические изображения возможны пока только для сюжетов, не представляющих практического интереса. Кроме того, цветопередача отличается неточностью и невозможностью ее исправить в той степени, в какой это возможно в современной цветной фотографии.

В качестве источника излучения можно применить импульсный лазер. Благодаря огромной мощности излучения (сотни $MВт$) и, следовательно, сверхкороткой экспозиции (15—20 $нс$) можно голографировать не только колеблющиеся предметы, но и очень быстро движущиеся, например полет пули. Казалось бы, проблема решена. Однако в настоящее время практически доступным является излучение только красного цвета рубиновых лазеров ($\lambda = 0,69 \text{ мкм}$). Более сложно получить зеленый цвет, хотя сейчас для этой цели используют вторую гармонику излучения неодимового лазера ($\lambda = 0,53 \text{ мкм}$). К сожалению, импульсный лазер с синим излучением, по-видимому, пока еще не создан, поэтому хорошей триады цветных излучений для импульсного голографирования цветных объектов еще нет.

К этому следует добавить, что для устранения некогерентной засветки голографирование необходимо производить в темном помещении.

Длина пространственной когерентности импульсного одночастотного лазера равна приблизительно 1 м, т. е. рас-

положение предметов по глубине должно простирается в пределах этого метра. Для жанровой стереоскопии этого мало.

При воздействии на фотослой очень короткого наносекундного светового импульса от лазера происходит нарушение закона взаимозаместимости [22, 23], сформулированного еще в XIX веке, который утверждает, что фотохимическое превращение определяется произведением интенсивности света I на продолжительность его действия t . Согласно закону, $I_1 \cdot t_1 = I_2 \cdot t_2 = I_3 \cdot t_3$, если при любых вариациях величин I и t их произведение постоянно. Если при данной экспозиции и при обеспечении требуемых условий обработки эмульсионного слоя время экспонирования лежит в наносекундном интервале, то оптическая плотность проявленного фотослоя имеет меньшую величину, чем следовало бы по применяемой экспозиции.

Нарушение закона взаимозависимости приводит к тому, что при длительности экспозиции от 10 до 50 нс плотность энергии необходимо увеличить в два-четыре раза [22].

К этому следует добавить, что повышение мощности источника приводит к возникновению опасности поражения глаз, и мощность, допускаемая для съемки, например, человека, крайне ограничена.

В книге кратко изложена суть трех методов получения стереоизображений, связанных между собой общностью цели. Их техническая общность позволила объяснить сначала наиболее простую технику растровой стереофотографии, затем более сложную технику интегральной фотографии и, наконец, еще более сложную технику голографии.

Однако у читателя может возникнуть вопрос: «Для воспроизведения объемных изображений достаточно одного метода. Какой же из трех выбрать, какой метод наиболее совершенно воспроизводит объемные изображения?» Поняв суть методов и их технику, читатель, по-видимому, сможет и сам найти ответ на этот вопрос, но можно дополнительно указать на следующее.

Представляется, что в настоящее время наиболее доступным и совершенным методом является растровая стереофотография, обладающая рядом достоинств, из которых можно назвать следующие:

1. Съемка в белом, некогерентном свете, т. е. при свете солнца. Это означает возможность стереосъемки художественного пейзажа, архитектуры, жанровых сцен, спорта, научного применения стереосъемки для целей геологии, зоологии, ботаники, археологии, т. е. съемки ценных для науки объектов природы. Очевидно, что стереосъемка на поверхности Луны, планет и спутников удаленных планет будет выполняться автоматическими космическими станциями тоже в некогерентном свете солнца. И в лаборатории многие виды стереосъемки проще выполнить в белом некогерентном свете.

2. Получение цветных стереоизображений с весьма совершенной цветопередачей, доступной современной цветной фотографии.

3. Применение стандартных фотоматериалов, промышленное производство которых хорошо налажено.

4. Увеличение или уменьшение стереоизображений.

5. Получение широкого поля зрения при высоком качестве изображения по всему полю.

6. Съемка при большой глубине резко изображаемого пространства.

7. Относительная простота многократного копирования и даже полиграфического тиражирования стереоизображений.

Что касается голографии, то здесь труднее назвать какие-либо достоинства при синтезе объемных изображений. Ни одним из перечисленных семи достоинств голография не обладает. Почему? По-видимому, основной причиной является то, что это еще молодая наука и не все в ней открыто. Кроме того, есть в ней и принципиально непреодолимые или очень трудно преодолимые барьеры. Так, проблема когерентности излучения, необходимого для записи голограмм. Предпринимаются попытки получения голограмм при некогерентном освещении, но по утверждению известных исследователей [22, 29] достижения голографии в некогерентном свете пока ограничены. В настоящее время еще трудно судить о возможностях голографии в аспекте синтеза объемных изображений, тем более что все отчетливее намечается тенденция использования голографических методов в тех областях науки и техники, где объемные изображения не требуются.

Возможности голографии, как средства синтеза объемных изображений, характеризуются высказываниями наиболее известных специалистов, работающих в этой области. Единственное оптимистическое высказывание было сделано в 1964 году, когда надежд было больше, чем конкретной информации о свойствах голографии.

«По-видимому, можно вполне уверенно сказать, что большинство приложений будет связано с получением трехмерного, в высшей, степени реалистического изображения, которое позволяет получить новый метод, оставляющий далеко позади все другие фотографические методы» (Лейт и Упатниекс [26]).

«Осуществимы ли объемные отражательные голограммы в натуральных цветах, пока остается спорным, так как до сих пор не имеется импульсных лазеров зеленого излучения с требуемой когерентностью, а импульсные лазеры голубого излучения еще вообще не созданы» (Габор [27]).

«Однако в настоящее время в распоряжении экспериментаторов имеется излучение только красного цвета (от рубиновых лазеров), так что получение многоцветных голографических изображений пока невозможно. Впрочем,

этот недостаток является второстепенным по сравнению с высокой стоимостью установок с импульсными лазерами» (Кольер, Беркхарт, Лин [22]).

«Информация о всех точках объекта, запечатленная на фото пленке или фото пластинке, дает возможность восстановить его трехмерное изображение. Это свойство голограмм могло бы произвести настоящую революцию в фотографии. На самом деле эта поражающая воображение возможность применения голографии не получила в последние годы широкого развития из-за дорогой и часто сложной технологии» (Вьено, Смигильский, Руайе [24]).

«Наиболее замечательное свойство голограмм состоит в том, что при их освещении создается полное впечатление реальности видимого изображения. Люди, которые в первый раз видели голографическое изображение, высказывали предположение, что голография произведет революцию в графическом отображении. Почему же оказалось, что до подобной революции еще очень далеко?.. Преподнесенный нам урок имеет простой смысл. Нужно искать те применения голографии, в которых необходимы именно характерные свойства голографии, а не пытаться приспособить голографию к задачам, для решения которых она не пригодна» (Паркер [28]).

«Вообще следует отметить, что оптические генераторы даже в настоящее время настолько превосходят обычные источники света по когерентности и в конечном счете по эффективности, что трудно ожидать каких-либо значительных успехов в направлении развития голографии с применением некогерентных источников» (Микаэлян [29]).

Итак, в аспекте воспроизведения объемных изображений голография и растровая стереоскопическая фотография находятся пока в неравном положении. Стереопереография в более скромных масштабах использует принцип уплотнения записанной информации и потому уступает голографии в количестве стереопар, записанных на одной фото пленке. Именно избытке наблюдаемых стереопар явилось причиной восторженных отзывов по поводу голографических объемных изображений, это же обстоятельство подсказало путь совершенствования растровой стереопереографии. Теперь ясно, что для повышения реалистичности объемного изображения необходимо иметь огромный избыток стереопар, зафиксированных в одном кадре. Но стереопереография сейчас более доступна, техника относительно проста, а наличие хорошего цвета в некоторых случаях является решающим. А там, где цвет не нужен,

например в некоторых научных исследованиях при условии применения высокоразрешающих фотослоев и высококачественной оптики, растровая стереофотография может сравниться по качеству изображения с голографией, обладая при этом более широким полем зрения, недоступным для голографии.

Чему же принадлежит будущее в деле воспроизведения статических объемных изображений? Наиболее вероятно, что будущее за интегральной фотографией, потому что она по принципу действия находится на стыке растровой стереофотографии и голографии.

1. Валюс Н. А. Стереоскопия. М., Изд-во АН СССР, 1962.
2. Грегори Р. Л. Глаз и мозг, психология зрительного восприятия. М., «Прогресс», 1970.
3. Lippman G. Photographies integrales. Comptes Rendus. vol. 146, p. 446, 1908.
4. Соколов П. П. Автостереоскопия и интегральная фотография по профессору Липпману. М., Изд-во МГУ, 1911.
5. Burckhardt C., Colleier R., Doherty E. Formation and Inversion of Pseudoscopic Images. — "Appl. Opt", 1968, vol. 7, N 4, p. 627.
6. Дудников Ю. А. Устранение псевдоскопического изображения в интегральной фотографии. — «Оптико-механическая пром.», 1971, № 3.
7. Барщевский Б. У., Иванов Б. Т. Объемная фотография. М., «Искусство», 1970.
8. Дудников Ю. А. Исследование основных оптических и конструктивных характеристик интегральной фотографии. Канд. дис., 1971.
9. Stevens G. Mikrophotography. New York, 1968.
10. Эйнштейн А., Инфельд Л. Эволюция физики. М., «Наука», 1965.
11. Квантовая электроника. Маленькая энциклопедия. Под ред. М. Е. Жаботинского. М., «Сов. энциклопедия», 1969.
12. Fridman I. History of color photography. New York, 1972.
13. Lippman G. La photographie des couleurs. Comptes Rendus, vol. 112, p. 274, 1891.
14. Липпман Г. О теории фотографирования в простых и составных цветах интерференционным методом. — "Journ. phys.", Paris, 1894, vol. 3, p. 97.
15. Денисюк Ю. Н. Об отражении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения, т. 144. М., Изд-во ДАН СССР, 1962, с. 1275.
16. Денисюк Ю. Н. Об отражении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения. — «Оптика и стереоскопия», 1963, т. 15, с. 522.
17. Gabor D. A new microscope principle, Nature, 1948, N 161, p. 777.
18. Кок У. Лазеры и голография. М., «Мир», 1971.
19. Белостоцкий Б. Р. и др. Основы лазерной техники. М., 1972.
20. Шавлов А. и др. Оптические квантовые генераторы. М., Изд-во иностр. лит-ры, 1962.
21. Строук Г., Лаберье А. Восстановление в белом свете голографических изображений при использовании эффекта дифракции Липпмана—Брегга. — "Phys. Lett". 1966, N 20, p. 368.

22. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. М., «Мир», 1973.

23. Островский Ю. И. Голография и ее применение. Л., «Наука», 1973.

24. Вьено Ж., Смигильский П., Руайе А. Оптическая голография, развитие и применение. М., «Мир», 1973.

25. Вагин Л. Н. и др. Голографический стол. — «Оптико-механическая пром.», 1973, № 11.

26. Лейт Э., Упатникс Ю. Фотографирование с помощью лазера. — «Наука и жизнь», 1965, № 1.

27. Габор Д. Обработка информации при помощи когерентного света. — «Зарубежная электроника», 1970, № 9.

28. Техника систем индикации. Под ред. Н. Н. Луксенберга. «Мир», 1970.

29. Микаэлян А. Л. Голография. М., «Знание», 1968.