

Ю. Н. ДЕНИСЮК

ГОЛОГРАФИЯ С ЗАПИСЬЮ В ТРЕХМЕРНЫХ И ДВУХМЕРНЫХ СРЕДАХ

Работы в области голограммного метода были начаты в ГОИ в 1958 г. Целью этих работ было исследование возможности осуществления изобразительной техники, создающей полную иллюзию действительности изображаемых объектов. Метод Габора нам в то время не был известен, и мы базировались на работах французского физика Липпмана.

В одной из этих работ Липпман предложил метод получения фотографий, воспроизводящих пространственные изображения объектов с помощью растровой системы, составленной из множества мелких линз (так называемая интегральная фотография Липпмана). В Советском Союзе этот метод известен по работам изобретателя Иванова.

Проведенный нами анализ, однако, показал, что метод интегральной фотографии противоречив в самой своей основе: при попытке увеличить число элементов растра разрешающая способность каждого элемента стремится к нулю.

Было очевидно, что для решения поставленной задачи необходимо найти способ записи и восстановления волновых полей. Действительно, если бы удалось каким-то способом воссоздать со всеми подробностями волновое поле излучения, рассеянного объектом, то наблюдатель, воспринимая такое поле, основываясь только на зрительных впечатлениях, не смог бы отличить, находится ли перед ним объект или поле восстановлено искусственно. В соответствии с этим он зарегистрировал бы появление изображения, не отличающегося по внешнему виду от оригинала.

Из теоремы о единственности решения уравнения Гельмгольца следует, что для воспроизведения волнового поля достаточно восстановить на некоторой замкнутой поверхности либо значения самой волновой функции (задача Дирихле), либо значения ее производной по нормали (задача Неймана). Можно показать, что, когда поверхность расположена на большом расстоянии от объекта — там, где излучение распространяется по законам геометрической оптики, подчиняясь уравнению эйконала, воспроизведение граничных условий задачи Дирихле сводится к воспроизведению формы и амплитуды волнового фронта, а воспро-

изведение граничных условий задачи Неймана — к воспроизведению амплитуды и направления лучей в каждой точке этой поверхности. Оба эти подхода совершенно равноправны.

Теорема единственности требует, однако, не только воспроизведения граничных условий, но и того, чтобы поверхность, на которой они воспроизводятся, была замкнутой. Очевидно, что это обстоятельство существенно усложнило бы практическую реализацию процесса. Обратив известное предположение теории дифракции Кирхгофа, мы показали, что в случае, когда граничные условия воспроизводятся на незамкнутой поверхности, восстановленное волновое поле будет таким, как если бы соответствующее ему излучение прошло через эту поверхность, как через окно в непрозрачном экране. Этот эффект действительно наблюдается на голограммах произвольных объектов, которые были получены после появления ОКГ.

Анализируя условия, которые необходимо выполнить для того, чтобы воспроизвести волновое поле, мы пришли к заключению, что эту операцию можно осуществить двумя принципиально различными методами — активным (когда поле создается системой управляемых по фазе когерентных излучателей) и пассивным (когда сложное волновое поле излучения, рассеянного объектом, восстанавливается в результате отражения какого-то простого поля, например плоской волны, от специально подобранной структуры).

В радиодиапазоне активный способ известен и используется при создании фазированных антенных решеток. Путей осуществления этого способа в оптическом участке спектра нам не удалось найти.

Пассивный способ казался более реальным. О нем можно было даже вынести некоторые суждения, не вникая в детали его воплощения.

Например, было очевидно, что пассивный способ сводится фактически к задаче создания структуры, оптические свойства которой совпадают с оптическими свойствами объекта*. Предельным случаем такой структуры является точная копия предмета съемки. Естественно, что такая копия восстановит волновое поле объекта при освещении ее излучением любого спектрального состава. Если, однако, объект освещается излучением с ограниченным спектром и определенным направлением распространения, то он воздействует на волновое поле только частью своих оптических свойств. Модель этой части, обладая способностью рассеивать данное излучение так же, как и объект, может вместе с тем очень сильно отличаться от него по своему внешнему виду. Дальнейшее развитие этих весьма специфичных представлений привело к введению так называемого «оптического оператора рассеяния объекта».

В поисках конкретного механизма, который обеспечил бы воспроизведение волновых полей, мы обратились к другой работе Липпмана, в которой он предложил так называемый интерференционный метод цветной фотографии. В этом случае во время съемки за фотопластинкой устанавливается ртутное зеркало. При отражении излучения от этого зеркала возникает система плоских стоячих волн, которая регистрируется высокоразрешающим эмульсионным слоем. Если на полученную таким образом объемную структуру снова направить излучение источника с белым спектром, то в результате интерференции излучения на слоях этой структуры фотопластинка будет казаться окрашенной в первоначальные цвета.

* Под оптическими свойствами здесь понимается комплекс, определяющий отношение объекта к падающему на него излучению.

Мы предположили, что объемная фотография сложной картины стоячих волн, возникающих при отражении излучения от произвольного объекта, воспроизводит не только спектральный состав отраженного им излучения, но и все остальные компоненты волнового поля — фазу и амплитуду; казалось вполне естественным, что сведения об этих параметрах могут заключаться в причудливых изгибах и изменениях интенсивности поверхностей пучностей стоячей волны.

Поясним это подробнее (рис. 1, а).

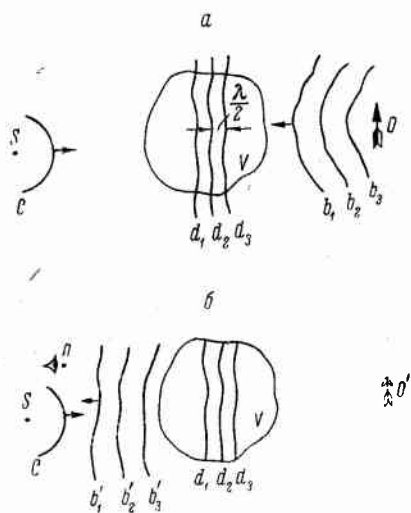


Рис. 1. а — Схема получения волновой фотографии: S — источник излучения; O — объект; C — волновая поверхность излучения, падающего на объект; b_1, b_2, b_3 — волновые поверхности излучения, отраженного объектом; d_1, d_2, d_3 — поверхности пучностей стоячих волн, образованных в результате интерференции волны C волнами b_1, b_2, b_3 ; б — получение изображения с помощью волновой фотографии: d_1, d_2, d_3 — зеркальные слои, образовавшиеся на месте поверхностей пучностей; b'_1, b'_2, b'_3 — волновые поверхности излучения, отраженного фотографией.

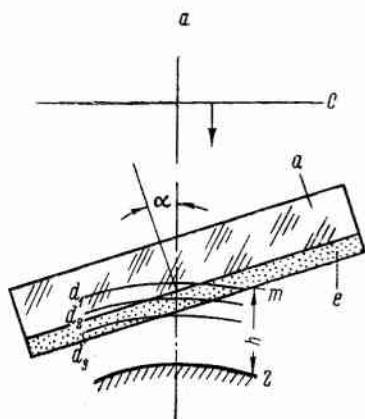


Рис. 2. Схема получения волновой фотографии выпуклого зеркала: C — волновая поверхность падающего излучения, a — фотопластинка, e — эмульсионный слой фотопластинки. d_1, d_2, d_3 — поверхности пучностей стоячих волн, Z — выпуклое зеркало с внешним алюминированием.

Пусть имеется некоторый произвольный объект O , на который падает излучение источника S . Отраженное объектом излучение, накладываясь на излучение, распространяющееся от источника, образует стационарную картину стоячих волн. Поверхности пучностей этих волн обозначены на рисунке d_1, d_2, d_3 . Пусть далее в окружающее объект пространство внесен объем V , заполненный светочувствительной эмульсией Липпмана. После соответствующей экспозиции и химической обработки в объеме V образуется фотографический осадок, плотность которого моделирует распределение интенсивности в стоячей волне.

Мы предположили, что такая пространственная структура, названная нами волновой фотографией, является своего рода оптическим эквивалентом объекта: если на эту структуру упадет излучение того же

источника, который освещал объект при экспозиции, то она отразит это излучение так, что волновое поле отраженного излучения будет идентично волновому полю излучения, рассеянного объектом (рис. 1, б). Наблюдатель h при этом регистрирует появление мнимого пространственного изображения объекта O' .

Отображающие свойства волновой фотографии распространяются и на спектральный состав излучения. Например, если излучение, падавшее на объект при получении фотографии, было монохроматическим, а излучение, падающее на фотографию при наблюдении, имеет сплошной спектр, то фотография отразит только ту монохроматическую составляющую, которой она была экспонирована.

Цветную фотографию Липпмана можно рассматривать как частный случай волновой фотографии, когда объектом O является плоское зеркало.

Попытки провести эксперименты для обоснования этой гипотезы наткнулись на трудности, связанные с отсутствием фотографических пластинок, способных регистрировать стоячие световые волны. В связи с этим нами совместно со старшим научным сотрудником И. Р. Протас были предприняты дополнительные исследования по разработке метода приготовления липпмановских фотографических пластинок на основе современной технологии синтеза эмульсий. Применение сенсibilизации золотом и гиперсенсibilизации триэтанололамином позволило существенно повысить первоначальную чувствительность пластинок при сохранении высокой разрешающей способности фотослоя. Попутно были выяснены пути устранения такого нежелательного в данном случае эффекта, как изменение толщины эмульсионного слоя в процессе проявления и фиксирования фотопластинок.

Первые же эксперименты с простейшими объектами — выпуклыми зеркалами различных радиусов кривизны — показали, что объемная фотография картины стоячих волн и на самом деле с удивительной полнотой воспроизводит оптические свойства объекта. Общая схема этого эксперимента изображена на рис. 2.

Над выпуклым алюминированным зеркалом Z располагается фотопластинка a . Нормаль к поверхности фотопластинок в общем случае составляет угол α с оптической осью коллиматора, который стоит над системой. Созданная коллиматором плоская волна монохроматического излучения C , пройдя через прозрачную фотопластинку, отражается от зеркала Z . В результате наложения падающего и отраженного излучения над зеркалом возникает система стоячих волн, которая регистрируется фотопластинкой.

В полном соответствии с теорией такие фотографии фокусировали излучение так же, как и зеркала-оригиналы, выбирая из сплошного спектра только ту монохроматическую составляющую, которой они были экспонированы. Фокусное расстояние этих фотографий с точностью до процента совпадало с фокусным расстоянием оригинала, а разрешающая способность достигала 80 мин/мм . Фотографии выпуклых зеркал, полученные при наклонном положении фотопластинок, были похожи по свойствам на отражательные дифракционные решетки с концентрацией света в заданном участке спектра.

По уже упомянутой схеме был проведен эксперимент и с более сложным объектом — шкалой объект-микрометра с блестящими штрихами, которая была удалена на расстояние порядка одного миллиметра от фотослоя.

В этом случае волновые фотографии воспроизводили единственное неискаженное изображение шкалы, локализованное вне фотослоя, т. е. там, где шкала располагалась при съемке. Фотографии более сложных объектов получить в то время не удалось, поскольку в нашем распоряжении не было лазера.

Сейчас, по прошествии шести лет, на этой же старой установке, у которой только ртутная лампа была заменена лазером, были получены голограммы сложных объектов, допускающие реконструкцию излучением обычного источника со сплошным спектром.

Рассмотрим очень кратко сущность некоторых развитых нами вариантов теории волновой фотографии.

Согласно варианту, базирующемуся на однозначности связи граничных условий с волновой функцией, механизм действия трехмерной голограммы в общих чертах заключается в следующем (рис. 3).

Зафиксированные волновой фотографией поверхности лучностей после проявления и отбеливания превращаются в своеобразные кривые зеркала (P_1, P_2, P на рис. 3). В соответствии с механизмом образования стоячей волны форма этих зеркал такова, что на их поверхности фаза излучения источника равна фазе волны, рассеянной объектом O . Коэффициент отражения этих зеркал, зависящий от интенсивности стоячей волны, пропорционален амплитуде волны, отраженной от объекта, поскольку амплитуда второй компоненты стоячей волны — волны излучения источника — постоянна. Учитывая все это, нетрудно понять, что при реконструкции волна источника, достигая точек зеркального слоя, приобретает фазу, равную фазе волны, рассеянной объектом, а после отражения от слоя восстановятся, кроме того амплитуда и направление распространения излучения. Таким образом каждый зеркальный слой волновой фотографии трансформирует волну источника в волну объекта. Совместное действие всех слоев так же, как и в цветной фотографии Липпмана, обеспечивает воспроизведение спектрального состава излучения.

Для лучевого представления механизма действия волновой фотографии существенно, что нормаль к каждой элементарной площадке зеркального слоя ($\vec{n}_a, \vec{n}_b, \vec{n}_c$ на рис. 3) совпадает, как это нетрудно показать, с биссектрисой угла между падающими на этот элемент лучами источника и объекта. Поэтому лучи источника, доходя до зеркального слоя, отражаются по направлению лучей, рассеянных объектом.

Операторные представления были развиты нами в двух вариантах.

Один из них основывается на том, что волновая фотография представляет собою рассеивающую среду, функция распределения коэффициента рассеяния которой совпадает с оператором умножения, переводящим волновую функцию излучения источника S в волновую функцию излучения, рассеянного объектом.

Сущность второго варианта заключается в следующем (см. рис. 4). Излучение источника и объекта раскладывается на плоские волны. Оказывается, что трехмерные гармоники, образующиеся в результате интерференции этих волн, обладают весьма интересным свойством: если на объемную фотографию гармоники, образованной в результате интерференции плоских волн с лучевыми векторами l_s и l_0 направить волну l_s , то гармоника преобразует ее в волну l_0 . Рассматривая взаимодей-

ствии всех плоских волн, можно показать, что волновая фотография восстанавливает волновую функцию объекта*.

Следует отметить, что аппарат теории волновой фотографии существенно отличается от аппарата, использовавшегося в двумерной голографии Габора. Последний несколько похож на вариант, базирующийся на однозначной связи граничных условий с волновой функцией. Отличие заключается в том, что в случае двумерной голографии гра-

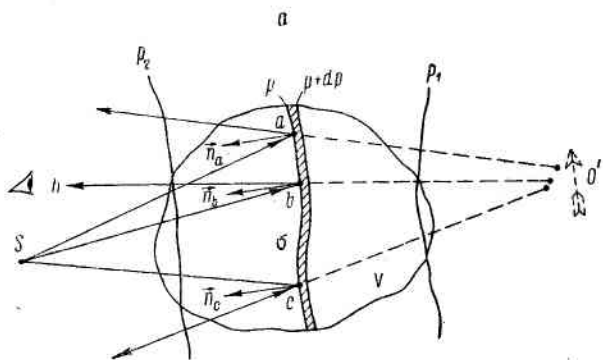


Рис. 3. К механизму действия волновой фотографии: P , P_1 , P_2 — изофазные поверхности фотографии картины стоячих волн; S — источник излучения; O' — изображение объекта, \vec{n}_a ; \vec{n}_b ; \vec{n}_c — нормали к изофазной поверхности.

ничные условия задаются на поверхности самой фотопластинки, а не на поверхностях пучностей стоячей волны.

Перечисленными исследованиями в середине 1961 г. были закончены наши работы в области голограммного метода.

Существенную роль в прекращении работ сыграло отсутствие четких перспектив использования этого метода в кино и телевидении, а также недооценка того эффекта, который могут оказать на широкую общественность голограммы даже самых простейших естественных объектов. То, что такие голограммы могут быть получены и что для этого необходим газовый лазер, нами было заявлено еще в 1962—63 гг. При этом было отмечено, что объект может быть любым, в том числе диффузно рассеивающим, а также, что изображение будет наблюдаться через голограмму, как через окно в пространстве предметов. Однако практически получить голограммы естественных объектов нам не удалось, так как тогда в нашем распоряжении не было газового лазера. Как известно, это было выполнено впоследствии сотрудниками Мичиганского университета Лейтом и Упатниксом.

Метод Лейта и Упатникса развился на базе идей голографии в двумерных средах, предложенной в 1949 г. английским физиком Деннисом Габором. Сущность метода Габора заключается в следующем (рис. 5, а). На фотопластинке F_2 , расположенной за объектом O , реги-

* Подробнее этот вариант рассмотрел Ван-Хеерден, который независимо и несколько позднее также предложил голографию в трехмерных средах.

стрируется теневая картина, возникающая при освещении объекта излучением монохроматического источника S .

Если объект достаточно мал, то теневая картина приобретает интерференционный характер: излучение, дифрагировавшее на объекте, интерферирует с излучением источника, которое попадет на фотопластинку, минуя объект.

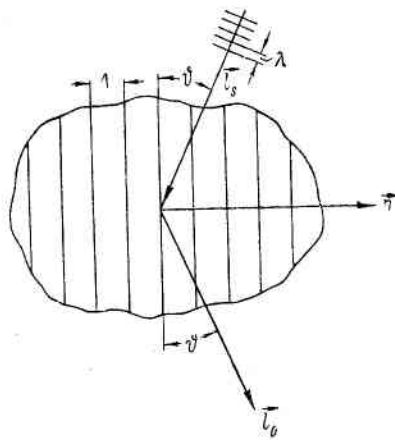


Рис. 4. Образование пространственной трехмерной гармоники: \vec{l}_s, \vec{l}_0 — лучевые векторы плоских волн, образующих гармонику; n — единичный вектор нормали к поверхности пучностей; λ — длина волны падающего излучения; Λ — пространственный период гармоники.

При реконструкции на проявленную фотопластинку — голограмму — снова направляется излучение монохроматического источника S . Записанная на голограмме интерференционная картина модулирует прошедшее через нее излучение таким образом, что в плоскости голограммы восстанавливается распределение амплитуд первоначальной волны. Однако фаза излучения совпадает при этом с фазой источника S , а не с фазой излучения, интерферировавшего в плоскости голограммы. В результате, кроме истинного изображения объекта O , восстанавливается также ложное изображение O_2 .

Таким образом, метод Габора позволял получать голограммы только специальных транспарантов, у которых площадь непрозрачных частей была значительно меньше площади прозрачных.

Другим существенным недостатком метода является то, что излучение мнимого и действительного изображений распространяется по одному и тому же пути. При этом возникает интерференция, и оба изображения сильно искажаются.

Все эти обстоятельства не позволяли получать с помощью данного метода изображения обычных непрозрачных предметов, и поэтому о возможности использования его в изобразительной технике даже никогда и не упоминалось.

О том, что вся окружающая объект картина стоячих волн несет весьма полное и неискаженное изображение объекта и что зона этой

картины, расположенная в области геометрической тени, является самой неудачной, Габору не было известно.

Следует отметить, что особенностью зоны геометрической тени является также и то, что период картины стоячих волн там очень велик и в сотни раз превышает толщину эмульсионного слоя фотопластинок. В этих условиях можно полностью пренебречь объемными эффектами и рассматривать голограмму как бесконечно тонкую поверхность с переменным показателем поглощения. Это обстоятельство, собственно, и позволяет отнести метод Габора к методам с записью в двумерных средах.

Рассмотрим метод Лейта и Упатниекса, который был опубликован в 1963—1964 гг., т. е. позднее работ автора настоящего доклада. Мы уже упоминали, что одним из существенных недостатков метода Габора является то, что при реконструкции излучение мнимого и действительного изображения распространяется по одному и тому же пути (рис. 5, в). Сущность метода Лейта и Упатниекса заключается в том, что фотопластинка во время экспозиции располагается в боковой зоне картины стоячих волн (рис. 5, а). Как видно из рис. 5, в этом случае при реконструкции действительное и мнимое изображения остаются на своих местах, однако образующие их лучи пространственно разделяются, и взаимные искажения изображений исчезают.

Когда известно, что изображение несет вся картина стоячих волн, все это кажется весьма простым, однако следует напомнить, что для того, чтобы найти такое простое решение, потребовалось около 15 лет, причем авторы пришли к нему сложным путем, анализируя пространственно-частотные спектры голограммы.

Используя свой метод, а также газовый лазер, Лейт и Упатникс в 1964 г. получили голограммы небольших естественных предметов. Эти фотографии, создающие совершенно необычные изображения, собственно и вызвали тот всеобщий интерес к голограммному методу, который мы наблюдаем в настоящее время. К недостаткам метода Лейта и Упатниекса следует отнести наличие ложного изображения, а также то, что реконструкция в этом случае может осуществляться только с помощью строго монохроматического источника излучения.

После того, как идеи трехмерной голографии получили широкое распространение, объемные эффекты — частичное гашение второго изображения — были замечены на голограммах Лейта и Упатниекса. И лишь в 1966 г. целому ряду американских исследователей удалось получить волновые фотографии.

Как и следовало ожидать, при освещении обычными источниками со сплошным спектром эти фотографии создавали весьма эффектные цветные пространственные изображения объектов.

В связи с отсутствием аргонового лазера в ГОИ многоцветные голограммы такого рода получить пока не удалось. Волновую фотографию, экспонированную гелий-неоновым лазером, мы, как это упоминалось ранее, осуществили.

Подведем итог исследованиям в области голографии, проведенным в ГОИ до появления оптических квантовых генераторов.

1. Нами было впервые показано, что полное неискаженное изображение объекта несет вся окружающая его пространственная картина стоячих волн и что отображающие свойства голограммы Габора являются весьма слабым отражением этого общего явления. Появившийся позднее метод Лейта и Упатниекса также представляет собою один из частных лучаев обнаруженного явления.

2. На этой основе был разработан так называемый метод волновой фотографии, впервые позволивший получить неискаженные изображения произвольных объектов. Этот метод до сих пор является наибо-

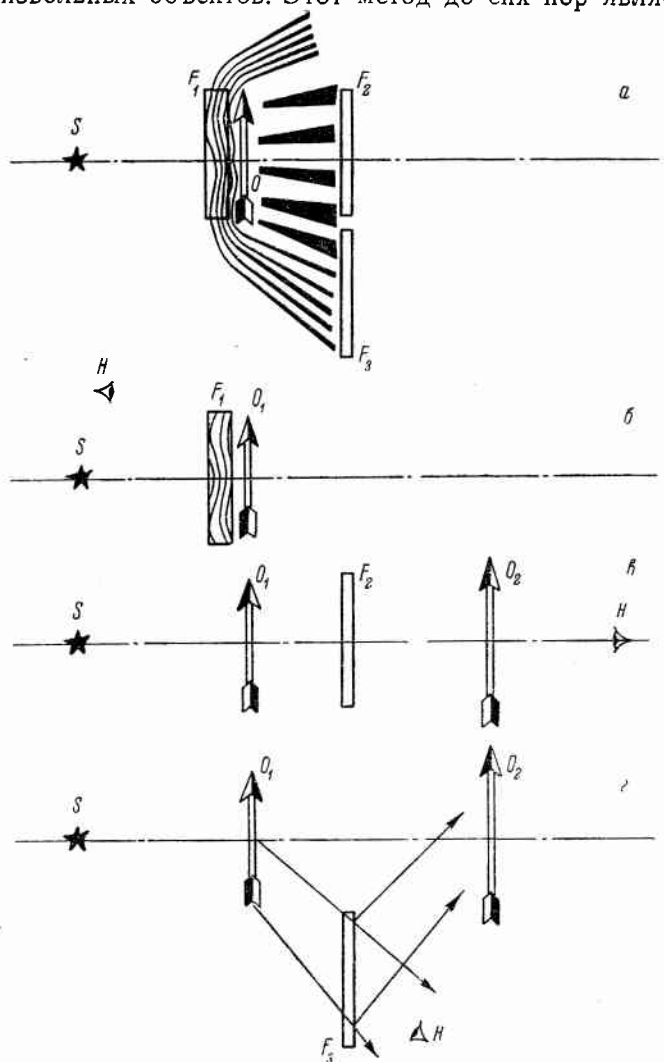


Рис. 5: *a* — получение голограмм по методам: волновой фотографии — фотопластинка в положении F_1 , Габора — фотопластинка в положении F_2 , Лейта и Упатниекса — фотопластинка в положении F_3 ; S — монохроматический источник излучения; O — фотографируемый объект (стрелка); *b* — реконструкция изображения по методу волновой фотографии: S — источник излучения (белый); F_1 — голограмма; O_1 — реконструированное изображение объекта; H — глаз наблюдателя; *в* — реконструкция изображения по методу Габора: S — монохроматический источник излучения; F_2 — голограмма; O_1 — мнимое изображение объекта; O_2 — действительное изображение объекта; H — глаз наблюдателя; *г* — реконструкция изображения по методу Лейта и Упатниекса: S — монохроматический источник излучения; F_3 — голограмма; O_1 — мнимое изображение объекта; O_2 — действительное изображение объекта; H — глаз наблюдателя.

лее полно восстанавливающим волновое поле излучения, рассеянного объектом. В отличие от других методов в этом случае восстанавливаются фаза излучения и спектральный состав, в результате при использовании во время реконструкции источника со сплошным спектром появляется единственное неискаженное цветное изображение объекта.

3. Создание метода волновой фотографии позволило нам еще в 1962 г. впервые поставить задачу использования голограммного метода для создания изобразительной техники, воспроизводящей полную иллюзию действительности изображаемого объекта.

Исследования в области голограммного метода были возобновлены в ГОИ в 1966 г. Основной целью этих исследований является осуществление приложений голографии, которые стали возможны благодаря развитию оптических квантовых генераторов. Мы не будем останавливаться здесь на этих работах, поскольку они еще не закончены. Разрешите только высказать некоторые соображения по поводу места голограммного метода в оптике.

Под словом оптика в настоящее время мы понимаем очень сложный комплекс знаний: геометрическую оптику, спектроскопию, интерферометрию и т. д.

С течением времени многие из этих разделов расширяются, приобретают самостоятельное значение и выделяются из оптики. Так, например, оптика движущихся сред вошла сейчас в теорию относительности, спектроскопия является, по существу, частью атомной физики. Неотъемлемой от оптики только один раздел — наука о получении и преобразовании изображений. Нетрудно заметить, однако, что базис этого раздела чрезвычайно узок.

Действительно, если исключить такие тривиальные случаи, как теневая проекция и камера-обскура, то оказывается, что известно только одно явление, в котором излучение обнаруживает способность образовывать изображения материальных тел, — явление образования изображения с помощью линзы. И на этом, казалось бы простом, явлении основана вся геометрическая оптика с ее многочисленными приложениями. Именно этому явлению мы обязаны также способностью познавать окружающий мир, так как нельзя представить себе разум, руководствующийся только слухом и осязанием.

Обнаруженное нами явление, которое обобщает явления, лежащие в основе методов Липпмана и Габора, — по существу второе известное явление, связанное с образованием изображения. Способность материальных тел отражаться друг в друге достигает здесь необычайной полноты и приобретает почти буквальный смысл. Трудно предсказать, насколько далеко может быть развито это свойство. В настоящий момент ясно, например, что с помощью данного метода можно получить своеобразные скульптурные модели объекта. Сейчас трудно сказать, можно ли использовать этот метод для синтеза атомарной структуры, например, молекулы гена.

Вторым существенным аспектом голограммного метода является возможность воспроизведения волновых полей. В настоящее время мы умеем воспроизводить только «мертвые» волновые поля, создаваемые стабильным излучением оптического квантового генератора, рассеянным на стабильном объекте. Можно ли записать и воспроизвести реальное волновое поле, несущее информацию о событиях в каждом атоме источника излучения и объекта, нам пока неясно. Решение этой проблемы оказало бы существенное влияние на ряд областей науки и техники.

В заключение разрешите воспользоваться случаем и поблагодарить академиков В. П. Линника, И. В. Обреимова, П. Л. Капицу, а также А. Е. Елькина за существенную поддержку, которую они оказали автору в весьма сложных условиях. Из общения с этими людьми автор вынес заключение, что отличительной чертой истинного ученого является не угасающий с годами большой и искренний интерес ко всем явлениям природы и общества, в том числе и к таким, которые лежат далеко за пределами выбранной специальности. Этим свойством в полной мере обладал и основатель нашего института Д. С. Рождественский.
