

3. Keve E. T., Annis A. D. Studies of phases, phase transitions and properties of some PLZT ceramics.—“Ferroelectrics”, 1973, vol. 5, p. 77.
4. Smith W. D., Land C. E. Scattering-mode ferroelectric — photoconductor image storage and display devices.—“Appl. Phys. Lett.”, 1972, vol. 20, N 4, p. 169.
5. Land C. E., Tracher P. D., Haertling G. H. Electrooptic ceramics.—“Appl. Sol. St. Sci.”, 1974, vol. 4, p. 137—233.
6. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М., Физматгиз, 1962.
7. Haertling G. H., Land C. E. Hot-pressed (Pb, La) (Zr, Ti)O₃ ferroelectric ceramics for electrooptic applications.—“J. Amer. Cer. Soc.”, 1971, vol. 54, N 1, p. 1.
8. Haertling G. H. Electrooptic ceramic materials.—“WESCON Techn. Pap.”, 1971, paper 31/1.
9. Liu et al. The piroelectric properties of the lanthanum-doped ferroelectric PLZT ceramics.—“Ferroelectrics”, 1972, vol. 3, p. 281.

*Поступила в редакцию 17 августа 1978 г.;
окончательный вариант — 8 декабря 1978 г.*

УДК 535.317.1 : 535.8

Ж. БЮЛЯБУА, Д. КУРЖОН
(Безансон, Франция)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГОЛОГРАММ В КАЧЕСТВЕ ВХОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НЕКОГЕРЕНТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Голография изучалась и развивалась, особенно во Франции, как средство записи трехмерных оптических изображений, т. е. как средство, позволяющее в любой момент восстановить амплитуду и фазу зарегистрированных волн. В последнее время многими исследователями предпринимались попытки найти голограммам другие применения.

Цель нашей работы — показать возможность модификации классических свойств оптических систем при использовании голограмм в качестве их элементов.

Рассмотрим два примера. При демонстрации голографического фильма для большой аудитории зрителей необходимо иметь специальный голографический экран, т. е. оптический элемент, который на этапе восстановления формирует множество изображений (по числу зрителей или мест в зале). В этом случае голограмма выполняет две различные функции: во-первых, формирует трехмерные изображения; во-вторых, мультиплицирует голографические изображения.

Другой пример. Известно, что восстановление классических голограмм, как правило, производится в когерентном свете. Исключения составляют лишь голограммы Денисюка [1]. Для того чтобы избежать этого требования и тем самым использовать при восстановлении некогерентный свет, были предложены различные методы получения голограмм, в том числе и метод «радужных голограмм», описанный Бентоном [2]. Процесс получения таких голограмм является двухступенчатым*. Вторичная голограмма дает восстановленное изображение в

* Ф. Юу недавно показал, что такие голограммы можно получить и в один этап [3]. В этом случае используются изображающие свойства линзы.

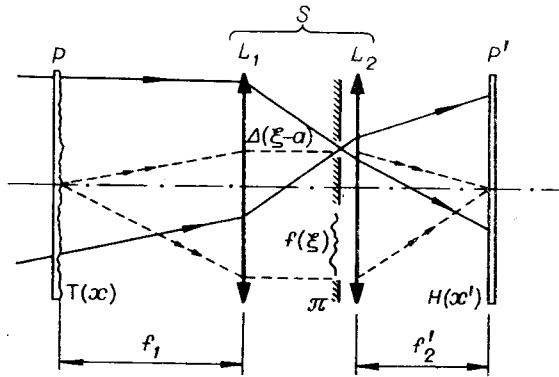


Рис. 1.

белом свете благодаря тому, что восстановленные от первичной голограммы волны фильтруются узкой щелью. Таким образом, благодаря фильтрации ослабляются требования к когерентности света. Этот метод представляет интерес даже несмотря на потерю вертикального параллакса. Первичная голограмма в этом случае выполняет роль исходного для получения вторичной голограммы элемента.

Покажем далее, каким образом голограммы, используемые в качестве элементов систем, могут изменять их свойства. Основное отличие нашей первичной голограммы от голограммы Бентона состоит в том, что на ней регистрируется информация не в виде объекта, а в виде, при котором восстановленные волновые фронты играют в системе роль несущей. Второе отличие — ослабление требований к когерентности, благодаря введению в систему первичной голограммы.

Пространственно-некогерентная голографическая регистрация. Рассмотрим голографическую установку, схематически показанную на рис. 1. Пусть на транспарант с прозрачностью $T(x)$ падает монохроматический пространственно-некогерентный пучок света. Выделим на нем одну точку и будем считать ее точечным источником $\delta(x)$. Этот источник формирует плоскую волну, освещающую объект $f(\xi)$ и отверстие $\Delta(\xi-a)$. Тогда распределение интенсивности света в плоскости изображения P' , расположенной в задней фокальной плоскости линзы L_2 , можно получить с помощью фурье-преобразования:

$$h(x') = |FT[f(\xi) + \delta(\xi-a)]|^2; \quad (1)$$

$$h(x') = |F(x') + \exp\{-j2\pi x'a\}|^2, \quad (2)$$

где $h(x')$ — импульсный отклик оптической системы S , состоящей из линз L_1 и L_2 , а $F(x')$ — фурье-преобразование функции $f(\xi)$.

Если теперь источник $\delta(x)$ сместить во входной плоскости на величину x_0 , то распределение интенсивности принимает вид $h(x' - \gamma x_0)$ (γ — увеличение системы S).

Таким образом, входной транспарант можно рассматривать как некогерентный протяженный источник, определяемый выражением

$$T(x) = \int T(x_0) \delta(x - x_0) dx_0. \quad (3)$$

Изображение, формируемое в плоскости P' , является результатом наложения большого числа элементарных голограмм $h(x' - \gamma x_0)$, т. е.

$$I(x') = \int h(x' - \gamma x_0) T(x_0) dx_0 = h \otimes T, \quad (4)$$

где \otimes — символ свертки. Восстановим полученную голограмму. Для этого выполним обратное преобразование Фурье от распределения $I(x')$. Тогда интенсивность полученного распределения будет иметь следующий вид:

$$|i(\xi)|^2 = |a(\xi)|^2 |s(\xi)|^2, \quad (5)$$

где $a(\xi)$ — фурье-преобразование от функции $h(\cdot)$, равное автокорреляции амплитудного распределения

$$g(\xi) = f(\xi) + \delta(\xi - a), \quad (6)$$

находящегося в зрачковой плоскости π ; $s(\xi)$ — фурье-преобразование от распределения $T(x)$, описывающего интенсивность источника. Если функция $|s(\xi)|^2$ близка к константе, то

$$|i(\xi)|^2 \propto |a(\xi)|^2. \quad (7)$$

Таким образом, распределение интенсивности света, восстановленное из голограммы, зарегистрированной в выходной плоскости, пропорционально квадрату автокорреляционной функции $g(\xi)$. Оно включает различные члены, среди которых присутствуют и два боковых, равных

$$|f(\xi) * \delta(\xi - a)|^2 = |f(\xi - a)|^2; \quad (8)$$

$$|f^*(\xi) * \delta(\xi + a)|^2 = |f^*(\xi + a)|^2. \quad (9)$$

Эти члены соответствуют классическим изображениям, восстанавливаемым из фурье-голограммы. Функцию $|s(\xi)|^2$ можно считать почти постоянной, если протяженный источник эквивалентен точечному источнику, т. е. световому пучку, пространственно отфильтрованному, или если спектр распределения интенсивности во входной плоскости S является «белым шумом», т. е. в спектре с равной вероятностью присутствуют все частоты. Второе свойство присуще транспарантам, рассеивающие центры которых очень малы и случайно распределены. Это имеет место в том случае, когда транспарант — фурье-голограмма равномерно освещенного диффузора. Тогда интенсивность света в восстановленном изображении диффузора близка к константе и можно сказать, что прозрачность голографического транспаранта эквивалентна белому шуму. На практике, однако, из-за того, что диффузор ограничен прямоугольной или квадратной апертурой, восстановленное в фурье-плоскости изображение (спектральная плотность прозрачности голограммы) содержит центральную часть и два симметричных «плато». Таким образом, более строго, прозрачность является ограниченным по полосе белым шумом.

Некогерентная проектирующая система. Выше было показано, что изображение, формируемое в плоскости S , — голограмма. Этот же результат можно получить исходя из проектирующих свойств системы. Обратимся к рис. 2. При помещении на входе системы S транспаранта со случайной прозрачностью $T(x)$ в ее выходной плоскости P' формируется изображение, интенсивность которого

$$I(x') = \int T(x) H(x' - x) dx = T \otimes H, \quad (10)$$

где H — импульсный отклик системы.

В частотной области выражение (10) принимает следующий вид:

$$i(\xi) = s(\xi) h(\xi), \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} s(\xi) &= FT|T(x)|; \\ h(\xi) &= FT|H(x)|. \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь $h(\xi)$ — модуляционная передаточная функция системы S . Известно, что эта функция пропорциональна автокорреляции амплитудного пропускания $g(\xi)$ входного зрачка системы. Предположим снова, что

усредненный спектр мощности $T(x)$ близок к равномерному, т. е. $\langle |s(\xi)|^2 \rangle = \text{const.}$ Тогда из (11) следует, что

$$|i(\xi)|^2 \propto |h(\xi)|^2 = |g \otimes g|^2. \quad (13)$$

Если теперь зрачковую функцию g в плоскости π' определить как

$$g(\xi) = f(\xi) + \delta(\xi - a),$$

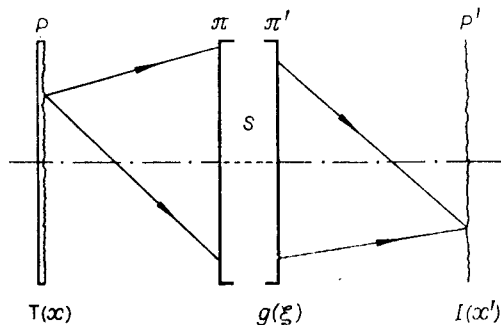


Рис. 2.

то в этом случае уравнение (13), как и (7), будет содержать 3 различных члена. Таким образом, описанная проецирующая система формирует изображение $I(x')$, которое при выполнении равенства (6) является голограммой объекта $f(\xi)$.

Существенно, что несмотря на пространственно-некогерентное освещение, изображение $I(x')$ тем не менее является фурье-голограммой объекта $f(\xi)$. Это достигается благодаря использованию первичной голограммы $T(x)$. В этом случае восстановленный волновой фронт, соответствующий диффузору, модулирует объект $f(\xi)$. При этом каждый элемент транспаранта T делит падающий световой луч на 3 компонента. Благодаря проецирующим свойствам системы, когерентные волновые фронты, соответствующие $+1$ -му и 0 -му порядкам, суммируются в выходной плоскости. Результирующая интерференционная картина содержит информацию об объекте $f(\xi)$.

На рис. 3 показаны изображения, восстановленные из голограммы, зарегистрированной в некогерентной системе. Качество полученных при этом изображений вполне удовлетворительное.

Отметим некоторые особенности голографического транспаранта, вводимого в оптическую систему S . Транспарант имеет произвольную диаграмму рассеяния, усредненный спектр мощности прозрачности можно задавать априорно, и, наконец, он может быть аксиальным или внеосевым оптическим компонентом.

Тот факт, что восстановленный волновой фронт воспроизводит размещенный в зрачке системы объект, может представить интерес при пространственном или хроматическом кодировании. Различные применения этого метода для когерентного случая были рассмотрены год назад совместно с Г. Гавриловым [4, 5].

Несмотря на некоторые преимущества голографического транспаранта, он обладает тем недостатком, что рассеивающие свойства его

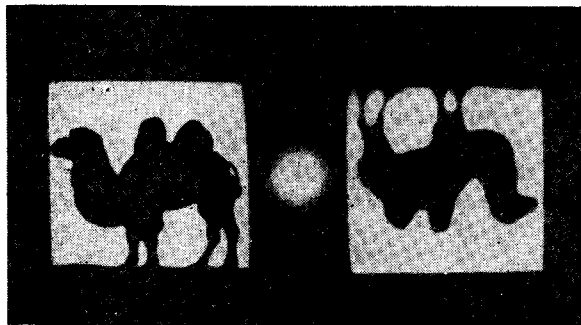


Рис. 3.

зависят от длины волны. Описанная система кодирования информации в выходной плоскости не допускает использования белого света. Поэтому при регистрации голограмм в белом свете необходимо избегать влияния хроматической дисперсии.

Регистрация и восстановление голограмм в пространственно-некогерентном белом свете. Как отмечалось ранее, введение

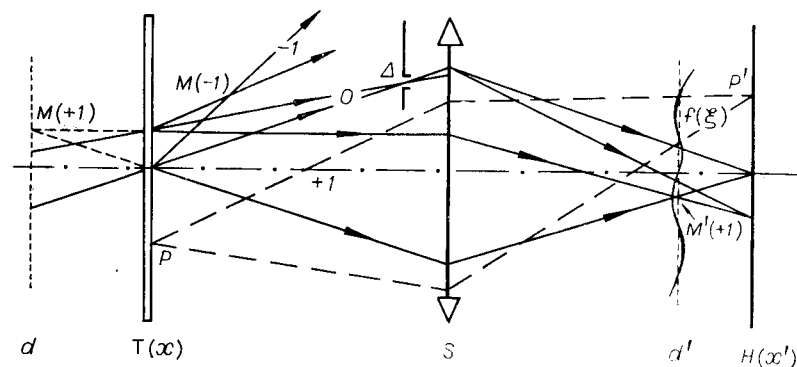


Рис. 4.

с помощью голографического транспаранта частичной когерентности позволяет осуществлять голографическое кодирование информации. При этом транспарант должен освещаться монохроматическим источником света. Тем не менее этот метод может быть использован и при освещении транспаранта источником белого света, например вольфрамовой галогенной лампой; в этом случае необходимо использовать ахроматическую оптическую систему и модифицировать свойства голограммы Т.

Если объектив S ахроматический, то изображение транспаранта $T(x)$ в выходной плоскости P' в пределах изопланарной области идентично объекту (рис. 4). В отсутствие распределения $f(\xi)$ и отверстия Δ в плоскости $H(x')$ независимо от длины волны регистрируются микрополосы, предварительно записанные на голографическом транспаранте. Регистрация информации об объекте $f(\xi)$ осуществляется путем модуляции полос. Очевидно, что введение распределения $f(\xi)$ разрушает ахроматичность интерференционных полос. Для того чтобы уменьшить влияние спектральной ширины пучка света, распределение $f(\xi)$ необходимо установить непосредственно перед голографической пластинкой (это условие эквивалентно условию получения сфокусированной голограммы).

Первичная голограмма, играющая роль диффузора, расщепитель и специальный оптический конденсор должны обеспечивать равномерное освещение распределения $f(\xi)$. Это возможно при использовании, с одной стороны, голографического транспаранта в виде сфокусированной голограммы равномерно освещенного диффузора, а с другой — источника белого света конечного размера. Транспарант является классической голограммой, зарегистрированной обычными голографическими средствами. В этом случае изображение диффузора с помощью объектива проецируется в плоскость, лежащую вблизи плоскости фотографической эмульсии, на которую под некоторым углом падает когерентная опорная волна. При помещении такой сфокусированной голограммы во входную плоскость проекционной системы и освещении ее некогерентным светом восстанавливаются два квазиахроматических изображения диффузора. Одно из них, обозначенное d на рис. 4, мнимое. С помощью объектива S оно проецируется далее в плоскость регистрируемого объекта $f(\xi)$. Таким образом, объектив S формирует одновременно изображение $T(x)$ в выходной плоскости P' и изображение d' , соответствующее исходному диффузору. Нулевой порядок голограммы выделяется отверстием Δ . Что касается — 1-го порядка, то он в системе не используется. В качестве примера на рис. 5 показано изображение прозрачных объектов, восстановленное из распределения $H(x')$ при освещении его белым светом. Объект $f(\xi)$, помещенный внутри оптической системы, состоит из трех различных геометрических фигур.

Дифракционная эффективность голограммы $H(x')$ примерно такая же, как и входной голограммы. Последняя все еще является оптическим элементом, свойства которого допускают оптическую обработку информации в некогерентном свете.

Заключение. Рассмотренные два голографических метода кодирования свидетельствуют о том, что голограммы могут играть роль активных оптических элементов не только в когерентном свете, но также и в некогерентном. Использование голографических транспарантов во входной

плоскости некогерентной проекционной системы приводит к модификации их классических свойств. Эти модификации могут быть определены заранее: на этапе регистрации голографического транспаранта T .

Кроме различных применений, таких как голографическая регистрация, оптическая обработка информации, метрология, описанный метод представляет интерес также и в других случаях, например, когда объект размещается в зрачковой плоскости изображающей линзы, а транспарант — во входной плоскости. В этом случае входная и зрачковая плоскости системы меняются ролями. При этом передаточные свойства оптической системы зависят от выбора входной голограммы.

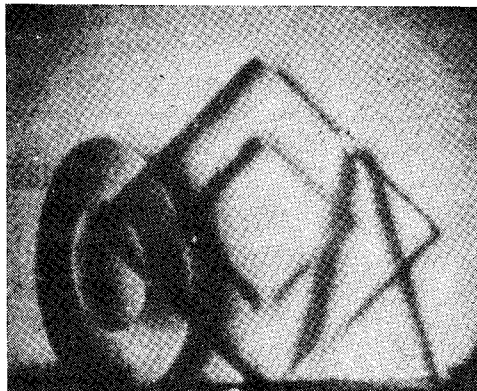


Рис. 5.

ЛИТЕРАТУРА

1. Денисюк Ю. Н.— «Докл. АН СССР», 1962, т. 7, с. 543.
2. Benton S. A.— «J. Opt. Soc. of Amer.», 1969, vol. 59, p. 1545A.
3. Юу Ф.— В кн.: III Всесоюз. конф. по голографии. (Тезисы докладов.) Л., 1978, с. 406.
4. Gavrilov G., Courjon D., Bulabois J.— «Opt. Acta», 1977, vol. 24, p. 837.
5. Bulabois J., Gavrilov G., Courjon D.— «J. of Optics» (Paris), 1978, t. 9, N 1, p. 5—8.

Поступила в редакцию 23 октября 1978 г.