

07

© 1990 г.

АССОЦИАТИВНЫЕ СВОЙСТВА ПСЕВДОГЛУБОКОЙ ГОЛОГРАММЫ

Ю. Н. Денисюк, Н. М. Ганжерли

Экспериментально и теоретически рассмотрена возможность записи и ассоциативного считывания безопорной псевдоглубокой голограммы — наклонной тонкой голограммы, на которой сагиттальной системой пучков зарегистрирован одномерный строчечный объект. Приведены результаты экспериментов, в которых считывание осуществлялось взаимно дополняющими друг друга фрагментами объекта. Полученные при этом изображения достаточно хорошо совпали с построенными с помощью указанного графического метода. Однако эксперимент выявил также наличие дополнительных составляющих, которые были объяснены влиянием нелинейности фотоматериала.

В работах [1, 2] было введено понятие «псевдоглубокая голограмма» — наклонная тонкая голограмма, на которой сагиттальной системой пучков зарегистрирован объект, считываемый при восстановлении голограммы только в пределах соответствующей этому объекту строки. Там же было показано, что такая голограмма по своим свойствам полностью идентична обычной голограмме, зарегистрированной в глубокой трехмерной среде. При этом роль глубины псевдоглубокой голограммы играет ее протяженность вдоль считывающего пучка.

Одним из существенных свойств обычной глубокой голограммы является возможность осуществления с ее помощью ассоциативных операций, которая была обоснована теоретически П. И. Ван Херденом еще в 1963 г. [3]. Однако дальнейшее развитие исследований в этом направлении было весьма медленным ввиду фактического отсутствия светочувствительных сред, в которых можно было бы записать голограмму на достаточно большую глубину. Вместе с тем в настоящее время в связи с возрастанием интереса к задачам оптической обработки информации интерес к возможности осуществления ассоциативных операций существенно увеличился (см., например, [4, 5]).

В настоящей работе приведены результаты экспериментов по записи и ассоциативному считыванию безопорных псевдоглубоких голограмм, а также рассмотрены механизмы этого явления и сопровождающих его эффектов. Геометрия записи и считывания таких голограмм приведена на рис. 1. Объект — строчка a_1 — a_n расположен в плоскости σ , в которой лежат также и лучи излучения, испущенного этим объектом ($a_1 0$, $a_n 0$). Голограмма располагается в плоскости H , которая наклонена на угол β по отношению к плоскости σ . На этапе записи на голограмме регистрируется вся строчка объекта a_1 — a_n . На этапе восстановления на голограмму направляется излучение какой-то части объекта, например $a_1 a_2$. Ассоциативные свойства голограмм проявляются в том, что излучение этой части, взаимодействуя со структурой голограммы, восстанавливает весь остальной объект, в данном случае часть строки a_3 — a_n .

Рассмотрим метод графического построения ассоциативного изображения, основанный на использовании в качестве начала отсчета углов направлений штрихов решеток, записанных на псевдоглубокой голограмме, например решетки, образованной в результате записи точек a_1 и a_2 (рис. 1).

Направление штрихов этой решетки S_{12} лежит на пересечении плоскости голограммы H с плоскостью yt , которая проходит через середину участка $a_1 a_2$

и перпендикулярна плоскости σ . В соответствии с основным свойством голограммы данная решетка преобразует луч a_1 в a_2 , и наоборот. С помощью несложных рассуждений нетрудно найти простое правило построения любых других лучей, претерпевших дифракцию на данной решетке (см., например, [6]). Оказывается, что относительно направления, в котором пространственная частота решетки равна нулю, т. е. относительно направления ее штриха, угловая координата луча при дифракции остается неизменной. В данном случае это означает, что если на решетку, заданную штрихом S_{12} , падает, например, луч a_3 , то дифрагированный луч a'_3 должен лежать на малом круге a_3l , описанном радиусом $S_{12}a_3$ из точки S_{12} , как из центра.

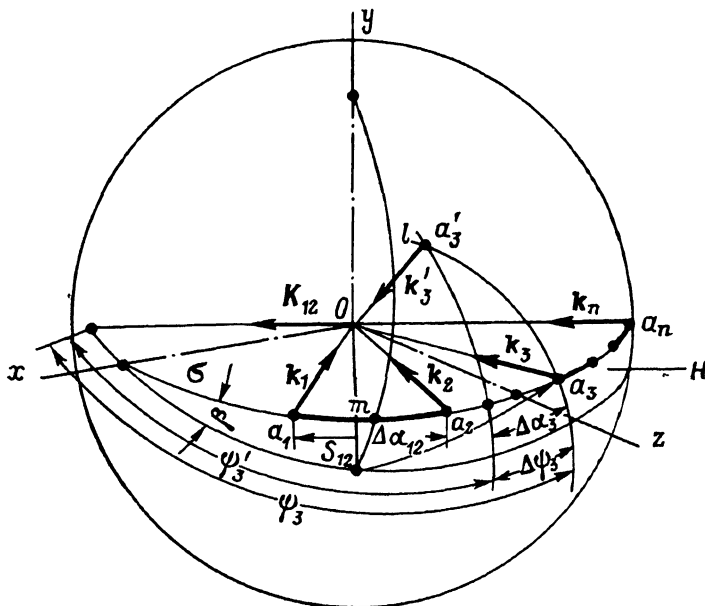


Рис. 1. К геометрии записи и считывания безопорной псевдоглубокой голограммы.

σ — плоскость, в которой расположен строчечный объект $a_1 - a_n$; H — плоскость, в которой лежит голограмма; S_{12} — направление штрихов решетки, записанной на голограмме точками a_1 и a_2 объекта; K_{12} — вектор решетки; K_1, K_2, \dots, K_n — волновые векторы излучения точек объекта a_1, a_2, \dots, a_n .

Другая угловая координата дифрагированного решеткой луча задается относительно направления ее максимальной пространственной частоты. Это направление определяется вектором решетки K_{12} , который перпендикулярен штриху S_{12} и лежит в плоскости голограммы H . Оказывается, что в этом направлении действие решетки сводится к тому, что проекции волновых векторов падающего k_3 и дифрагированного решеткой k'_3 излучения на вектор решетки K_{12} должны отличаться на целое число значений вектора решетки

$$k(\cos \psi_3 - \cos \psi'_3) = nK_{12}, \quad (1)$$

где $k=2\pi/\lambda$ — абсолютная величина волновых векторов падающей и дифрагированной волн, λ — длина волны света, $K_{12}=2\pi/\Lambda$ — вектор решетки, Λ — ее пространственный период, ψ_3 и ψ'_3 — углы наклона волновых векторов падающего и дифрагированного излучений по отношению к вектору K_{12} .

Ограничимся парааксиальным случаем, т. е. случаем, когда угловая протяженность объекта $a_1 - a_n$ мала и веер лучей объекта располагается вблизи нормали к оси x . Используя простейшие тригонометрические соотношения, выражение (1) можно записать тогда в следующем виде:

$$k\Delta\psi_3 \approx nK_{12}, \quad (2)$$

где $\Delta\psi_3 = \psi_3 - \psi'_3$.

Если принять также, что угол β между поверхностью голограммы и падающим на нее излучением объекта мал, то можно считать, что дуги малых кругов,

соответствующих равным значениям ψ_3 и ψ'_3 , отсекают на дугах H и σ равные отрезки. Тогда вместо (2) получим

$$k\Delta\alpha_3 \approx nK_{12}, \quad (3)$$

где $\Delta\alpha_3 = \alpha_3 - \alpha'_3$ — проекция на плоскость σ углового смещения луча при дифракции его на решетке (рис. 1).

Применяя (3) к взаимному преобразованию лучей a_1 и a_2 и учитывая, что оно соответствует случаю $n=1$, найдем

$$\Delta\alpha_{12} \approx K_{12}/k, \quad (4)$$

где $\Delta\alpha_{12}$ — угловое расстояние между точками a_1 и a_2 .

Подставляя (4) в (3) и полагая в (3) $n = \pm 1$, получим следующее окончательное выражение для основного и сопряженного изображений точки a_3 , восстановленных решеткой K_{12} ,

$$\Delta\alpha_3 = \pm \Delta\alpha_{12}. \quad (5)$$

Таким образом, когда на псевдоглубокой голограмме записан параксиальный пучок лучей, можно принять, что при дифракции лучей на данной решетке их проекции на плоскость объекта σ смещаются на одну и ту же величину, характерную для этой решетки.

Эксперименты по записи и считыванию ассоциативных псевдоглубоких голограмм проводились по схеме, совпадающей с приведенной на рис. 1. В качестве объекта при этом использовалась щель, перед которой был установлен одномерный матовый диффузор. Такой диффузор изготавливался методом нанесения системы продольных царапин на стекло с помощью абразивного круга. Расстояние от объекта до центрального участка голограммы было порядка 71 мм. Длина щели была равна 11 мм, что при наблюдении из центра голограммы соответствовало угловому размеру объекта $8^\circ 50'$. Ширина щели была равна 0.135 мм или приблизительно $8'$ в угловой мере. Чтобы четче зафиксировать факт восстановления объекта, на щель были нанесены метки в виде непрозрачных промежутков. Объект освещался узким лучом гелий-неонового лазера, предварительно расширенным в одном направлении с помощью дисперсионного расширителя, составленного из трех призм.

Угол между поверхностью голограммы и системой лучей объекта (угол β на рис. 1) составлял 10° . Регистрация голограмм осуществлялась на участках, имеющих вид полосок, ширина которых вдоль направления щели составляла 12 мм, а глубина вдоль направления лучей объекта $d' = 5$ мм. Голограммы регистрировались на фотопластинках ВР—Л с разрешающей способностью порядка 1000 лин./мм. Пластины проявлялись на месте с помощью так называемого скоростного проявителя, который по литературным данным наряду с модуляцией амплитуды вносит также и фазовую модуляцию [7]. Голограммы регистрировались по безопорной схеме, т. е. на голограмме регистрировалось излучение, рассеянное всеми точками объекта, референтная волна при этом отсутствовала.

Считывание полученной таким способом голограммы производилось частью зарегистрированного на ней объекта. Результаты реконструкции приведены на рис. 2. При этом на рис. 2, а приведено изображение объекта, который записывался на голограмме. Входящая в состав этого объекта длинная черточка P в дальнейшем называется «полоской», система коротких черточек t_1, t_2, t_3 — «пунктиром». На рис. 2, б приведена фотография изображения, полученного в том случае, когда голограмма восстанавливалась «полоской». На рис. 2, в представлена фотография изображения, возникавшего в случае, когда голограмма реконструировалась «пунктиром».

Как видно из рисунков, в обоих случаях ассоциативные свойства голограммы проявились весьма определенно. В частности, в случае, изображенном на рис. 2, б, полоска восстановила четкое изображение «пунктира», в случае, соответствующем рис. 2, в, «пунктир» восстановил изображение «полоски». Как это и следует из принципа действия псевдоглубокой голограммы, все, что относится к изображению лучи, соответствующие явлениям интермодуляции и сопряженным изображениям, уведены вверх и вниз от линии объекта.

Сама линия объекта свободна от шумов, за исключением области, непосредственно прилегающей к освещенной части объекта, с помощью которой осуществляется реконструкция.

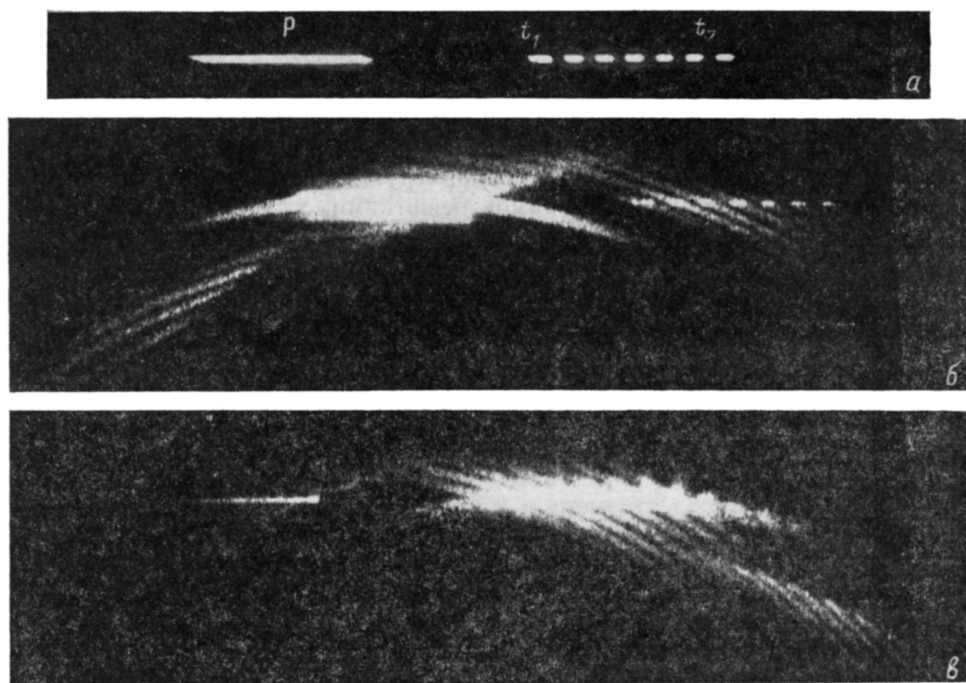


Рис. 2. Экспериментальные и теоретические результаты ассоциативной реконструкции псевдоглубокой голограммы.

a — конфигурация объекта, зарегистрированного на голограмме (*P* — фрагмент объекта, названный «полоской»; t_1, t_2, t_3 — фрагмент, названный «пунктиром»); *b, в* — изображения, восстановленные в случае, когда реконструкция осуществляется «полоской» и «пунктиром» соответственно, *г, д* — результаты теоретического построения изображения для случая реконструкции «полоской» и «пунктиром» соответственно. Влияние нелинейности фотоматериала проявляется в том, что при реконструкции «полоской» появляются составляющие, которые могли быть восстановлены только «пунктиром», и наоборот.

Для того чтобы более полно разобраться в результатах эксперимента, изображения, соответствующие случаю восстановления «полоской» и «пунктиром», были построены теоретически (рис. 2, *г, д*). При построении использовался графический метод, основанный на использовании выражения (5), который в об-

щих чертах сводился к следующему (рис. 3). Часть сферы, приведенной на рис. 1, с некоторым допустимым в данном случае приближением изображается в виде участка плоскости. При этом линейное расстояние между плоскостью объекта σ и плоскостью голограммы H , а также размеры элементов объекта P ; $t_1, t_2; \dots$ выдерживаются пропорциональными их угловым размерам на сфере.

На рис. 3 приведен процесс построения основных составляющих восстановленного изображения для случая, когда голограмма реконструируется «полоской». I составляющая — «ассоциативное изображение недостающей части объекта». Излучение точек «полоски» P_1, P_2, P_3 , взаимодействуя с излучением точек «пунктира» t_1, t_2, t_3 , образует при записи голограммы решетки $(P_1 t_1) (P_1 t_2) (P_2 t_1) (P_2 t_2) \dots$. При реконструкции излучение каждой точки «полоски», взаимодействуя со «своими» решетками, т. е. теми, в образовании

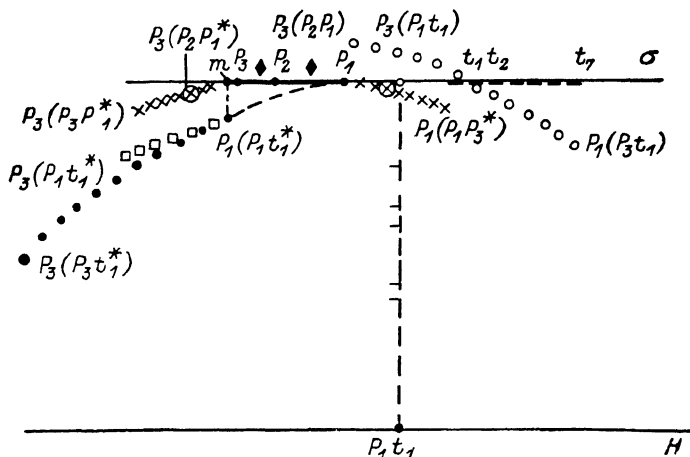


Рис. 3. Графический метод построения ассоциативного изображения, восстановленного псевдоглубокой голограммой.

σ — плоскость объекта, H — плоскость голограммы. Рассмотрен процесс восстановления голограммы фрагментом объекта, названным «полоской» (точки P_1, P_2, P_3).

которых оно участвовало в силу основного свойства голограммы, восстановит изображения точек «пунктира» t_1, t_2, t_3 . Какого-либо специального построения в этом случае не требуется.

II составляющая — «автоассоциативное изображение восстанавливающей части объекта». Излучение различных точек «полоски» P , взаимодействуя между собой, образует при записи голограммы решетки $(P_1 P_2) (P_1 P_3) \dots (P_2 P_1) (P_2 P_3) \dots$.

При реконструкции излучение одних точек «полоски», взаимодействуя со своими решетками, восстановит изображение других точек этой же полоски. Специального построения в этом случае также не требуется.

III составляющая — «сопряженные ассоциативные изображения недостающей части объекта». Излучение точки полоски P_1 , взаимодействуя с гармоникой $P_1 t_1$, кроме истинного изображения точки t_1 (см. I) восстановит сопряженное изображение этой точки $P_1 (P_1 t_1^*)$. В соответствии с выражением (5) это изображение найдем следующим образом: отложим от точки P_1 влево отрезок, равный $P_1 t_1$, и из конца этого отрезка (точки m) восстановим перпендикуляр к поверхности σ . Далее найдем положение штриха решетки $(P_1 t_1)$, на которой рассеивается излучение точки P_1 . Для этого из середины отрезка $P_1 t_1$ — точки n проведем перпендикуляр к σ до пересечения его с плоскостью голограммы H . Сопряженное изображение точки $P_1 (P_1 t_1^*)$ найдем на пересечении перпендикуляра, восстановленного из точки m , и окружности с центром в точке $P_1 t_1$, проходящей через точку P_1 . Аналогичное построение для случая реконструкции точкой P_3 даст точку $P_3 (P_3 t_1^*)$. Изображения, созданные всеми остальными промежуточными точками полоски P расположатся вдоль линии, обозначенной на рис. 3 точками. Остальные элементы t_2, t_3, \dots также создадут соответ-

ствующие им полосы в восстановленном изображении (на рис. 3 они не обозначены).

IV составляющая — «сопряженное автоассоциативное изображение восстанавливающей части объекта». Излучение каждой точки восстанавливающей части объекта (например, P_1), взаимодействуя со «своими» гармониками, например P_1P_3 , восстанавливает не только истинное изображение (см. II), но и сопряженное изображение $P_1(P_1P_3^*)$. Это изображение найдем, откладывая вправо от P_1 отрезок P_1P_3 на пересечении соответствующих перпендикуляра и окружности. Аналогично точка P_3 восстановит сопряженное изображение $P_3(P_3P_1^*)$. Сопряженные изображения, созданные промежуточными точками «полоски» P , обозначены на рис. 3 крестиками.

Рассмотрим элементы восстановленного изображения, созданные в результате взаимодействия излучения точек P с «чужими» решетками, т. е. с такими, в образовании которых они не участвовали.

V составляющая — «интермодуляционное ассоциативное изображение недостающей части объекта». Излучение восстанавливающей части объекта, например точки P_1 , взаимодействует не только со своими гармониками, например P_1t_1 , но и с гармониками, созданными другими точками полоски P , например P_3t_1 . Изображение $P_1(P_3t_1)$, созданное, например, точкой P_1 при взаимодействии с решеткой (P_3t_1), найдем, откладывая отрезок P_3t_1 вправо от точки P_1 на пересечении соответствующих перпендикуляра и окружности. Другие перекрестные изображения точек полоски P и элемента t_1 заполняют линию, проходящую через элемент t_1 (на рис. 3 эта линия обозначена кружками).

VI, VII составляющие — «интермодуляционные прямые и сопряженные изображения точек восстанавливающей части объекта». В этом случае, например, излучение точки P_3 восстанавливающей части объекта, взаимодействуя с гармоникой P_2P_1 , созданной излучением других точек этой же части, создает изображения $P_3(P_2P_1^*)$ и $P_3(P_2P_1)$. Эти составляющие, обозначенные на рис. 3 звездочками и темными квадратами, расположены приблизительно там же, где и сопряженные ассоциативные составляющие восстанавливающей части объекта (см. IV), обозначенные на рис. 3 крестиками.

VIII составляющая — «сопряженные интермодуляционные ассоциативные изображения недостающей части объекта». В этом случае, например, излучение точки P_3 восстанавливающей части объекта, взаимодействуя с решеткой (P_1t_1), созданной в результате интерференции излучения другой точки восстанавливающей части объекта с точкой t_1 , создает точку $P_3(P_1t_1^*)$. Все остальные промежуточные точки создадут систему, обозначенную на рис. 3 светлыми квадратами.

С помощью рассмотренного метода были построены восстановленные изображения для случаев, когда голограмма восстанавливалась излучением «полоски» (рис. 2, *г*) и излучением «пунктира» (рис. 2, *д*). Сравнивая соответствующие рисунки (2, *б* с 2, *г* и 2, *в* с 2, *д*), нетрудно заметить, что результаты теории достаточно хорошо совпадают с экспериментальными данными, однако вместе с тем на экспериментально полученных изображениях присутствуют некоторые дополнительные структуры, которые теория не предсказывает. Нетрудно заметить, что эти структуры имеют такой вид, как будто голограмма, считываемая «полоской», одновременно считывалась «пунктиром», и наоборот. Предположение о том, что названные дополнительные структуры возникают благодаря считыванию голограммы реконструированным в толще слоя голограммы изображением еще раз, не может быть принято во внимание, так как голограмму при данных условиях эксперимента явно можно считать тонкослойной.

Нетрудно показать, что интересный эффект своеобразного «самовзаимодействия» тонкой голограммы обусловлен нелинейным характером записи в фотоматериале. На самом деле все рассмотренные выше построения проводились в предположении, что запись носит линейный характер, т. е. амплитудный коэффициент пропускания голограммы пропорционален экспозиции и в соответствии с этим при дифракции волны на решетке возникают только два порядка (+1 и -1). В реальных условиях эксперимента запись, как правило, носит нелинейный характер, причем все виды нелинейности ведут приблизительно к одним и тем же следствиям — появлению кратных гармоник. Так как харак-

тер нелинейности не очень влияет на общий характер результата, то введем нелинейность фотоматериала простейшим способом — возведем коэффициент пропускания линейной голограммы в квадрат.

Физически такую нелинейную голограмму можно представить в виде двух линейных голограмм, установленных последовательно друг за другом. При реконструкции такой системы первая голограмма восстановит записанное на ней волновое поле объекта, которое в свою очередь явится реконструирующей волной для второй голограммы. В результате такого повторного считывания за голограммой и появятся те дополнительные составляющие, которые наблюдались на эксперименте.

Для того чтобы окончательно убедиться в том, что эффект самосчитывания голограммы обусловлен нелинейным характером записи голограммы на фотоматериале, было предпринято изменение условий ее проявления. Оказалось, что при уменьшении времени проявления, когда запись можно было еще считать линейной, дополнительные составляющие практически исчезали. Следует отметить, что достаточно общий характер проведенного нами рассмотрения причин возникновения эффекта самовоздействия тонкой псевдоглубокой голограммы позволяет считать, что этот эффект носит достаточно общий характер и распространяется на другие виды голограмм.

Оценивая рассмотренные результаты эксперимента в целом, в первую очередь необходимо отметить относительно низкую дифракционную эффективность ассоциативной реконструкции. Действительно, из всех восьми перечисленных процессов, сопровождающих восстановление псевдоглубокой голограммы, только один ведет к образованию ассоциативного изображения недостающей части объекта. Все остальные процессы являются источниками бесполезного рассеяния света. Из рис. 3 также очевидно, что основным источником шумов в восстановленной части изображения объекта могут явиться ассоциативные процессы, которые, протекая в восстанавливающей части объекта, распространяют свое влияние на близлежащие части восстановленного изображения (IV, VI, VIII).

Эксперимент проявил также и другую особенность ассоциативной псевдоглубокой голограммы — ее чрезвычайно высокую чувствительность к сдвигу и наклону, что собственно и обусловило необходимость проявлять голограмму непосредственно на том месте, где она была записана. В частности, оказалось, что восстановленное изображение полностью исчезает при повороте голограммы вокруг оси y (рис. 1) на угол, равный $5'$. Оценим, насколько эта величина соответствует выражению для угловой селективности псевдоглубокой голограммы $\Delta\alpha$, полученному в работах [1, 2],

$$\Delta\alpha = \lambda/\alpha d', \quad (6)$$

где α' — глубина псевдоглубокой голограммы; α — угол между плоскими волнами, записанными на данной голограмме.

В рассматриваемом случае, когда угловой размер объекта равен $8^\circ 50'$, можно принять, что средний угол между лучами, которые интерферировали на голограмме при ее записи, составляет 4.5° или $\alpha=0.08$ рад. Подставляя в (6) значение $\lambda=0.6$ мкм, $d'=5$ мм, получим $\Delta\alpha=5'$. Точное совпадение результатов эксперимента с расчетными данными в данном случае является случайным, поскольку, например, момент исчезновения изображения определяется субъективно, ширина щели была больше дифракционного предела и т. д. Однако порядок величины угловой селективности совпадает с предсказанным теорией.

Заключение

Таким образом, мы показали, что с помощью псевдоглубокой голограммы можно осуществлять безопорную запись строчечного объекта, которая допускает реконструкцию целостного изображения этого объекта по его части. При считывании такой голограммы возникают также разнообразные интермодуляционные изображения. Эти изображения не вносят помех в реконструированное

ассоциативное изображение, однако существенно снижают дифракционную эффективность процесса. Ассоциативная псевдоглубокая голограмма чрезвычайно чувствительна к поворотам и изменению своего положения.

Список литературы

- [1] Денисюк Ю. Н. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 8. С. 84—89.
- [2] Денисюк Ю. Н. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 6. С. 59—66.
- [3] Van Heerden P. J. // Appl. Opt. 1963. Vol. 2. N 4. P. 393—400.
- [4] Song S. H., Lee S. S. // Appl. Opt. 1988. Vol. 27. N 15. P. 3149—3154.
- [5] Kinser J. M., Caulfield H. J., Shamir J. // Appl. Opt. 1988. Vol. 27. N 16. P. 3442—3444.
- [6] Елькин А. Е., Денисюк Ю. Н., Скобло Э. Е. // Опт.-мех. пром-сть. 1965. № 2. С. 13—18.
- [7] Петров В. Д., Ермакова Т. Б. // Регистрирующие среды для изобразительной голографии и киноголографии. Л.: Наука, 1979. С. 39—41.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
30 мая 1989 г.