

10. Кривенков Б. Е., Твердохлеб П. Е., Чугуй Ю. В. Оптический метод кодирования изображений при помощи преобразования Адамара.— *Автометрия*, 1974, № 6.
11. Мак-Вильямс Ф. Дж., Слоэн Н. Дж. А. Теория кодов, исправляющих ошибки. М.: Связь, 1979.
12. Нильсон Н. Обучающиеся машины. М.: Мир, 1967.
13. Твердохлеб П. Е. Многоканальное вычисление квадратичной формы некогерентными методами.— *Автометрия*, 1980, № 6.
14. Володин Е. Б., Свидзинский К. К. Возможность построения интегральных управляемых транспарантов для оптической цифровой техники и связи.— *Автометрия*, 1977, № 4.
15. Мнацаканян Э. А. и др. О возможности использования оптоэлектроники в устройстве логического умножения матрицы на вектор.— *Автометрия*, 1981, № 1.
16. Сихарулидзе Д. Г. Пространственно-временная модуляция света в структурах типа МДП — электрооптический материал: Автореф. на соиск. учен. степени канд. физ.-мат. наук. Тбилиси: изд. Тбилисского ун-та, 1980, с. 19—20.
17. Беляев В. В. и др. Повышение быстродействия жидкокристаллических модуляторов света.— *Письма в ЖТФ*, 1980, т. 6, вып. 14, с. 845—847.
18. Кривенков Б. Е., Чугуй Ю. В. Исследование путей повышения точности матричных вычислений в оптической некогерентной системе.— Препринт № 69. Новосибирск: изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1977.

Поступила в редакцию 21 июля 1980 г.

УДК 778.38

А. ТАЙ, Х. ЧЕН, Ф. ЮУ
(Пенсильвания, США)

ОДНОСТУПЕНЧАТАЯ РАДУЖНАЯ ГОЛОГРАФИЯ И ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ

Введение. Радужный голографический процесс по Бентону [1—3] включает две ступени записи. Первая ступень — запись основной голограммы с реального объекта посредством традиционной внеосевой голографической техники [4, 5], вторая — запись радужной голограммы с реального голограммного изображения, полученного из основной голограммы. Вследствие помещения узкой апертурной щели за основной голограммой появляется возможность уменьшения требований к когерентности восстанавливающего источника света на второй ступени голографической записи. Однако двухступенчатый процесс голографической записи является громоздким и требует для каждой ступени отдельных оптических устройств.

Предлагается альтернативный метод, при котором процесс записи может выполняться за один этап. Эта новая техника дает определенную гибкость в построении радужных голограмм и допускает использование более простых оптических приспособлений, чем при традиционной двухступенчатой записи. Следует также отметить, что создание радужной голограммы требует записи реального голографического изображения объекта через узкую щель. Если радужная голограмма освещается монохроматическим источником света, образуется реальное голограммное изображение объекта, которое ограничено открытой щелью. Если же она освещается белым источником света, то голограммное изображение щели будет расщеплять свет внутри полностью видимого голографического изображения на все цвета радуги. Поэтому основная задача радужной голографии сводится к формированию изображения апертурной щели

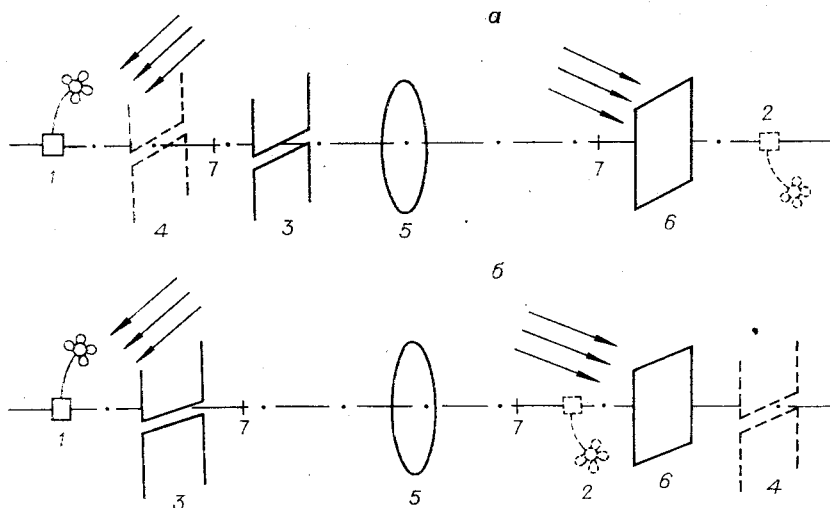


Рис. 1. Одноступенчатый процесс получения радужных голограмм (а — для псевдоскопического, б — для ортоскопического изображения): 1 — объект; 2 — изображение объекта; 3 — узкая щель; 4 — изображение щели; 5 — линза, создающая изображение; 6 — регистрирующая пластина; 7 — фокус линзы.

между голограммным изображением объекта и наблюдателем. На рис. 1, а, б показано, как эта задача может быть решена при одноступенчатой голографической записи [6, 7], когда и объект, и щель отображаются одновременно при помощи линзы или системы линз. Таким образом, радужная голограмма может быть получена без применения основной.

Одноступенчатая радужная голография. Оптическая система одноступенчатой голографической записи подобна традиционной системе внеосевой голографической записи, за исключением того, что линза, дающая изображение, и узкая щель помещаются между регистрирующей пластинкой и объектом, как показано на рис. 1, а. Таким образом, мнимое изображение щели формируется между объектом и щелью, а реальное изображение объекта — за регистрирующей пластинкой. Отметим, что по глубине реальное изображение перевернуто линзой относительно щели. При воспроизведении необходимо, чтобы изображение щели, формируемое голограммой, располагалось за изображением объекта; в связи с этим должно быть использовано сопряженное изображение голограммы, и поэтому восстановленное изображение является псевдоскопическим. Следовательно, система одноступенчатой записи обеспечивает некоторую гибкость в увеличении изображения и хорошее качество голограммы. Подчеркнем, что до тех пор, пока щель расположена так, что световой поток из каждой точки объекта попадает на линзу, формирующую изображение, голографическое изображение можно увеличивать до определенных размеров и при этом восстанавливать все изображение. На рис. 2, а показано псевдоскопическое голографическое изображение, полученное с помощью радужного голографического одноступенчатого способа записи, приведенного на рис. 1, а. В данном случае увеличение ~ 1 . На рис. 2, б дано это же голографическое изображение, но с большим увеличением (~ 2). Сравнивая рис. 2, а, б, 3 и 4, можно отметить отсутствие искажения изображения. Тем не менее на рис. 2, а можно заметить относительно высокий уровень спекл-шума, появление которого связано с использованием меньшего размера (0,25 см) щели при записи голограммы.

Как схематично показано на рис. 1, б, небольшое изменение в оптической схеме одноступенчатого радужного голографического способа за-

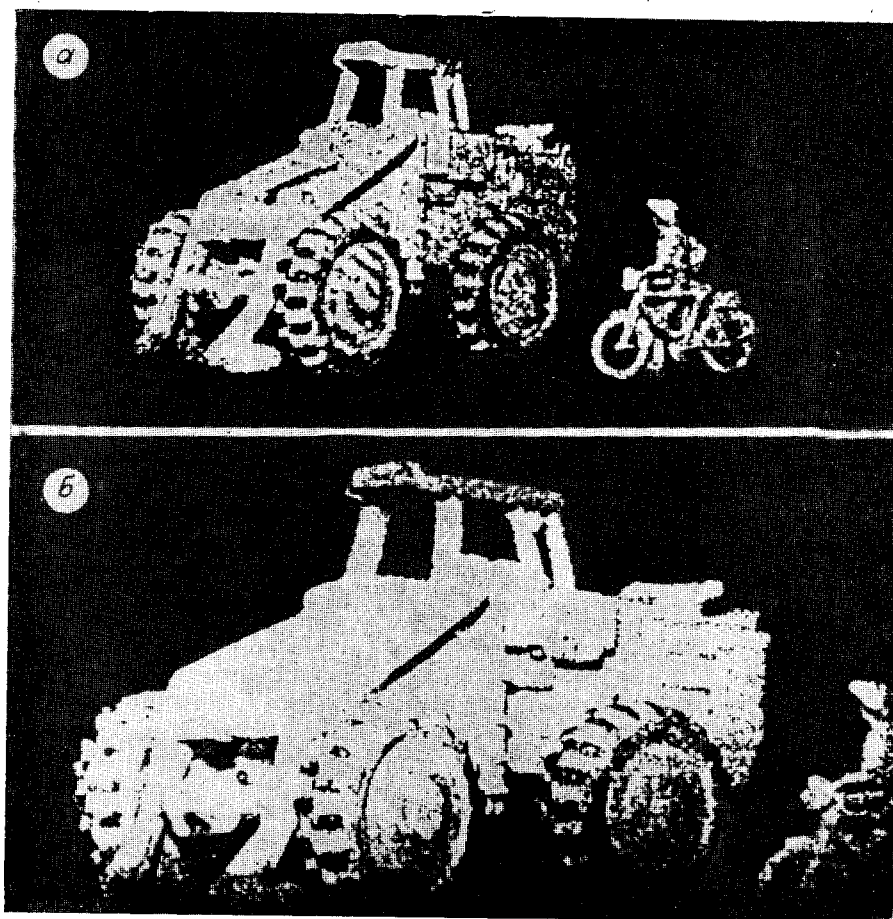


Рис. 2. Псевдоскопическое радужное голографическое изображение:
 а — увеличение $m=1$, б — увеличение $m=2$.

писи приводит к получению ортоскопического голограммного изображения. При этом реальное изображение объекта формируется перед регистрирующей пластинкой, а реальное изображение щели — за ней. Это значительно лучше по сравнению со случаем сопряженного изображения, которое образует реальное изображение щели. Однако в такой схеме поле зрения ограничено размерами линзы, что, в свою очередь, ограничивает увеличение голограммного изображения. Ортоскопическое голограммное изображение, полученное при одноступенчатой записи (см. рис. 1, б), приведено на рис. 3. Регистрирующая пластинка располагалась на расстоянии 2,5 см от реального изображения.

Радужная голографическая интерферометрия. Голографическая интерферометрия — одно из наиболее важных и интересных применений голографии. Опыт показал, что обычная голографическая интерферометрия имеет следующие недостатки. Во-первых, для восстановления изображения необходим когерентный источник, во-вторых, в изображении присутствуют значительные спекл-шумы. Ниже демонстрируется одноступенчатый радужный голографический интерферометрический процесс [7, 8], при котором эти два недостатка традиционной голографической интерферометрии вполне устранимы или уменьшаемы. Нами показано, что в предлагаемой интерферометрии требуемые измерения могут быть



Рис. 3. Ортоскопическое радужное голографическое изображение:
увеличение $m=1/2$.

получены с хорошим качеством независимо от того, будет ли изображение ортоскопическим или псевдоскопическим.

Двойной экспозицией с напряженной алюминиевой пластинки, используемой в качестве объекта, были получены радужные голографические интерферограммы. Первая экспозиция сделана с предварительно напряженного объекта, вторая — с того же объекта при небольшом увеличении механического напряжения. На рис. 4 показано действительное изображение при освещении белым светом. Для сравнения этого результата с результатом, полученным традиционной техникой, эксперимент тщательно повторили, исключив щель. Результат восстановления голограммы при когерентном освещении представлен на рис. 5. Сравнение рис. 4 и 5 показывает, что радужная голографическая интерферограмма обеспечивает больший контраст полос и меньший уровень спекл-шума. В то же время радужное изображение намного ярче несмотря на то, что освещенность голограммы (в мВт/см²) была меньше.

В случае голографической интерферометрии с усреднением по времени радужные голограммы получали с помощью оптической системы,

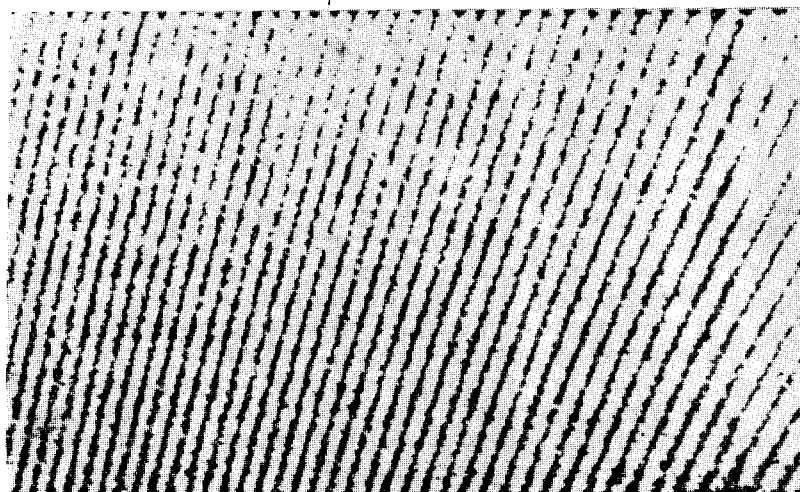


Рис. 4. Радужная голографическая интерферограмма, полученная методом двойной экспозиции.

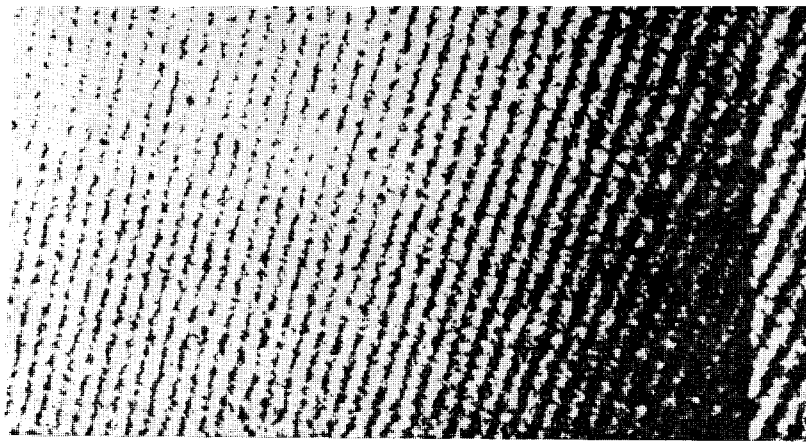


Рис. 5. Голографическая интерферограмма, полученная традиционным методом двойной экспозиции.

изображенной на рис. 1, а. В качестве колеблющегося объекта использовался динамик диаметром 5 см, который приводился в действие синусоидальным сигналом с частотой ~ 1350 Гц. На рис. 6 показана радужная голографическая интерферограмма с усреднением по времени. Для сравнения с известной техникой усреднения была записана голограмма того же объекта в той же оптической системе, но без щели. Изображение, восстановленное с голограммы в когерентном свете, представлено на рис. 7. Сравнение рис. 6 и 7 показывает, что радужный метод дает более контрастные полосы и меньший уровень спекл-шума. Видно также, что в традиционном случае решетчатая структура центральной части динамика полностью маскируется спекл-шумами, а в радужном случае — хорошо различима. Таким образом, радужная голографическая интерферограмма, по нашему мнению, позволяет улучшить разрешение по сравнению с традиционной голографической интерферограммой.

Рассмотрим одноступенчатый радужный способ записи применительно к голографическому построению контура. Напомним, что существуют два основных способа построения голографического контура: один — с применением жидкостей или газов с различающимися коэффициентами преломления, а другой — с помощью двух источников когерентного излучения с разными длинами волн. Для демонстрации нами выбрана двухволновая техника, так как, на наш взгляд, она более совершенна и лучше удовлетворяет требованиям одноступенчатого способа записи радужных голограмм. Ради простоты в этих экспериментах использовалась ортоскопическая оптическая система (рис. 8). Эта система почти полностью идентична системе, предложенной Вернером [9]. Единственное отличие — включение в нее апертурной щели. С помощью делителя луча объект освещается перпендикулярно. Его изображение проецируется далее на плоскость, расположенную вблизи голографической пластинки. Дифрагированная плоская волна решетки служит в качестве опорной, благодаря чему пространственные частоты голограмм, сформированные волнами разной длины, не зависят от длины волны. Отсюда

$$\sin \Theta_1 / \lambda_1 = \sin \Theta_2 / \lambda_2,$$

где λ_1 и λ_2 — длины волн для получения голограммы; Θ_1 и Θ_2 — соответствующие опорные углы.

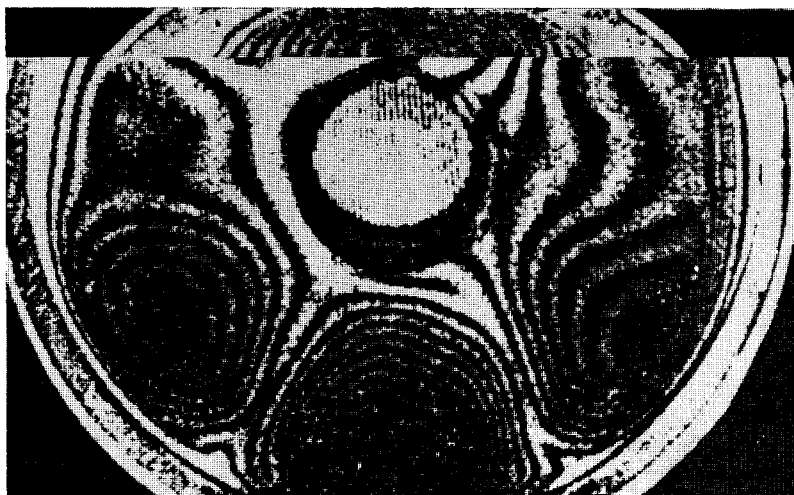


Рис. 6. Радужная голографическая интерферограмма с усреднением во времени.

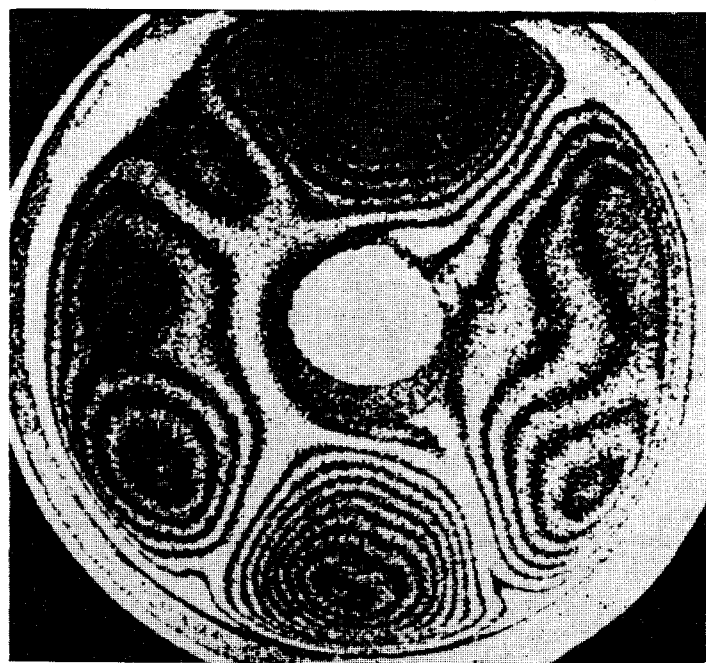


Рис. 7. Голографическая интерферограмма, полученная традиционным методом с усреднением во времени.

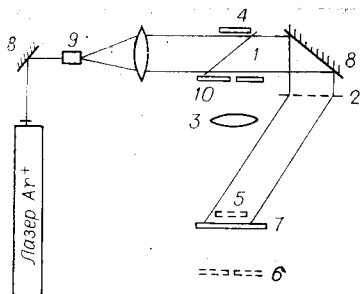


Рис. 8. Оптическая система для двухволнового голографического нанесения контура:

1 — делитель луча; 2 — решетка; 3 — линза, создающая изображение; 4 — объект; 5 — изображение объекта; 6 — изображение щели; 7 — голограмма; 8 — зеркало; 9 — коллиматор; 10 — щель.



Рис. 9. Контурное изображение, восстановленное в белом свете.

Две экспозиции проводились при двух различных длинах волн. Так как пространственные частоты двух голограмм на фотографической пластине одинаковы, то в поперечном направлении восстановленные изображения могут быть точно совмещены. Однако в продольном направлении вдоль оптической оси эти изображения не совпадают. Можно показать, что в этом случае они интерферируют с образованием контурных интерференционных полос с периодом, соответствующим продольному шагу порядка

$$D = \lambda_1 \lambda_2 / 2 |\lambda_2 - \lambda_1|.$$

В нашем эксперименте применялись линии аргонового лазера с $\lambda_1 = 501,7$ и $\lambda_2 = 496,5$ нм, что соответствовало шагу контура в 24 мкм. На рис. 9 приведено радужное голографическое контурное изображение монеты, восстановленное вольфрамовой дуговой лампой.

Многоволновая интерферометрия. В работе [10] показано, что с помощью трех основных голограмм, созданных на разных длинах волн, может быть построена цветная радужная голограмма. В то же время в [11] нами было продемонстрировано, что голографическое изображение с правильным воспроизведением цветов формируется также и при использовании одноступенчатого способа записи радужных голограмм. Отсюда следует, что этим же способом вполне осуществима многоволновая радужная голографическая интерферометрия, позволяющая получить некоторые очень интересные и уникальные результаты. Преимущество рассматриваемой многоволновой техники состоит в том, что она допускает сравнение различных физических эффектов (например, давления и нагрева) путем наблюдения в различных цветах интерференционных полос, связанных индивидуально или совместно с различными эффектами. Устройство, применяемое при многоволновой интерферометрии, показано на рис. 10. Заметим, что схема записи голограмм совпадает с описанной выше за одним исключением: в качестве источника излучения взяты два лазера, работающие на разных длинах волн. Для демонстрации эффекта нами на шарнирную подвеску помещалась пластинка алюминия. Сначала мы экспонировали объект с помощью одного лишь лазерного луча (Ar^+ 514 нм). Затем, слегка отклонив подвеску от вертикали, сделали вторую экспозицию тем же источником. Далее подвеску отклонили на 45° , провели вторую экспозицию со вторым лазерным источником. Таким образом, на голографической пластинке формируются два интерферометрических голографических изображения: одно, записанное в зеленом све-

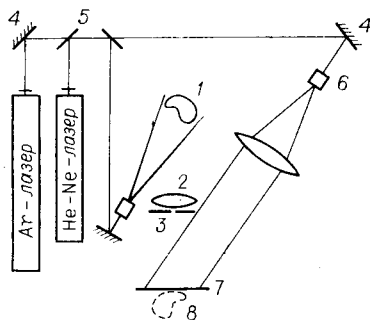


Рис. 10. Оптические системы для многоволновой голографической интерферометрии: 1 — объект, 2 — линза, 3 — щель, 4 — зеркало, 5 — делитель луча, 6 — коллиматор, 7 — голограмма, 8 — изображение объекта.

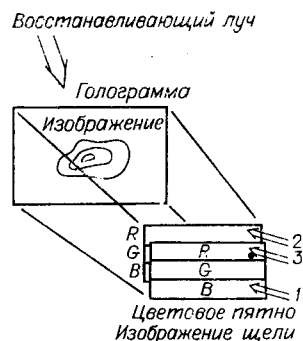


Рис. 11. Восстановленные изображения щелей и различные позиции наблюдения.

те при вертикальном положении подвески, а другое — в красном свете при ее наклоне в 45° . Две голограммы, совмещенные на одной и той же пластине, имеют различные основные пространственные частоты, $\sin \Theta/\lambda_1$ и $\sin \Theta/\lambda_2$, где λ_1 и λ_2 — используемые длины волн, а Θ — опорный угол. После того как голографическая пластинка была проявлена, голограмма восстанавливалась коллимированным белым источником света. При этом, так как пространственные частоты совмещенных голограмм различны, были восстановлены две поперечно смещенные щели, каждая со своей цветовой дисперсией, как показано на рис. 11. Когда наблюдатель находится на одном краю цветowego пятна в позиции 1, он может видеть только изображение с интерференционными полосами, соответствующими наклону 45° , в голубовато-зеленом цвете. Черно-белая картина восстановленного изображения, наблюдавшегося из этой позиции, дана на рис. 12, а. Если же наблюдатель передвигается в позицию 2 (на другой конец цветowego пятна), он может видеть только изображение и интерференционные полосы в красном свете, соответствующие вертикальному наклону (см. рис. 12, б). Если наблюдать с позиции 3 (в середине цветowego пятна), оба голографических изображения восстановятся одновременно в одном и том же месте (см. рис. 12, в) с зелеными и красными полосами, соответствующими вертикальному наклону и наклону 45° . Таким образом, видим, что эта техника позволяет давать прямое сравнение двух групп интерференционных полос. При этом обеспечивается отличное разрешение обеих групп интерференционных полос, так как они наблюдаются в разных цветах.

Эта многоволновая техника может быть также использована для создания усредненных во времени голографических интерферограмм при анализе колебаний [12]. Для демонстрации этого применения в качестве объекта выбирался маленький двухдюймовый динамик. Запись голограмм проводилась в системе, приведенной на рис. 10. При экспозиции пластинки зеленым светом аргонового лазера на динамик подавался синусоидальный сигнал частотой 6 кГц, а при экспозиции красным светом He-Ne-лазера — сигнал частотой 7 кГц. После того как пластинка была проявлена, голографические изображения восстанавливались коллимированным белым светом. В положении 1 наблюдатель может видеть в голубовато-зеленом свете (рис. 13, а) только голографические изображения динамика с модовой структурой, определяемой колебаниями частотой 7 кГц, в положении 2 — его изображение в красном свете (см. рис. 13, б) с модовой структурой, соответствующей колебаниям частотой 6 кГц. В позиции 3 видны обе структуры одновременно, при этом структура,

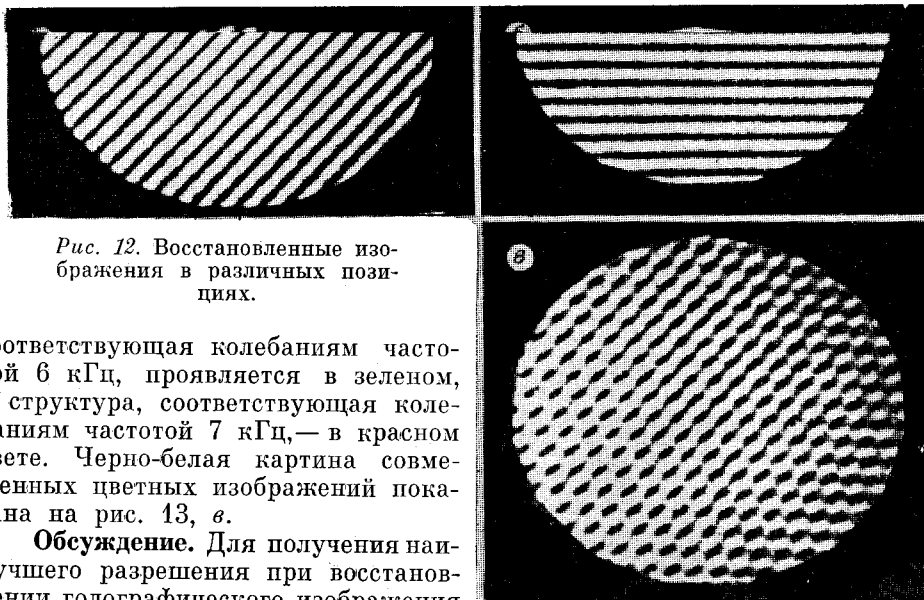


Рис. 12. Восстановленные изображения в различных позициях.

соответствующая колебаниям частотой 6 кГц, проявляется в зеленом, а структура, соответствующая колебаниям частотой 7 кГц,— в красном свете. Черно-белая картина совмещенных цветных изображений показана на рис. 13, в.

Обсуждение. Для получения наилучшего разрешения при восстановлении голографического изображения может быть использован точечный источник, например дуговая вольфрамовая лампа. Требования к размеру источника зависят от расстояния между изображением объекта и голограммой и при условии, что изображение объекта сфокусировано прямо на голограмму, будут наименее жесткими. В этом случае для освещения может применяться достаточно протяженный источник, такой, как осветитель микроскопа или мощная настольная лампа; разрешение изображения при этом останется достаточно хорошим. Однако при формировании изображения объекта непосредственно на голографической пластине избыточность может быть потеряна, и качество изображения окажется весьма чувствительным к дефектам опорного луча. Так как восстановленное изображение появляется в той же плоскости, что и голограмма, возможно также воздействие на качество изображения грубой интерференционной структуры голограммы. Таким образом, существует зависимость между требованием к размеру источника и качеством изображения. Нами показано, что расстояние в 1—2 см между изображением объекта и голограммой в основном дает удовлетворительный результат. Другой фактор, который может влиять на качество изображения,— размер щели. Обычно с уменьшением размера щели уменьшается цветовое размытие [13, 14]. Однако при этом интенсивность объектной волны будет также пропорционально уменьшаться. Эта проблема может быть частично решена с использованием голографических пластинок высокой чувствительности, таких, как пластинки «Kodak 131». Более того, при уменьшении размера щели уменьшается разрешение и увеличивается размер спекла в восстановленном изображении. Таким образом, в данном случае опять наблюдается зависимость между качеством цветового пятна и размерами спекла; поэтому необходим компромисс. Во всех наших экспериментах размер щели выбирался ~ 2 мм.

Заметим, что как при интерферометрии с двойной экспозицией, так

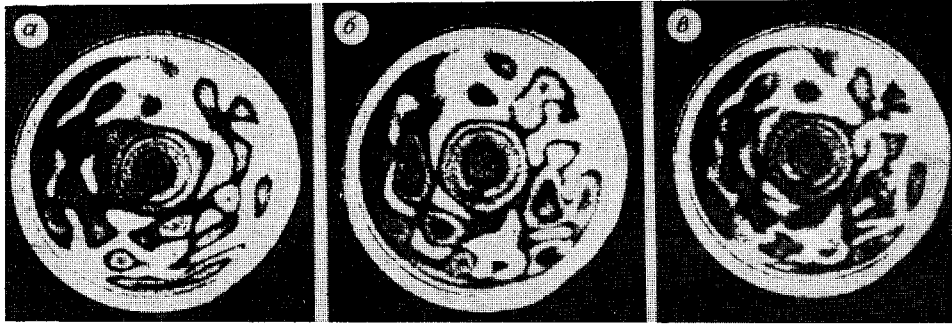


Рис. 13. Восстановленное из голограммы с усреднением во времени изображение.

и при двухволновой технике контурных изображений параметры интерференционных полос определяются только длинами волн источника света в процессе голографической записи. При восстановлении голографических изображений интерференционные полосы не зависят от длины волны освещающего света. Если голограмма рассматривается в плоскости изображения восстанавливающей щели, то голографическое изображение с интерференционными полосами появляется лишь в определенном цвете. Цвет меняется, если наблюдатель перемещается вверх или вниз вдоль направления цветового пятна, но изображение и характер интерференционных полос остаются при этом постоянными. Если наблюдатель удаляется от плоскости изображения щели, то появляется многоцветное изображение, но изображение и характер интерференционных полос по-прежнему неизменны. Существуют определенные ограничения на использование описанной голографической техники. Она не может полностью заменить традиционную форму голографии. Например, ее применение оказывается невозможным для голографической интерферометрии в реальном масштабе времени. Для некоторых приложений голографической интерферометрии существенную информацию может дать параллакс между интерференционными полосами и объектом. Однако при использовании предлагаемой техники эта информация вдоль некоторого направления теряется из-за наличия узкой щели. Тем не менее эта техника может применяться в значительном количестве интерферометрических приложений. Возможность восстановления изображения в белом свете дает важные преимущества, особенно для промышленных разработок.

При демонстрации многоволновой интерферометрии были взяты только две длины волн. Строго говоря, для получения большей информации следует использовать большее число длин волн. Однако, с одной стороны, существуют трудности организации такой системы, а с другой — приходится расплачиваться за возможность получения дополнительной информации. Во-первых, если на одну пластинку наложить больший набор изображений, то эффективность дифракции для каждого восстановленного изображения уменьшится в $1/n^2$ раз, где n — количество наложенных голограмм. Во-вторых, присутствие большого количества информации иногда может усложнить интерпретацию результата. Другими словами, при увеличении количества длин волн уменьшается расстояние по частоте между цветами, и это приводит к трудностям выделения определенного изображения из всего множества.

Заключение. Одноступенчатый метод получения «воздушных изображений» с помощью линзовой радужной голографии прост и перспективен. Псевдоскопический процесс формирования изображения достаточно гибок и обеспечивает получение довольно резкого увеличенного голограммного изображения. Ортоскопический процесс отчасти более ограничен.

Однако это ограничение может быть снято, если при создании изображения использовать линзу большей апертуры.

Нами показана применимость одноступенчатой радужной голографической техники для голографической интерферометрии. Этот новый процесс может быть осуществлен почти так же легко, как и традиционная голография. Новая техника позволяет при восстановлении использовать белый свет, повысить яркость изображения, уменьшить уровень спекл-шумов и достичь лучшего качества изображения. По нашему глубокому убеждению, на основе этой техники могут быть реализованы многие приложения голографической интерферометрии. Предложенная нами модификация одноступенчатого радужного голографического процесса применительно к многоволновой интерферометрии дает возможность путем сопоставления интерферограмм проводить исследования не одного, а нескольких физических явлений. При этом интерференционные полосы, соответствующие различным физическим эффектам, могут быть визуализированы отдельно или вместе в разных цветах. Цветовое разделение позволяет достаточно хорошо выделять различные наборы интерференционных полос. Многоволновая радужная голографическая интерферометрическая техника обеспечивает дополнительную гибкость голографической интерферометрии, расширяя сферу ее научных применений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Benton S. A.— J. Opt. Soc. Am., 1969, vol. 59, p. 1545A.
2. Benton S. A. White Light Transmission/Reflection Holographic Imaging.— In: Proc. of ICO Conf. on Application of Holography and Opt. Information Processing/Ed. by E. Marom, A. A. Frisem, and E. Wiener— Avnear. Jerusalem, Israel, Aug. 23—36, 1978, p. 401—409.
3. Leith E. N.— Sci. Am., 1976, vol. 235, N 4, p. 80.
4. Leith E. N., Upatnieks J.— J. Opt. Soc. Am., 1974, vol. 54, p. 1295.
5. Yu F. T. S. Introduction to Diffraction, Information Processing, and Holography. Cambridge, Mass: M. I. T. Press, 1973.
6. Chen H., Yu F. T. S.— Opt. Lett., 1978, vol. 2, p. 85.
7. Yu F. T. S., Chen H.— Opt. Comm., 1978, vol. 25, p. 173.
8. Yu F. T. S., Tai A., Chen H.— Appl. Opt. (to be published).
9. Varner J. R.— Appl. Opt., 1971, vol. 10, p. 212.
10. Hariharan P., Steel W. H., Hegedus Z. S.— Opt. Lett., 1977, vol. 1, p. 8.
11. Chen H., Tai A., Yu F. T. S.— Appl. Opt., 1978, vol. 17, p. 1490.
12. Rowell R. L., Stetson K. A.— J. Opt. Soc. Am., 1965, vol. 55, p. 1593.
13. Chen H.— Appl. Opt. (to be published).
14. Wyant J. C.— Opt. Lett., 1977, vol. 1, p. 30.

Поступила в редакцию 30 апреля 1979 г.

УДК 621.738.9 : 535.8 : 535.241.3

Ю. В. ВОВК, Ю. А. ЩЕПЕТКИН
(Новосибирск)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧАСТОТНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ ПРИ ЗАПИСИ ОДНОМЕРНЫХ ГОЛОГРАММ ИЗЛУЧЕНИЕМ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ

Вопросам записи голограмм двоичной информации с помощью инжекционных лазеров посвящены многочисленные работы (например, [1—3]), в которых достаточно полно исследовано влияние ограниченной пространственной и временной когерентности излучения на параметры записи. При этом, как правило, рассматривается классическая схема