

- v.11, № 1. Русский перевод: Зарубежная радиоэлектроника, 1971, № 11.
8. Л. П. Крайзмер, Д. А. Бородаев, Л. И. Гутенмахер, Б. П. Кузьмин, И. Л. Смелянский. Ассоциативные запоминающие устройства. М., «Энергия», 1967.
 9. И. С. Гибин, Е. Ф. Пен, П. Е. Твердохлеб. Устройство для записи матриц голограмм.— Автометрия, 1973, № 5.
 10. А. М. Васильев, С. Т. Де, А. В. Логинов. Лабораторный аргоновый лазер с разрядным каналом из окиси бериллия.— Автометрия, 1972, № 5.
 11. В. С. Бочкарев, Ю. П. Дробышев, В. А. Коптюг, И. К. Коробейничева, В. И. Лобанов, Р. С. Нигматуллин. Машинная информационно-поисковая система для электронной спектроскопии.— Автометрия, 1972, № 4.

Поступила в редакцию 18 декабря 1972 г.

© RCA REVIEW, 1972.

УДК 621.378; 681.327

В. ХЕННАН

(Принстон, Нью-Джерси)

РЕЛЬЕФНЫЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ФИЛЬМЫ

Введение. Голотайп (голографическая лента) предназначен для предварительной записи видеоизображений в виде тисненых, рельефных голограмм. Изготовление такой ленты связано с записью голографических картин и звуковой информации на виниловой пленке. Основная причина применения этого метода — исключительно низкая стоимость пленок.

В работе отражены главные технические решения, которые привели к разработке голотайпных систем. Делается попытка ответить на следующие вопросы: Почему голограммы? Почему голограммы Фраунгофера? Каким образом можно получить высокое отношение сигнал/шум от изображений, восстановленных из очень маленьких голограмм? Каковы источники шума и как их можно подавить? Каким образом записываются цветные фильмы? Каким образом копируются ленты?

1. Голографическая система Фраунгофера. Новая голографическая система записи и преобразования изображений имеет следующие преимущества:

1) низкую стоимость копирования — рельефные фазовые голограммы можно впечатывать на дешевую виниловую пленку;

2) стойкость к царапинам и грязи — высокоизбыточные голограммы можно загрязнять или искажать каким-либо другим способом без серьезного ухудшения качества изображения;

3) инвариантность к сдвигу — голограммы Фраунгофера дают неподвижные изображения даже если лента постоянно движется. Свободное от мерцаний изображение получается при любой скорости движения ленты без синхронизации между скоростью ленты и скоростью развертки телевизионного изображения. В отличие от всех других систем видеозаписи голотайп полностью совместим с любым иностранным телевизионным стандартом и может запускаться с любой скоростью или давать неподвижные изображения;

4) надежность — голотайпный преобразователь не критичен к настройке оптических элементов и имеет небольшую скорость движения пленки.

Достижение этих качеств предусматривает использование избыточных голограмм Фраунгофера, лазера для записи и воспроизведения сигнала и изображающей оптики.

Простота голографического преобразователя очевидна. Он состоит из лазера, движущейся ленты и телевизионной камеры (ТВ-камеры), с выхода которой сигнал поступает на обычный телевизионный приемник. Прозрачная виниловая пленка с рельефными голограммами движется с постоянной скоростью через лазерный пучок света, при этом восстанавливаемые с голограмм изображения проецируются на ТВ-камеру.

II. Процесс получения голограммной пленки. Положительный фоторезист (Shibley AZ-1350) наносится на высококачественную подложку из кропара. Объектом для записи голограмм служит черно-белый фильм, полученный с помощью электронно-лучевого записывающего устройства с цветного изображения. Голографическая система записи включает гелий-кадмиевый лазер, фоторезисторную пленку и движущуюся пленку объекта, обычные преобразователи пучка, диафрагмы, зеркала и светоделители. Запись голограмм производится с высокой избыточностью. Система записи действует автоматически, регистрируя последовательность голограмм на фоторезисторной пленке, причем каждая голограмма соответствует кадру цветного кинофильма. После экспозиции пленка проявляется. В результате участки, освещенные более интенсивным светом, протравливаются, оставляя на поверхности рельеф фазовой голограммы. Путем применения электроформирующего процесса, аналогичного процессу получения стандартных никелевых образцов при фонографической записи, с первоначальной фоторезисторной пленки получают никелевые ленты. Обычная толщина никелевой ленты составляет около 50,8 мкм. Затем печатаются виниловые копии лент, при этом никелевая образцовая и необработанная виниловая пленки помещаются между двумя движущимися роликами.

III. Рельефно-фазовые голограммы. А. Основы теории. Основные свойства фазовых голограмм можно вывести из простой схемы записи, показанной на рис. 1. Если сигнальный и опорный пучки являются плоскими волнами, комплексная амплитуда света, падающего на записывающую среду, есть

$$u = A_0 + A_r \exp [i\omega_x x], \quad (1)$$

где $\omega_x = 2\pi \sin \varphi / \lambda$ — пространственная частота полос голограммы; A_0 и A_r — комплексные амплитуды сигнального и опорного пучков. Отсюда следует, что распределение интенсивности света в плоскости регистрирующей среды

$$|u|^2 = A_0 A_0^* + A_r^2 + A_0^* A_r \exp [i\omega_x x] + A_0 A_r^* \exp [-i\omega_x x]. \quad (2)$$

В рассматриваемом случае $A_0 A_0^* = A_0^2$, так как сигнальный пучок — плоская волна; следовательно, равенство (2) можно записать как

$$|u|^2 = A_0^2 + A_r^2 + 2A_0 A_r \cos \omega_x x. \quad (3)$$

В более общих случаях составляющая $A_0 A_0^*$ не является постоянной и имеет удвоенный в сравнении с волной A_0 спектр частот. Важность этого факта будет обсуждаться позже.

Пусть записывающая среда изменяет свою толщину прямо пропорционально экспозиции:

$$\Delta l = g |u|^2 T = g [A_0^2 + A_r^2 + 2A_r A_0 \cos \omega_x x] T, \quad (4), (5)$$

где g — константа материала (изменение толщина/экспозиция); T — время экспозиции. Согласно этому, пропускание голограммы

$$T_h = \exp [i(n-1)k\Delta l \cos \varphi], \quad (6)$$

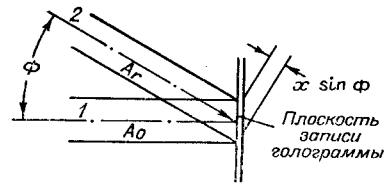


Рис. 1. Схема записи:
1 — сигнальный пучок; 2 — опорный пучок.

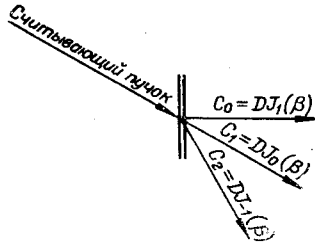


Рис. 2. Восстановленные пучки.

где n — коэффициент преломления записывающего (или копирующего) материала; $k = 2\pi/\lambda$.

Когда считывание производится опорным пучком $A_i \exp[i\omega_x x]$, как проиллюстрировано рис. 2, комплексная амплитуда света, дифрагирующего на голограмме, есть

$$S = A'_r \exp[i\omega_x x] \exp[i(n-1)k\Delta l \cos \varphi]. \quad (7)$$

Подставляя (5) в (7), получим

$$S(x) = A'_r \exp[i\theta] \exp[i\omega_x x] \exp[i2(n-1)kgTA_0 A_r \cos \omega_x x \cos \varphi], \quad (8)$$

где $\theta = kgT(n-1)(A_0^2 + A_r^2) \cos \varphi$. Равенство (8) можно разложить в ряд Фурье

$$S(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_m \exp[imx\omega_x], \quad (9)$$

где

$$C_m = \frac{\omega_x}{2\pi} \int_{-\pi/\omega_x}^{\pi/\omega_x} S(x) \exp[-imx\omega_x] dx; \quad (10)$$

$$C_m = \frac{\omega_x}{2\pi} A'_r \exp[i\theta] \int_{-\pi/\omega_x}^{\pi/\omega_x} \exp\{-i[(m-1)\omega_x x - 2(n-1)kgTA_0 A_r \cos \omega_x x \cos \varphi]\} dx. \quad (11)$$

Чтобы получить это выражение в более удобной форме, примем $y = \omega_x x$, $\beta = 2(n-1)kgTA_0 A_r \cos \varphi$ и $A'_r e^{i\theta} = D$; тогда

$$C_m = \frac{D}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp\{-i[(m-1)y - \beta \cos y]\} dy. \quad (12)$$

Помня, что

$$J_m(\beta) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp\{i[my + \beta \cos y]\} dy, \quad (13)$$

где $J_m(\beta)$ — функция Бесселя первого рода порядка m , Фурье-компоненты можно выразить как

$$C_m = DJ_{(1-m)}(\beta). \quad (14)$$

Следовательно, комплексная амплитуда света, дифрагирующего на голограмме, может быть представлена выражением

$$S(x) = D \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_{(1-m)}(\beta) \exp[im\omega_x x], \quad (15)$$

а комплексная амплитуда поля восстановленного объекта пропорциональна $J_1(\beta)$ (см. рис. 2).

Б. Эффективность фазовых голограмм. Эффективность голограммы определяется значением светового потока, который дифрагирует в первый порядок по отношению к падающему. Согласно этому, из (14) эффективность фазовой голограммы

$$\eta = [J_1(\beta)]^2. \quad (16)$$

Максимальное значение $J_1(\beta)$, как следует из рис. 3, равно 0,581, что соответствует $\beta_{\max} = 1,839$ рад; следовательно, максимум эффективно-

сти равен $\eta_{\max} = (0,581)^2 = 0,34$, или 34%. Так как фазовый сдвиг, вызванный рельефом Δl поверхности,

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta l (n - 1), \quad (17)$$

то максимум эффективности достигается при амплитуде рельефа

$$\Delta l_{\max} = \frac{\beta_{\max} \lambda}{2\pi (n - 1)} = \frac{1,839\lambda}{(6,28)(1,5 - 1)} \approx \frac{\lambda}{2}. \quad (18)$$

Максимальное значение эффективности обычной амплитудной голограммы составляет только 6,25%, что значительно ниже предельной эффективности фазовой голограммы. Однако неверно делать вывод о том, что фазовые голограммы по своей природе более эффективны, чем амплитудные голограммы. В [1] показано, что при отклонении от линейности в 5% максимальная дифракционная эффективность фазовой голограммы составляет 9%, что соответствует фазовой модуляции $\beta = 0,6$ рад. Согласно [2], нелинейные эффекты подавляются, если β не превышает значения 0,2 рад. Однако в этом случае эффективность голограммы падает до 1%. Бартолини и др. [3] нашли, что экспозиции, требуемые для исключения нежелательных нелинейных эффектов для широкого класса объектов, особенно для движущихся изображений, дают усредненную эффективность около 3%. Это соответствует $\beta = 0,4$ рад или 0,06 длины волны и при считывании проходящим светом требует глубины между пиком и впадиной в рельефной картине $0,06 \lambda / (n - 1)$. Если, например, голограмма восстановлена светом с длиной волны 633 нм и коэффициент преломления виниловой пленки, на которую впечатываются голограммы, 1,4, тогда глубина рельефа должна быть приблизительно равной 0,1 мкм.

IV. Шум в голограммных изображениях. А. Требуемое отношение сигнал/шум. Основное требование, предъявляемое к движущимся голографическим системам, состоит в том, чтобы отношение сигнал/шум изображения, восстановленного с малой голограммы (около $1/4 \times 1/4$ дюйма), было достаточно высоким.

Стандарт качества изображения, установленный телевизионной организацией (TASO), приведен в таблице. Эти стандарты к голотайпу

Оценка изображений в зависимости от отношения сигнал/шум

Качество изображений	Отношение сигнал/шум, дБ
Прекрасное (седина незаметна)	45
Хорошее (седина едва заметна)	35
Удовлетворительное (седина заметна, но не неприятна)	29
Едва приемлемое (седина довольно неприятна)	25

следует применять с учетом того, что шум, преобладающий в голотайпных изображениях, не подобен «белому» шуму, видимому на домашних телевизорах. Этот шум максимален на низких частотах, что, несомненно, более заметно для зрителя. Отношение сигнал/шум существенно зависит от природы транспаранта прозрачного объекта, из которого сделана голограмма, что еще более усложняет положение. Голограммы, сделанные с транспарантов с множеством мелких деталей и темным фоном, дают более высокое отношение сигнал/шум, чем голограммы, полученные с транспарантов с большими белыми областями.

Другая сложность возникает из-за нечеткого определения понятия сигнал/шум. В оптических системах отношение сигнал/шум обычно выражается как отношение средней интенсивности света к среднеквадратической флюктуации интенсивности света, тогда как в телевизион-

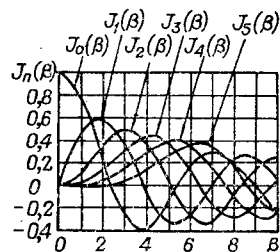


Рис. 3. Значения функций Бесселя.

ных системах его обычно выражают в значениях токов сигнала и шума i_s и i_n , возникающих в ТВ-камере, и записывают как $20 \log i_s/i_n$ дБ. Так как выходной ток всей трубки зависит от интенсивности света (или мощности), соответствующее выражение в значениях эквивалентной интенсивности света есть $20 \log (I/\sqrt{\bar{I}^2})$ дБ, где I — средняя интенсивность света, падающего на трубку, и \bar{I}^2 выражает значение квадрата величины интенсивности шума падающего света. Очевидно, путаница происходит потому, что выражение эквивалентно $10 \log$ (отношение мощностей). Например, инженер телевидения должен рассматривать изображение с отношением $I/\sqrt{\bar{I}^2} = 100$ как картину в 40 дБ.

По причинам, указанным выше, трудно, если не невозможно, определить более низкую границу приемлемого отношения сигнал/шум. Тем не менее, согласно субъективной оценке изображений, восстановленных с голотайпов хорошего качества, необходимо, чтобы отношение сигнал/шум было на 5—10 дБ выше, чем величины, приведенные в таблице, где приемлемая величина равна 35 дБ. Можно надеяться, что дальнейшие успехи в структуре картин будут способствовать улучшению спектра шума, приближая его к белому, и тогда величины, приведенные в таблице, будут пригодны для голотайпных систем.

Б. Интермодуляционный шум. Строгий анализ интермодуляционного шума провести крайне сложно, потому что это явление имеет нелинейный характер. Даже если провести такой анализ, это принесло бы мало практической пользы, поскольку полученный результат трудно интерпретировать в терминах, используемых в телевизионной технике. Для этого имеются две причины. Во-первых, нелинейная характеристика записывающих материалов, а в случае фазовых голограмм нелинейность, присущая процессу записи, вызывают интермодуляционный шум, который является функцией самого сигнала. Другими словами, отношение сигнал/интермодуляционный шум зависит в определенных пределах от структуры объекта. Во-вторых, интермодуляционный шум не обладает теми же самыми характеристиками, что и белый шум, видимый на домашних ТВ-экранах, поэтому стандартное определение отношения сигнал/шум (т. е. отношение пика видеосигнала к среднеквадратическому шуму) тоже не имеет смысла.

Тем не менее происхождение интермодуляционного шума и меры, которые нужно предпринять для его уменьшения, можно определить уточнением выводов, приведенных выше. Предполагалось, что пучок от объекта был плоской волной, и, следовательно, $A_0 A_0^* = A_0^2$ — константа. При комплексном объекте величина $A_0 A_0^*$ не является постоянной. Интересно заметить, что это не имеет практического значения в амплитудных голограммах, поскольку эти голограммы записываются так, что пропускание (или ослабление) пропорционально интенсивности:

$$T_a \propto A_0 A_0^* + A_r^2 + A_0^* A_r \exp(i\omega_x x) + A_0 A_r \exp(-i\omega_x x), \quad (19)$$

и, следовательно, шум, связанный с $A_0 A_0^*$, можно устранить, выбирая ω_x достаточно высоким для пространственного разделения полезного сигнала от спектра $A_0 A_0^*$ (например, делая $\omega_x > 3\omega_0$, где ω_0 есть наивысшая пространственная частота объекта).

Пространственная фильтрация непригодна в случае фазовых голограмм. Это очевидно из равенства (8), которое показывает, что полезный сигнал, т. е. $\exp[i2(n-1)kgA_0 A_r \cos \omega_x x \cos \varphi]$, умножается на $\exp[i(n-1)kgA_0^2]$. Для комплексного объекта коэффициент перемножения $\exp[ikg(n-1)A_0 A_0^*]$ не является постоянным. Следовательно, сам сигнал является источником шума.

Хорошо известно, что интермодуляционный шум, вызываемый нелинейной характеристикой записывающих материалов, можно подавить, выбирая отношение опорного и сигнального пучков достаточно большим. В действительности это вызывает биения между сигнальным и опорным пучками, которые преобладают над биениями между компонентами самого сигнала. По этой причине соотношение опорного и сигнального пучков обычно устанавливается $A_r/A_0=10$. Когда объектом является движущаяся пленка, наихудший случай соответствует картине, имеющей обширные светлые площади, которые приводят к «горячим пятнам» при записи, особенно если голограмма записана вблизи плоскости преобразования Фурье. При экспозиции такие «горячие пятна» выходят за линейную область характеристики материала и, таким образом, вызывают интермодуляционный шум. Из этого следует, что выбор лежит между интермодуляционным шумом и эффективностью голограммы.

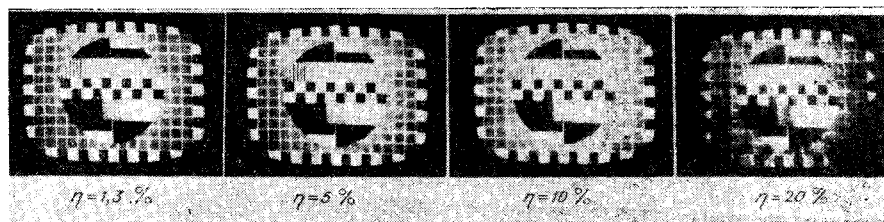


Рис. 4. Восстановленные изображения в зависимости от эффективности голограммы.

Эффективность фазовых голограмм, записанных на ленте, покрытой фоторезистом, может достигать 30%, когда объектом, например, является светлая точка на черном фоне. Однако, как уже упоминалось, для обычных движущихся картин эффективность обычно ограничивается 3%, при которой можно достигнуть приемлемого качества изображения при интермодуляционном шуме.

Пример выбора между интермодуляционным шумом и дифракционной эффективностью показан на рис. 4. Изображения восстановлены с голограмм, записанных на фоторезисте AZ-1350. Длина волны считывающего пучка 632,8 нм.

В. Спекл-шум. Ранние исследования в голографии показали, что голограммы с диффузно освещенными или диффузно отраженными объектами имеют своеобразный шум [4]. Эти голограммы имеют очень высокую степень избыточности, потому что информация от каждой точки объекта располагается по всей голограмме; и наоборот, каждая точка голограммы содержит информацию о всем объекте. В результате такие голограммы можно царапать, загрязнять и даже разбивать на куски без серьезной потери информации. Они дают малый шум из-за оптического несовершенства в записывающей или воспроизводящей системах. Однако нежелательным продуктом диффузного освещения является спекл-шум, приводящий к пятнистой структуре изображения. Шум становится более сильным, когда размеры голограммы уменьшаются. Из [5] следует, что при площади голограммы, равной A_h , отношение сигнал/шум для восстановленного изображения равно

$$(SNR)_{\text{диф}} = \bar{I} / \sqrt{\overline{I^2}} = \sqrt{A_h/A_{\text{min}}}, \quad (20)$$

где $\bar{I} / \sqrt{\overline{I^2}}$ — отношение средней интенсивности к среднеквадратической флюктуации интенсивности в изображении; A_{min} — площадь голограммы, для которой разрешение изображения соответствует разрешению дисплея. Отношение сигнал/шум реальных диффузных голограмм, ве-

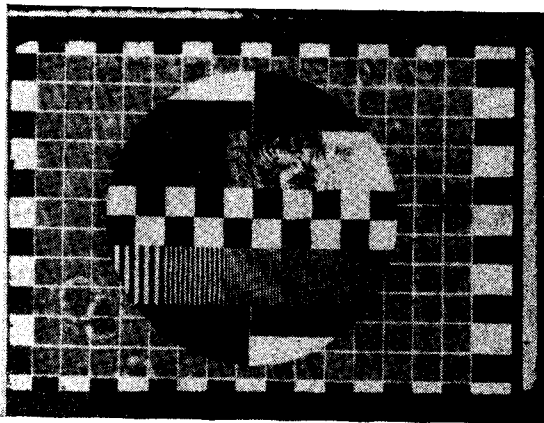


Рис. 5. Изображение с пространственно-когерентным освещением.

о которой упоминается во введении (например, устойчивость к царапинам и неподвижность изображения), необходимо использовать строго когерентный свет для записи и воспроизведения. Когерентный свет увеличивает шум, вызываемый косметическими дефектами, появляющимися от маленьких царапин, углублений, раковин (пузырьков), изменений толщины, отражений и пыли на оптических элементах и в компонентах системы записи. Косметические дефекты обычно незаметны при некогерентном освещении, однако они, как показано на рис. 5, создают серьезные затруднения при когерентном освещении.

Эксперименты показывают, что невозможно построить оптическую систему, где косметический шум уменьшился бы до приемлемого уровня. Одним из главных преимуществ голотайпа является его нечувствительность к таким дефектам, в особенности его способность давать хорошие изображения с дешевых пленок плохого оптического качества.

Достижение удовлетворительного качества при когерентном освещении, таком как голотайп, требует разработки техники для подавления косметического шума. Большим шагом в этом направлении является применение избыточной голографической записи.

V. Избыточность. Как было показано выше, природа высокой избыточности голограмм, записанных с диффузно освещенными или диффузно отраженными объектами, оказывается практически невосприимчивой к косметическому шуму [4]. Однако такие голограммы обладают сильным спекл-шумом. Следовательно, возникает вопрос: возможно ли освещать транспарант с изображением объекта так, чтобы записать избыточную голограмму без появления спекл-шума или других форм ложного фона? (Ниже показано, что ответ на этот вопрос существует.) Этого можно достигнуть набором точечных источников освещения транспаранта [5].

A. Многолучевые голограммы. Многолучевое освещение основано на том, что ход лучей, проходящих через любую оптическую систему, можно изменять, меняя положение источника, при неподвижном положении изображения. Следовательно, если объект освещается многими источниками, свет от каждого источника будет претерпевать различные искажения, и шум, вводимый оптическими дефектами, в результате усреднения будет уменьшаться.

Таким образом, основной метод записи избыточной, свободной от спекл-шума голограммы включает освещение прозрачного объекта множеством лучей, причем угловое расстояние между лучами подобрано так, что пространственные частоты всех периодических интерфе-

роятно, несколько меньше, чем указывает равенство (20), так как при его получении не учитывались оптические дефекты системы.

Заметим, что спекл-шум можно устранить просто, не используя диффузное освещение; но тогда избыточность будет отсутствовать, и, как обсуждается ниже, восстановленное изображение будет содержать косметические шумы, обусловленные дефектами оптической системы.

Г. Косметический шум.

Чтобы получить практическую пользу от голографии,

рещионных картин в изображении выше разрешающей способности всей системы. Избыточность таких многолучевых голограмм равна числу источников, освещающих объект. Каждый источник записывает субголограмму, которая способна восстановить изображение в целом. Ясно, что, если часть такой избыточной голограммы испортить или даже уничтожить, другие части голограммы восстановят все изображение. При прохождении через оптические компоненты свет от каждого источника рассеивается неодинаково; при формировании изображения шум, вводимый этими компонентами, будет уменьшаться независимо от того, вводятся ли они при записи или воспроизведении.

Если шум в многолучевой голограмме некоррелирован от одной субголограммы к следующей, тогда

$$(SNR)_{\text{многолуч}} = (s/n) \sqrt{R}, \quad (21)$$

где (s/n) — отношение сигнал/шум субголограммы; R — избыточность голограммы. Далее увидим, что отношение между избыточностью и площадью голограммы A_n есть

$$R = \rho^2 A_n / A_{\text{min}}, \quad (22)$$

где A_{min} — площадь голограммы, для которой разрешение, ограниченное дифракцией, соответствует разрешению приемной камеры; $\rho \geq 1$ — целое число.

В высокоизбыточных многолучевых голограммах шум, видимый в восстановленном изображении, имеет характеристики, подобные спекл-шуму; следовательно, объединяя (20), (21) и (22), найдем, что

$$(SNR)_{\text{многолуч}} = \rho (s/n) (SNR)_{\text{диф}}. \quad (23)$$

Отсюда следует, что отношение сигнал/шум многолучевой голограммы в $\rho(s/n)$ больше отношения сигнал/шум диффузной голограммы, поскольку условие $\rho(s/n) > 1$ нетрудно получить на практике. Нужно помнить, что необходимо не только превысить отношение сигнал/шум диффузной голограммы, но также необходимо быть уверенным, что результирующее отношение сигнал/шум приемлемо для телезрителя.

Б. Техника размножения пучков. Фазовая решетка. Ранняя попытка многолучевой записи голограммы включала освещение объекта пучком, который проходит через двухмерную синусоидальную фазовую решетку [5]. Этот тип решетки имеет пропускание

$$T(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_n(\varphi) \exp(j2n\pi x/\Delta) J_m(\varphi) \exp(j2m\pi y/\Delta), \quad (24)$$

где J_n — функция Бесселя n -го порядка первого рода; Δ — пространственный период решетки; φ — значение фазового сдвига, вводимого решеткой. Решетка с $\varphi = 1,43$ рад дает девять лучей равной интенсивности, позволяющих достигать девятикратной избыточности. Однако хотя изображения, восстановленные с голограмм с девятикратной избыточностью, не содержат спекл-шума и достаточно хорошо устойчивы к царапинам и грязи, очевидно, что дальнейшее улучшение можно реализовать, используя более чем девятикратную избыточность.

Чтобы дать конкретный пример избыточности, которую можно получить от голограммы разумных размеров, рассмотрим случай, в котором стандартная ТВ-камера, имеющая ширину полосы $B = 3$ МГц и период горизонтального сканирования $t_h = 53$ мкс, используется для считывания восстановленных изображений. Для изображения шириной $w = 10$ мм низшая пространственная частота, которую необходимо разрешить, есть $p_w = B t_h / w = 15,9$ периодов/мм. Минимальная ширина голограммы Фраунгофера, записанной при освещении гелий-кадмиевым лазером ($\lambda = 441,6$ нм; $f = 50$ мм), равна $w = 2 p_w f = 0,71$ мм. Для устра-

нения биений ТВ-растра, требующего вертикального разрешения, по крайней мере $p_v=31,8$ строк/мм, минимальная высота голограммы должна быть $v=1,42$ мм. Таким образом, площадь субголограммы $A_{\min}=\omega v=0,71 \cdot 1,42=1$ мм². Из этого следует, что приемлема голограмма, имеющая площадь, скажем, $A_h=6 \cdot 11=66$ мм². Она может быть записана с избыточностью $R=A_h/A_{\min}=66$. Таким образом, на голограмме, имеющей сравнительно малые размеры, можно обеспечить более чем девятикратную избыточность.

Теоретически можно сделать двухмерную фазовую решетку, которая даст более чем девять лучей равной интенсивности. Однако трудности, связанные с нелинейными характеристиками записывающих материалов и косметическое несовершенство оптических компонент, существенно мешают практической реализации такой решетки.

Зеркальная система. Для получения матрицы пучков можно использовать блоки зеркал. Требуется лишь, чтобы пространственная частота интерференционной картины, даваемой по полю объекта каждой парой зеркал, отличалась от пространственной частоты любой другой пары зеркал более чем на один полупериод. Это необходимо потому, что характеристика видикона является нелинейной функцией от интенсивности света. Влияние нелинейности приводит к появлению биений интенсивности между мелкими интерференционными картинками, даваемыми парами зеркал. Для большинства применений чрезвычайно трудно поддерживать правильную настройку для предотвращения этих биений.

Решетка диафрагм. Другой метод, который имеет не только практическое решение, но также дает избыточность выше чем $R=A_h/A_{\min}$, предусматривает использование изображений Френеля от решетки диафрагмы [6], периодичность которых грубее, чем периодичность отсчетов, определяемая шириной полосы частот объекта. Если эта относительно грубая решетка диафрагм освещается когерентным светом, тогда точные изображения решетки образуются на конечном расстоянии от нее. Дополнительные изображения, называемые изображениями Френеля, формируются на промежуточных расстояниях между точными изображениями. Некоторые из этих промежуточных изображений являются решетками точечных источников, период следования которых много меньше, чем период первоначальной грубой решетки. Например, квадратная решетка с периодичностью 0,1 мм освещается светом с $\lambda=441,6$ нм, тогда квадратная решетка с периодом 0,02 мм образуется в пространстве на расстоянии 9 мм от первоначальной.

Располагая транспарант с объектом в одном из изображений Френеля, можно записать голограммы с избыточностью много большей, чем дает выражение $R=A_h/A_{\min}$. Однако такие голограммы весьма чувствительны к дефектам системы, которые проявляются в виде фона, имеющего период первоначальной решетки. Поэтому нужно соблюдать большую осторожность, применяя значения избыточности больше, чем $R=A_h/A_{\min}$. Некоторое представление о том, к чему это приводит, можно получить из последующего анализа.

В. Анализ метода записи с решеткой диафрагм. Рассмотрим решетку точечных источников, расположенных на расстоянии z от плоскости объекта, как показано на рис. 6. Примем, что каждый точечный источник полностью освещает объект и что виньетирование отсутствует. Поскольку каждый источник решетки будет восстанавливать изображение объекта с некоррелированным шумом, то отношение сигнал/шум результирующего изображения увеличится пропорционально корню квадратному из числа точек решетки. Из этого следует, что решетка должна содержать как можно больше точек. Более того, поскольку требование уменьшения паразитных картин фона связано с наложе-

нием ограничений на расстояние между точками, то очевидно, что необходимо иметь регулярную решетку (в большей степени, чем случайную) с точками равной интенсивности.

Определим теперь, какая интенсивность картины плоскости объекта получается из-за искажений в решетке.

Любое ухудшение в изображении решетки можно моделировать двумя фильтрами: 1) сверткой совершенной решетки с одним комплексным фильтром и 2) умножением на второй комплексный фильтр. Сам объект является фильтром первого типа, тогда как диафрагма, ограничивающая поле решетки, является примером фильтра второго типа. Обозначим эти два фильтра как N_c и N_m . Для удобства фильтр N_c расположим в плоскости объекта или его изображения, а умножающий (мультипликативный) фильтр N_m — в плоскости решетки или ее изображения. Обсудим далее влияние мультипликативного фильтра, поскольку действие фильтра N_c тривиально; интенсивность в этом случае объекта модулируется по закону $|N_c|^2$, поскольку по условию он расположен в плоскости объекта или его изображения.

Таким образом, для решетки точечных источников, базисные векторы которой \underline{p} и \underline{q} размещены в плоскости, перпендикулярной к опти-

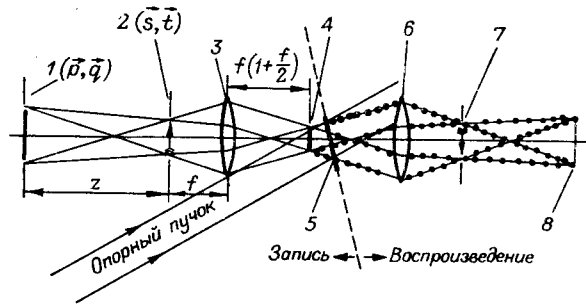


Рис. 6. Система записи — воспроизведения голограмм Фраунгофера при освещении объекта решеткой точечных источников:

1 — плоскость решетки точечных источников; 2 — плоскость предмета; 3 — записывающая линза; 4 — изображение решетки точечных источников линзой записи; 5 — голограмма; 6 — линза воспроизведения; 7 — изображение плоскости предмета; 8 — конечное изображение решетки точечных источников.

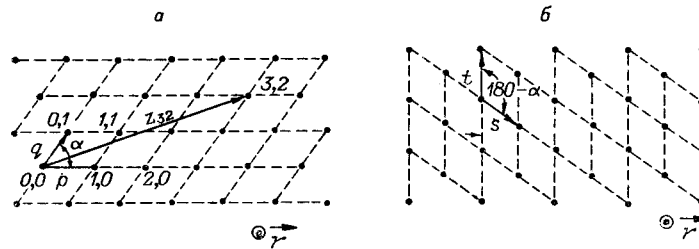


Рис. 7. Система координат для решетки точечных источников (а) и система s, t (б).

ческой оси z , как показано на рис. 7, а, комплексная амплитуда поля в \underline{r}_1 (см. рис. 6) есть

$$u(\underline{r}_1; 0) = \sum_{m,n} u_{mn} \delta(\underline{r}_1 - \underline{r}_{mn}), \quad (25)$$

где

$$\underline{r}_{mn} = m\underline{p} + n\underline{q}; \quad (26)$$

m, n — целые числа; u_{mn} — комплексная амплитуда источника в точке с координатами \underline{r}_{mn} , видоизменяемая мультипликативным фильтром N_m .

Применяя обычно квадратичное приближение в уравнении Френеля — Кирхгофа, комплексную амплитуду поля, получаемую в пло-

скости объекта (r_0, z) в результате воздействия фильтра N_m , можно выразить в виде

$$u(r_0; z) = \exp(jkz) \sum_{m,n} u_{mn} \exp\left\{\left(\frac{jk}{2z}\right)|r_0 - r_{mn}|^2\right\}, \quad (27)$$

где $k = 2\pi/\lambda$.

Для описания положения точек на плоскости объекта введем новую систему координат, связанную с базовыми векторами исходной решетки \underline{p} и \underline{q} [6]. Новая система координат (см. рис. 7, б) имеет базовые векторы \underline{s} и \underline{t} , определяемые соотношениями:

$$\underline{s} = \left(\frac{\underline{g} \times \underline{z}}{\underline{p}\underline{q} \times \underline{z}}\right) \lambda z; \quad \underline{t} = \left(\frac{\underline{z} \times \underline{p}}{\underline{p}\underline{q} \times \underline{z}}\right) \lambda z. \quad (28)$$

Эти векторы обладают следующими свойствами:

$$\underline{s}\underline{p} = \lambda z; \quad \underline{s}\underline{q} = 0; \quad \underline{t}\underline{q} = \lambda z; \quad \underline{t}\underline{p} = 0. \quad (29)$$

Выражая r_0 через векторы \underline{s} и \underline{t} в виде $r_0 = \alpha \underline{s} + \beta \underline{t}$, уравнение (27) можно записать

$$u(\alpha, \beta; z) = \exp(jkz) \sum_{m,n} u_{mn} \exp\{(jk/2z)(r_0^2 + r_{mn}^2)\} \exp\{-2\pi j(\alpha m + \beta n)\}. \quad (30)$$

Распределение интенсивности $I(\alpha, \beta, z)$ в плоскости объекта пропорционально квадрату величины комплексной амплитуды поля, т. е.

$$I(\alpha, \beta; z) = u(\alpha, \beta; z) u^*(\alpha, \beta; z) = \sum_{m,n} \sum_{m',n'} u_{mn} \times$$

$$\times u_{m'n'} \exp\{(jk/2z)(r_{mn}^2 - r_{m'n'}^2)\} \exp\{2\pi j[\alpha(m' - m) + \beta(n' - n)]\}. \quad (31)$$

Это выражение можно записать как

$$I(\alpha, \beta; z) = \sum_{M,N} I_{MN} \exp\{2\pi j(\alpha M + \beta N)\}, \quad (32)$$

где

$$I_{MN} \equiv \exp\{(-jk/2z)(M^2 p^2 + 2MN \underline{p}\underline{q} + N^2 q^2)\} \times \sum_{m,n} u_{mn}^* u_{m+m, n+n} \exp\{(-jk/z)[Mmp^2 + (Mn + Nm) \underline{p}\underline{q} + Nnq^2]\}. \quad (33)$$

Равенство (32) описывает распределение интенсивности в плоскости объекта в виде ряда Фурье с базисными периодами решетки \underline{s} и \underline{t} .

Независимо от того, как мультипликативный фильтр изменяет значения интенсивностей или фаз точечных источников, в плоскости объекта никогда не будет картин с периодами, большими базовых периодов \underline{s} , \underline{t} . Однако если точечные источники решетки имеют одинаковые интенсивности и фазы, то картины интенсивностей могут иметь более тонкую структуру. Например, для простого случая прямоугольной решетки, когда $\underline{p}\underline{q} = 0$, можно показать, что расстояние z можно выбирать так, что $(\tilde{k}p^2/z) = 2\pi(H + I/J)$, где H и J — целые числа. Таким образом, с синфазными точечными источниками равной интенсивности можно найти такое расстояние z , для которого пространственная частота картины в обоих направлениях будет в целое число раз выше основных частот. Важно заметить, что мультипликативные изменения точечных источников можно эффективно использовать лишь тогда, когда достаточна оптическая точность всей системы. Если оптические неоднородности нарушают амплитудные и фазовые соотношения точечных

источников, периоды картины интенсивности в плоскости объекта будут стремиться к базовым периодам \tilde{s} , \tilde{t} .

Прежде чем рассматривать специальные применения этой теории, введем понятие максимальной избыточности, которую можно получить, полагая, что точечные источники имеют равную интенсивность, но случайные фазы. Тогда распределение интенсивности в плоскости объекта будет иметь основную периодичность \tilde{s} , \tilde{t} . Из рис. 6 можно видеть, что изображение решетки находится вблизи плоскости записи голограммы. Если голограмма имеет определенный размер, то число точек решетки, свет от которых может проходить через систему без виньетирования, будет ограничено площадью голограммы A_h . Как уже упоминалось, избыточность R равна площади голограммы A_h , деленной на площадь одной субголограммы. Так как площадь субголограммы равна площади единичной ячейки в $\tilde{p}\tilde{q}$ решетке, умноженной на квадрат линейной величины $(f/z)^2$, где f — фокус линзы, то избыточность можно вычислить из выражения

$$R = \frac{A_h}{\tilde{p}\tilde{q} \times (\tilde{z}/z)} (z/f)^2. \quad (34)$$

Однако площадь единичной ячейки $\tilde{p}\tilde{q}$ решетки относится к площади единичной ячейки эквивалентной решетки A_s , как

$$(\tilde{p}\tilde{q} \times \tilde{z}/z)^{-1} = (\tilde{s}\tilde{t} \times z/z) / (\lambda z)^2 = A_s / (\lambda z)^2. \quad (35)$$

Таким образом, избыточность, выраженная в отношениях площадей, равна

$$R = \frac{A_h A_s}{\lambda^2 f^2}. \quad (36)$$

Случайно сфазированные точечные источники дают периодическую картину фона, соответствующую основной решетке с наивысшими гармониками. Нами показано, что отношение средней интенсивности сигнала к среднеквадратической флюктуации интенсивности основной компоненты картины фона равно

$$\frac{\bar{I}}{\sqrt{\bar{I}^2}} = \frac{\sqrt{N}}{2}, \quad (37)$$

где N — число точечных источников. Например, если устройство избыточности дает 400 беспорядочно сфазированных точечных источников, отношение сигнал/фон будет равно $\bar{I} \sqrt{\bar{I}^2} = 10 = 20$ дБ.

Так как периодическая структура обычно хорошо заметна в изображении, использование случайно сфазированной решетки точечных источников требует, чтобы основная частота решетки в плоскости объекта была выше, чем наивысшая частотная компонента изображения.

Другой, несколько более информативный, путь получения избыточности предусматривает использование решетки диафрагм, частота следования которых соответствует, по крайней мере, удвоенной наивысшей пространственной частоте объекта. Тогда площадь между субголограммами есть A_{\min} , т. е. равна наименьшей площади, для которой дифракционное разрешение восстановленного изображения в точности отвечает желаемому разрешению. Следовательно, избыточность голограммы в этом случае $R = A_h / A_{\min}$.

С другой стороны, если схема записи голограмм работает в режиме ρ -й гармоники (ρ -я гармоника соответствует, по крайней мере, удвоенной наивысшей пространственной частоте объекта), тогда пло-

щадь между субголограммами равна A_{\min}/ρ^2 . Следовательно, общее выражение для избыточности голограммы

$$R = \rho^2 A_n / A_{\min}. \quad (38)$$

Применяя предыдущие результаты к практической системе, можно сформулировать требования к решетке точечных источников и к геометрии схемы записи, которая будет давать желаемую некогерентность в плоскости объекта. Тогда в плоскости объекта можно получить необходимую решетку с основной периодичностью s, t . Если оптическая точность системы достаточно высока, т. е. если есть уверенность, что основные компоненты s, t будут подавляться, то можно продолжить конструирование геометрически подобных решеток с более тонкой структурой.

Увеличение избыточности можно подсчитать теоретически. Однако экспериментальное приближение является кратчайшим путем решения этой задачи.

В качестве примера рассмотрим обычную ТВ-систему воспроизведения со следующими параметрами: размер объекта $12,2 \times 7,8$ мм; фокус линзы Фраунгофера 50 мм; записывающая длина волны 441,6 нм; размер голограммы $6,4 \times 11,1$ мм; ТВ-ширина полосы 5 МГц.

Оценим вначале отношение сигнал/шум, которого можно достигнуть, не прибегая к увеличению основной периодичности s, t . Структура, показанная на рис. 8, позволяет получить высокую избыточность без

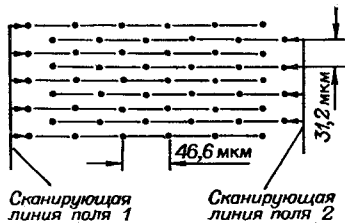


Рис. 8. Простейшая структура для воспроизводящей ТВ-системы.

появления сильных биений. Для выбранной структуры $A_s = 7,5 \cdot 10^{-4}$ мм², что дает 104-кратную избыточность на голограмме размером $6,4 \cdot 11,1$ мм². Результаты экспериментов показывают, что, когда такие голограммы копируются на виниле коммерческого качества, получается отношение сигнал/шум в 36 дБ. Так как это отношение мало приемлемо, желательно иметь более высокую избыточность. Удвоение частоты должно давать 416-кратную избыточность. При этом отношение сигнал/шум увеличивается до 42 дБ.

Экспериментальные результаты показывают, что оптическое качество системы голотайп на виниловой пленке достаточно для получения довольно хорошего изображения.

VI. Практические аспекты рельефных голографических движущихся систем. А. Голограммы Фраунгофера. Параметры схемы записи для получения голограмм Фраунгофера можно определить следующим образом. Зная разрешающую способность фотоматериала, можно найти максимальный угол между опорным и сигнальным пучками и нормалью к плоскости записи из равенства

$$f_m = f_c + f_i = \frac{\sin \theta_r + \sin \theta_i}{\lambda}, \quad (39)$$

где f_m — максимальная пространственная частота, которая может быть записана на материале; f_c — несущая пространственная частота голограммы; $2f_i$ — ширина полосы спектра пространственных частот объекта; λ — длина волны света; θ_r — угол между опорным пучком и нормалью к плоскости записи; θ_i — максимальный угол между пучком от объекта и нормалью к плоскости записи.

Минимальный угол, необходимый для того чтобы избежать перекрытия спектра голограммы, определяется из условия

$$f_c \geq 3f_i. \quad (40)$$

В качестве примера рассмотрим использование фоторезиста Shipley AZ-1350 для записи фазовых голограмм со стандартным 16 мм кадром, выполняющим роль прозрачного объекта. С учетом частотной характеристики фоторезиста AZ-1350 (рис. 9) максимальная пространственная частота при записи не должна превышать $f_m = 1500$ лин/мм. Следовательно, приемлемой будет частота записи $f_c = 1200$ лин/мм при углах $\theta_0 = \theta_r = 15^\circ$ для длины волны 441,6 нм. Тогда полоса $2f_i = 450$ лин/мм или $f_i = 225$ лин/мм (соответствует записи движущегося кадра шириной 10 мм с линзой, имеющей фокус 50 мм) будет укладываться внутри предела разрешения материала для записи.

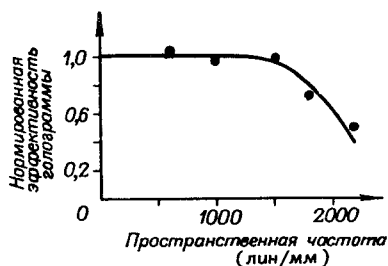


Рис. 9. Частотная характеристика фоторезиста AZ-1350.

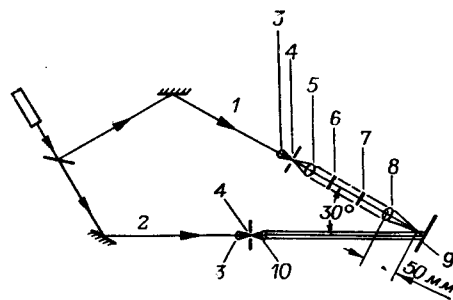


Рис. 10. Типичное устройство для записи голограмм Фраунгофера:

1 — сигнальный пучок; 2 — опорный пучок; 3 — объектив ($10\times$); 4 — диафрагма (10 мкм); 5 — линза (75 мм); 6 — решетка точечных источников; 7 — транспарант; 8 — линза Фраунгофера; 9 — плоскость записи голограммы; 10 — линза (40 мм).

Типичное устройство для записи голограмм Фраунгофера показано на рис. 10. Луч от гелий-кадмиевого лазера (441,6 нм) разделяется на два пучка, которые направляются зеркалами в плоскость записи. Каждый пучок отдельно трансформируется коллиматором. Один пучок идет непосредственно в плоскость записи как опорный, другой проходит через решетку точечных отверстий к линзе и затем поступает в плоскость записи. Заметим, что плоскость записи не является плоскостью преобразования Фурье линзы. Обычно для записи выбирается плоскость, расположенная в нескольких миллиметрах от плоскости преобразования Фурье, чтобы избежать засветки от сильного нулевого пика интенсивности, приводящего к интермодуляционным искажениям.

Б. Геометрия считывания. Считывание в проходящем свете. Рельеф фазовой голограммы можно выявлять в проходящем или отраженном свете. Считывание в проходящем свете выгодно в тех случаях, когда голограмма подвержена поворотам вокруг оси в плоскости голограммы. Повороты (кручения) вызываются несовершенством в движении пленки; фиксированное вращение может существовать между субголограммами из-за плохой плоскостности пленки. В любом случае большое практическое значение имеет выбор такой системы считывания, которая позволяет иметь большой допуск на повороты и неплоскостность пленки, согласующийся с требованиями разрешающей способности изображения.

На рис. 11 показан считывающий пучок и дифрагированный пучок первого порядка при считывании голограммы в проходящем свете. Соотношение между считывающим и дифрагированным пучками для указанной ориентации описывается выражением

$$\sin \varphi + \sin \beta_1 = \lambda/d. \quad (41)$$

Полагаем, что угловые изменения претерпевает считывающий пучок. Определяя θ как угол между считывающим пучком и дифрагиро-

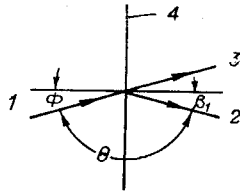


Рис. 11. Считывание голограммы Фраунгофера точечного источника в проходящем свете: 1 — считывающий пучок; 2 — дифрагированный пучок первого порядка; 3 — пучок нулевого порядка; 4 — голограмма.

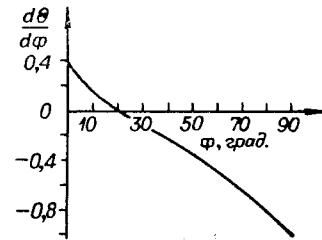


Рис. 12. Отношение угловых изменений дифрагированного пучка первого порядка и считывающего пучка в зависимости от угла считывающего пучка для $\lambda/d=0,7$.

ванным пучком первого порядка, найдем изменение в θ , вызванное изменением угла φ . Из рис. 11 следует, что

$$\beta_1 = \pi - \varphi - \theta. \quad (42)$$

Подстановка (42) в (41) дает

$$\sin \varphi + \sin (\varphi + \theta) = \lambda/d. \quad (43)$$

После дифференцирования

$$\frac{d\theta}{d\varphi} = -1 + \frac{\cos \varphi}{\cos \beta_1} = -1 + \frac{\cos \varphi}{[1 - (\lambda/d - \sin \varphi)^2]^{1/2}}. \quad (44)$$

Зависимость, представленная на рис. 12 для $\lambda/d=0,7$, показывает, что при считывании в режиме пропускания имеется оптимальное угловое положение считывающего пучка, при котором $d\theta/d\varphi=0$. В этом случае, как следует из (44), угол дифракции β_1 равен углу считывания φ .

В качестве примера примем, что допустимое смещение изображения может составлять 30% периода видеосигнала частотой 5 МГц. Так как время горизонтальной развертки ТВ-камеры равно 53 мкс при стандартной ширине раstra видикона 1,27 см, допустимое смещение равно $\pm(0,3)(12,7)/(53 \times 10^{-6})(5 \cdot 10^6) = \pm 1,44 \cdot 10^{-2}$ мм. Если используется линза с фокусом 50 мм для изображения восстановленного волнового фронта, допустимое угловое смещение составит $\pm(1,44 \cdot 10^{-2})/(5 \cdot 10) = \pm 2,9 \cdot 10^{-4}$ рад. Когда считывающий пучок освещает голограмму под оптимальным углом, пучки, дифрагирующие из голограммы, будут выходить под углом 20° к нормали. Угловой размер изображения в этом случае равен $(1,27 \cdot 10)/(5 \cdot 10) = 0,25$ рад ($\approx \pm 7^\circ$). Область угла дифрагированного пучка будет составлять $20 \pm 7^\circ$, а соответствующая область $d\theta/d\varphi$ с учетом (44) равна примерно $\pm 0,06$ на обоих краях голограммы.

Таким образом, чтобы ограничить угловое смещение части волнового фронта, восстановленного от краев голограммы, до максимального значения $\pm 2,9 \cdot 10^{-4}$ рад, необходимо ограничить угловое смещение голограммы до $\pm 2,9 \cdot 10^{-4}/0,06 = \pm 4,8$ мрад, или $\pm 0,3^\circ$. Этот предел можно понизить еще больше, используя избыточные голограммы, которые могут восстанавливать

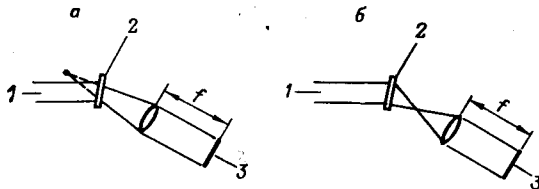


Рис. 13. Схемы устройств для воспроизведения голограмм Фраунгофера в проходящем свете: а — голограмма, ориентированная как при записи; б — минимальная голограмма, повернутая на 180° в своей плоскости; 1 — считывающий пучок; 2 — голограмма; 3 — сфокусированное реальное изображение.

площади вблизи краев изображения от центральных частей голограмм.

Схемы устройств для воспроизведения голограмм Фраунгофера показаны на рис. 13, а, б. С практической точки зрения, считывание мнимых изображений обычно предпочтительнее, потому что оно допускает большее расстояние между голотайпом и считывающей линзой, упрощая таким образом механическую конструкцию.

В. Искажения при считывании. Из-за требований записи (чувствительность фоторезиста, удобство видимой длины волны) рельефно-фазовые голограммы в настоящее время записываются на длине волны 441,6 нм. Однако восстановление обычно ведется с помощью гелий-неонового лазера (632,8 нм) из-за его низкой стоимости. Разница в длинах волн лазеров вызывает искажения.

В процессе записи длина волны света $\lambda_1 = 441,6$ нм из точки p на объекте достигает голограммы как плоская волна под углом относительно нормали. Голограммой этой точки является простая решетка. Освещение решетки плоской волной света с $\lambda_2 = 632,8$ нм приводит к образованию дифрагированной плоской волны под углом θ' , связанным соотношением

$$\frac{\sin \theta_0}{\lambda_1} + \frac{\sin \beta}{\lambda_1} = \frac{1}{d} = \frac{\sin \theta'_0}{\lambda_2} + \frac{\sin \beta'}{\lambda_2}, \quad (45)$$

где β и β' — опорный и считывающий углы.

Когда угол считывания выбирается так, что $\sin \beta / \lambda_1 = \sin \beta' / \lambda_2$, то

$$\sin \theta'_0 = (\lambda_2 / \lambda_1) \sin \theta_0. \quad (46)$$

Так как θ'_0 является нелинейной функцией от θ_0 , то происходит увеличение изображения, вызывая тем самым небольшие его искажения для ограниченной области углов θ_0 . Никаких других аберраций из-за изменения длины волны для голограмм Фраунгофера не существует, поскольку плоская волна, соответствующая точечному объекту, восстанавливается как плоская волна, образуя изображение точки.

Г. Пространственная фильтрация. Более серьезная проблема при считывании в режиме пропускания возникает в связи с шумом, вызываемым царапинами пленки. Заусеницы и твердые частички пыли в лентопротяжном механизме вызывают царапины в направлении движения пленки. В обычных фильмах эти царапины хорошо заметны, особенно когда они продолжают в ряде кадров. При голограммной записи царапины отклоняют считывающий пучок в направлении, перпендикулярном к ним, вызывая полосы на изображении.

К счастью, имеется эффективный путь подавления шумов от царапин. Голограммы записываются так, что восстановленные с них изображения не попадают внутрь той пространственной области, в которую попадает шум от царапин. В результате такой пространственной фильтрации устраняется шум, вызываемый царапинами вдоль пленки и загрязнениями изображения.

VII. Кодирование цвета. *А. Кодирование по системе Стенфордского института (СИ).* Неподвижность изображения и сопротивление царапинам, даваемые избыточными голограммами Фраунгофера, обуславливают необходимость использования монохроматического света для воспроизведения. Следовательно, для получения цветных картин при воспроизведении требуется кодирование цвета при записи голограмм объекта. В основном кодирование цвета сводится к записи картины модулированных решеток, которые накладываются на изображение объекта. Имеется много различных схем кодирования цвета. Выбор конкретной схемы зависит от параметров системы телевидения, в которой эта схема используется.

Рассмотрим, к примеру, форму кодирования, разработанную Стенфордским институтом. Здесь яркостная (световая) информация записывается в полосе частот 0—3 МГц, а информация о голубом и красном цвете на амплитудно-модулированных поднесущих 3,5 и 5,0 МГц. (В действительности, поднесущие частоты немного отличаются от этих величин, они кратны частоте строчной развертки.) В закодированном изображении информация о цвете содержится в амплитудно-модулированных решетках. В бытовой ТВ-камере закодированный сигнал генерируется оптическим полосовым фильтром; в системе голотайпа закодированное изображение первоначально записывается на черно-белую киноленту, которая впоследствии служит объектом при записи голограмм.

В процессе воспроизведения голотайп дает точно такое же изображение, каким оно было закодировано на исходной черно-белой пленке. Таким образом, выход ТВ-камеры состоит из яркостного сигнала в полосе частот 3 МГц и поднесущих 3,5 и 5,0 МГц, амплитуды которых модулированы «голубым» и «красным» сигналами. Соответствующим детектированием и фильтрацией голубой и красный сигналы разделяются. Зеленый сигнал получается вычитанием красного и голубого сигналов из яркостного сигнала. Наконец, сигналы с информацией о цвете пропускаются через специальные электрические цепи, которые комбинируют их в соответствующих пропорциях для воспроизведения цвета и насыщенности первоначального цветного изображения.

Справедливо заметить, что требования к голотайпу радикально отличаются от тех, которые предъявляются к бытовой ТВ-камере. В бытовой ТВ-камере возможен контроль фокусировки и других параметров, влияющих на частотную характеристику и, таким образом, на получение достаточно хороших изображений. В системе голотайпа трудно поддерживать определенную частотную характеристику, потому что закодированный сигнал должен претерпевать дополнительную фотографическую и голографическую обработку. По этой причине желательно применять технику кодирования, которая не требует использования высоких видеочастот.

Б. Двухкадровое кодирование с делением несущей цвета пополам. Система голотайпа использует двухкадровую ($F/2$) схему записи [7]. Этот метод кодирования сводится к записи информации о яркости и цвете изображения на двух отдельных кадрах, причем информация цвета записывается в стандарте NTSC на несущей 2 МГц. Из-за нелинейности сканирования, которая присуща всем ТВ-камерам, невозможно использовать обычную технику создания опорной фазы, которая необходима для правильной демодуляции сигнала о цвете. Необходимо записать опорную фазу вместе с несущей цвета. Эта опорная фаза записывается с помощью несущей, равной половине несущей частоты цвета (отсюда и название $F/2$). В случае голотайпа $F/2$ соответствует 1 МГц. В процессе воспроизведения несущая $F/2$ детектируется и удваивается для получения опорной частоты 2 МГц, необходимой для правильной демодуляции. Двухкадровое кодирование цвета имеет следующие преимущества.

Шум камеры. Отношение сигнал/шум 40 дБ считается приемлемым для обычного ТВ-изображения, но, как было обнаружено, для получения приемлемого качества изображения с однокадровым кодированием требуется отношение сигнал/шум 50—60 дБ. Более высокие требования трудно удовлетворить из-за шумовой характеристики видеоконков на высоких частотах, обусловленной малой апертурой и емкостной нагрузкой, и ухудшения изображения, вызванного понижением общего отношения сигнал/шум при переносе шумов с высоких частот на низкие во время демодуляции цвета.

При двухкадровом кодировании яркостная и цветовая информация записываются в низкочастотной части спектра; следовательно, требова-

ния к отношению сигнал/шум должны быть те же, что и для обычного телевидения. Таким образом, двухкадровое кодирование имеет преимущество в 10 дБ по сравнению с однокадровым.

Избыточность голограмм. Напомним, что отношение сигнал/шум изображений, восстановленных с голограмм Фраунгофера, можно улучшить увеличением избыточности голограммы. Однако с однокадровым кодированием степень избыточности резко ограничивается необходимостью устранения биений между решеткой точечных диафрагм, используемых для записи избыточных голограмм, и полосами, кодирующими цвет.

Запись яркостной и цветовой информации в двух отдельных кадрах устраняет проблему биений в яркостном кадре и уменьшает ее в цветовом кадре, тем самым обеспечивая существенное улучшение отношения сигнал/шум.

Динамический диапазон. Для размещения информации о цвете в однокадровой системе требуется около 50% динамического диапазона. Это неудобно, потому что динамический диапазон всегда жестко ограничен требованиями линейности. При двухкадровом кодировании можно использовать весь динамический диапазон для яркостного и цветового сигналов.

Ошибки от изменения яркости. Методы кодирования, которые передают яркостную информацию в несущей частоте, страдают от цветового сдвига с изменениями частотного отклика. При однокадровом кодировании типа СИ, расфокусировка на краю раstra дает изображение, которое имеет зеленую кайму.

При двухкадровом кодировании ($F/2$) изменение в яркости менее заметно при визуальном восприятии. Следовательно, с кодированием $F/2$ частотный отклик не является критическим параметром.

Прямой переход к высокочастотной несущей. Другая особенность кодирования $F/2$ состоит в том, что закодированная несущая цвета идентична несущей цвета в стандарте NTSC; следовательно, можно гетеродинировать непосредственно в полосу видеочастот, т. е. нет необходимости декодировать и соответственно вновь кодировать, чтобы получить требуемую несущую видеочастоты. Простота этого метода ведет к большей надежности и низкой цене.

Протяжка пленки. Двухкадровое кодирование позволяет записывать информацию о цвете в низкочастотной части спектра без взаимного влияния цвета на яркость. Так как полосы частот для кодирования цвета относительно широкие (по сравнению с полосами в однокадровой системе), то проблема механической фиксации пленки при смене кадра не является серьезной. Следовательно, допуски к протяжке пленки можно значительно ослабить.

Перспективы. В однокадровой схеме кодирования, такой как схема СИ (где высокочастотная часть спектра используется для информации о цвете), невозможно увеличить ширину полосы частот яркости или цвета без изменения стандарта системы. Это не очень серьезная проблема, когда речь идет о бытовых камерах, потому что стандарты можно изменять, не затрагивая оборудования, которое уже имеется в этой области. Однако принятые стандарты системы голотайп будет трудно изменить, если не невозможно. Будущие работы приведут к улучшению трубок, записывающих материалов и т. д., которые, в свою очередь, улучшат разрешение. Но если полоса частот ограничивается стандартом, а не названными выше аппаратурными компонентами, то улучшения будут невозможны. Двухкадровые системы свободны от этого ограничения.

В. Цветная передающая трубка — «бивикон». Хотя ранние эксперименты с двухвидиконной цветной камерой (один видикон для яркости и другой для кодирования цвета) были вполне успешны, двухвидикон-

ный метод имеет два серьезных недостатка — высокая стоимость и проблема синхронного считывания. Огромный шаг в решении обеих проблем был достигнут разработкой новой трубки «бивикон», которая представляет собой, в сущности, двухплушечный видикон со щелевой мишенью. Так как лучи пушек отклоняются общим полем, то легко достигается отличная синхронность при считывании. Кроме того, поскольку необходима одна отклоняющая система и одна фокусирующая катушка, а требования к разрешению менее жестки, чем для одиночной видиконной цветной камеры, цена бивиконной камеры сравнима с ценой соответствующей однокадровой цветной камеры.

Оценка экспериментальных образцов «бивиконов» в системе голотайпа показала, что их частотная характеристика является плоской до 4 МГц (при мощности лазера в 1 мВт) и что взаимодействие между мишенями не превышает 1% при точности регистрации кадра до 1%.

Хотя «бивикон» был разработан специально для системы голотайп, очевидно, что эта новая трубка будет успешно применяться в других работах.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. C. Urbach and R. W. Meier. Appl. Opt., 1969, v. 8, 2269.
2. W. T. Cathey. J. Opt. Soc. Am., 1966, v. 56, 1167.
3. R. A. Bartolini, W. J. Hannan, D. Karlsons and M. Lurie. Appl. Opt., 1970, v. 9, 2283.
4. E. N. Leith and J. Upatnieks. J. Opt. Soc. Am., 1964, v. 54, 1295.
5. H. J. Gerritsen, W. J. Hannan and E. J. Ramberg. Appl. Opt., 1968, v. 7, 2301.
6. A. H. Firester, E. C. Fox, T. E. Gayeski, W. J. Hannan and M. Lurie. RCA Review, March 1972, v. 33.
7. P. C. Goldmark. Color Electronic Video Recording.—J. SMPTE, Aug. 1970, v. 79, p. 677.

Поступила в редакцию 16 апреля 1973 г.

УДК 681.332 : 535.317.2

О. И. ПОТАТУРКИН, П. Е. ТВЕРДОХЛЕБ, Ю. В. ЧУГУИ

(Новосибирск)

ОБОБЩЕННЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИЛУЭТНЫХ ФИЛЬТРОВ

Важными элементами спектральных анализаторов, рассмотренных ранее в [1], являются полутоновые фильтры-транспаранты, используемые для задания двумерных функций разложения. Получение таких транспарантов, как известно из [2], связано с существенными технологическими трудностями, что стимулировало интерес к двухградационным силуэтным фильтрам и их применению в оптических устройствах обработки одномерных сигналов [3—5].

В настоящей работе показано, что силуэтные фильтры могут быть с успехом применены и для целей обобщенного спектрального анализа изображений. Такая возможность следует из того, что двумерные функции большинства известных систем разложения могут быть представлены в виде произведения двух одномерных, т. е.

$$\varphi_{ij}(x, y) = \varphi_i(x) \varphi_j(y), \quad (1)$$