

подтверждена на макете ГЗУ, включающем 8-элементную интегральную линейку инжекционных лазеров, пленочный носитель с голограммами и фотоматрицу МФ-14. В макете использовался компенсатор из оптического стекла марки К-2. Макет продемонстрировал возможность достоверного считывания линейки из восьми голограмм, расположенных с шагом 1,5 мм.

Заключение. Таким образом, показано, что весьма эффективным методом компенсации дисторсии изображений, вызванной двухволновым режимом записи-считывания, является использование двух компенсирующих сред, заполняющих промежутки между носителем голограмм и фотоматрицей. Одной из этих сред может быть воздух, а другой — плотная среда с показателем преломления $n \geq \lambda_2/\lambda_1$, при этом толщина обеих компенсирующих слоев должна быть оптимизирована в зависимости от λ_2/λ_1 , n , $R_{\text{зап}}$, $\text{tg } \psi_{\text{max}}$. Применение двух компенсирующих сред позволяет практически полностью скомпенсировать дисторсию восстановленных изображений, увеличить угловой размер матриц голограмм и транспарантов до $\sim 23^\circ$ и тем самым в значительной степени снять ограничения, накладываемые на информационную емкость ГЗУ с двухволновым режимом записи-считывания.

Показано, что при считывании матриц голограмм с помощью одного полупроводникового лазера и отклоняющей системы диапазон длин волн излучения, соответствующий (при фиксированной толщине компенсатора d_1) смещению точек изображения не более ± 20 мкм, достаточно широк: $10 \div 20$ нм. В этом случае толщина воздушного слоя d_2 должна изменяться в зависимости от длины волны считывающего источника.

Показано также, что допустимый разброс длин волн в матрице инжекционных лазеров весьма ограничен вследствие изменения масштаба изображения в плоскости регистрации и составляет при $R_{\text{зап}} = 50$ мм, $\psi_{\text{max}} = 12^\circ$ и допустимых смещениях элементов изображения ± 20 мкм не более $\pm 1,45$ нм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Твердохлеб П. Е. Голографическая память и информационные машины.— Автометрия, 1980, № 2.
2. Выдрин Л. В. и др. Экспериментальная оптико-электронная (голографическая) система памяти.— Автометрия, 1980, № 2.
3. Никитин В. В., Самойлов В. Д., Семенов Г. И. Влияние параметров инжекционных лазеров на восстановление фазовых голограмм.— Квант. электроника, 1974, т. 1, № 1.
4. Майорчук М. А., Самойлов В. Д. Информационная емкость запоминающего устройства при записи и считывании голограмм источниками с различными длинами волн излучения.— Квант. электроника, 1974, т. 1, № 3.
5. Костров Н. А., Майорчук М. А. Компенсация ширины спектра излучения лазеров в голографических запоминающих устройствах.— Квант. электроника, 1975, т. 2, № 8.

Поступила в редакцию 22 октября 1982 г.

УДК 681.327.77 : 778.4

А. А. БОРИСКЕВИЧ, В. К. ЕРОХОВЕЦ, Н. А. ЯРМОШ

(Минск)

ОЦЕНКА ВЫСШИХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЧАСТОТ ПРИ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ МИКРОЗАПИСИ ТЕКСТО-ГРАФИЧЕСКИХ ДОКУМЕНТОВ

Известно, что пространственные частоты транспаранта с тексто-графической информацией определяют протяженность пространственного фурье-спектра и, как следствие этого, размер микроголограммы [1].

Уменьшение размера микроголограммы с целью повышения плотности записи приводит к ограничению спектра пространственных частот и к ухудшению качества воспроизводимых изображений. В связи с этим необходимо разработать методику оценки высших пространственных частот ν_{\max} транспаранта, удовлетворительно передаваемых микроголограммой.

Существующие способы определения ν_{\max} , например метод замещения реального пространственного сигнала двумерной дифракционной решеткой [2, 3], не в полной мере соответствуют практическим случаям регистрации документальных страниц информации, сочетающих как периодическую, так и аperiodическую последовательности пространственных гест-сигналов. К другим особенностям изображений тексто-графических документов можно отнести то, что они в каждом конкретном случае являются стационарной суперпозицией множества прямоугольных сигналов единичной амплитуды и характеризуются шириной, длиной, пространственным положением и направленностью. Такая модель тексто-графических документов существенно отличает их от других видов изображений, например бинарных транспарантов [4], фотографических, телевизионных изображений и т. д.

Для оценки реальных информационных и геометрических характеристик документальной голографической памяти рассмотрим периодическое и хаотическое распределения элементарных сигналов по полю транспаранта. Целесообразность спектрального анализа «пачки» элементарных сигналов определяется периодичностью структуры текстового и табличного документов, штриховки в машиностроительном чертеже и т. п.

Используя энергетический критерий А. А. Харкевича, в соответствии с которым под полосой частот будем подразумевать пространственный промежуток, содержащий подавляющую часть энергии сигнала, для гест-импульса с шириной τ и комплексным спектром

$$S_1(\omega) = \tau(\sin 0,5\omega\tau)/0,5\omega\tau \quad (1)$$

можно определить максимальную угловую пространственную частоту из уравнения [5]

$$\frac{2}{\pi} \left[\text{Si}(\Delta\omega\tau) - \frac{\sin^2(0,5\Delta\omega\tau)}{0,5\Delta\omega\tau} \right] = \eta_0, \quad (2)$$

где $\text{Si}(\Delta\omega\tau) = \int_0^{\Delta\omega\tau} \frac{\sin \omega\tau}{\omega\tau} d\omega$, а η_0 — постоянная доля полной энергии сигнала, приходящаяся на частотный интервал $\Delta\omega = 2\pi\nu_{\max}$.

С учетом линейности рассматриваемых когерентно-оптических систем для группы из N элементарных сигналов, отстоящих друг от друга на интервал T , комплексный пространственный спектр можно представить через спектр одиночного сигнала $S_1(\omega)$ как

$$S(\omega) = S_1(\omega) \left[1 + \sum_{m=2}^{N-1} \exp(-jm\omega T) \right],$$

а амплитудный — в виде

$$|S(\omega)| = |S_1(\omega)| \sqrt{N + \sum_{m=1}^{N-1} 2(N-m) \cos m\omega T}. \quad (3)$$

В соответствии с выражением (3) составим уравнение для определения $\Delta\omega$ по заданному коэффициенту использования энергии сигнала:

$$\int_0^{\Delta\omega} |S(\omega)|^2 d\omega = \int_0^{\Delta\omega} \left[|S_1(\omega)| \sqrt{N + \sum_{m=1}^{N-1} 2(N-m) \cos m\omega T} \right]^2 d\omega,$$

которое с учетом (1) можно переписать в виде

$$\int_0^{\Delta\omega} |S(\omega)|^2 d\omega = N\tau^2 \int_0^{\Delta\omega} \frac{\sin^2(0,5\omega\tau)}{(0,5\omega\tau)^2} d\omega + 2\tau^2 \times \\ \times \sum_{m=1}^{N-1} (N-m) \int_0^{\Delta\omega} \frac{\sin^2(0,5\omega\tau)}{(0,5\omega\tau)^2} \cos m\omega T d\omega. \quad (4)$$

Принимая во внимание (2), первое слагаемое в выражении (4) можно переписать так:

$$N\tau^2 \int_0^{\Delta\omega} \frac{\sin^2(0,5\omega\tau)}{(0,5\omega\tau)^2} d\omega = 2N\tau \left[\text{Si}(\Delta\omega\tau) - \frac{\sin^2(0,5\Delta\omega\tau)}{(0,5\Delta\omega\tau)^2} \right], \quad (5)$$

а второе слагаемое после простых тригонометрических преобразований представим в следующем виде:

$$2\tau^2 \sum_{m=1}^{N-1} (N-m) \int_0^{\Delta\omega} \frac{\sin^2(0,5\omega\tau)}{(0,5\omega\tau)^2} \cos m\omega T d\omega = \\ = 4 \sum_{m=1}^{N-1} (N-m) \left(\int_0^{\Delta\omega} \frac{\cos m\omega T}{\omega^2} d\omega - \int_0^{\Delta\omega} \frac{\cos \omega\tau \cos m\omega T}{\omega^2} d\omega \right).$$

Используя метод замены переменных, для данного уравнения окончательно получим

$$2\tau^2 \sum_{m=1}^{N-1} (N-m) \int_0^{\Delta\omega} \frac{\sin^2(0,5\omega\tau)}{(0,5\omega\tau)^2} \cos m\omega T d\omega = \\ = -4T \sum_{m=1}^{N-1} m(N-m) \left[\text{Si}(\Delta\omega mT) + \frac{\cos(\Delta\omega mT)}{\Delta\omega mT} \right] + \\ + 2 \sum_{m=1}^{N-1} (mT - \tau)(N-m) \left\{ \text{Si}[\Delta\omega(mT - \tau)] + \frac{\cos[\Delta\omega(mT - \tau)]}{\Delta\omega(mT - \tau)} \right\} + \\ + 2 \sum_{m=1}^{N-1} (mT + \tau)(N-m) \left\{ \text{Si}[\Delta\omega(mT + \tau)] + \frac{\cos[\Delta\omega(mT + \tau)]}{\Delta\omega(mT + \tau)} \right\}. \quad (6)$$

Объединяя правые части выражений (5) и (6), имеем

$$\int_0^{\Delta\omega} |S(\omega)|^2 d\omega = 2N\tau \left[\text{Si}(\Delta\omega\tau) - \frac{\sin^2(0,5\Delta\omega\tau)}{0,5\Delta\omega\tau} \right] - \\ - 4T \sum_{m=1}^{N-1} m(N-m) \left[\text{Si}(\Delta\omega mT) + \frac{\cos(\Delta\omega mT)}{\Delta\omega mT} \right] + \\ + 2 \sum_{m=1}^{N-1} (mT - \tau)(N-m) \left\{ \text{Si}[\Delta\omega(mT - \tau)] + \frac{\cos[\Delta\omega(mT - \tau)]}{\Delta\omega(mT - \tau)} \right\} + \\ + 2 \sum_{m=1}^{N-1} (mT + \tau)(N-m) \left\{ \text{Si}[\Delta\omega(mT + \tau)] + \frac{\cos[\Delta\omega(mT + \tau)]}{\Delta\omega(mT + \tau)} \right\}. \quad (7)$$

Используя известное соотношение Рейли [5]

$$\int_0^{\Delta\omega} |S(\omega)|^2 d\omega = \eta_s \int_0^{\infty} |S(\omega)|^2 d\omega = \eta_s \pi \int_{-\infty}^{\infty} s_{\text{BX}}^2(x) dx,$$

определяя

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} s_{\text{шх}}^2(x) dx &= \int_{-\infty}^{\infty} \{s(x) + s(x-T) + \dots + s(x-mT) + \dots \\ &\dots + s[x-(N-1)T]\}^2 dx = \int_0^{\tau} s^2(x) dx + \int_T^{T+\tau} s^2(x-T) dx + \dots \\ &\dots + \int_{mT}^{mT+\tau} s^2(x-mT) dx + \dots + \int_{(N-1)T}^{(N-1)T+\tau} s^2[x-(N-1)T] dx = N\tau \end{aligned}$$

и учитывая выражение (7), получаем следующее уравнение:

$$\begin{aligned} \eta_0 &= \frac{2}{\pi} \left[\text{Si}(\Delta\omega\tau) - \frac{\sin^2(0,5\Delta\omega\tau)}{0,5\Delta\omega\tau} \right] - \frac{4T}{N\tau\pi} \sum_{m=1}^{N-1} m(N-m) \times \\ &\times \left[\text{Si}(\Delta\omega mT) + \frac{\cos(\Delta\omega mT)}{\Delta\omega mT} \right] + \frac{2}{N\tau\pi} \sum_{m=1}^{N-1} (mT-\tau) \times \\ &\times (N-m) \left\{ \text{Si}[\Delta\omega(mT-\tau)] + \frac{\cos[\Delta\omega(mT-\tau)]}{\Delta\omega(mT-\tau)} \right\} + \frac{2}{N\tau\pi} \times \\ &\times \sum_{m=1}^{N-1} (mT+\tau)(N-m) \left\{ \text{Si}[\Delta\omega(mT+\tau)] + \frac{\cos[\Delta\omega(mT+\tau)]}{\Delta\omega(mT+\tau)} \right\}. \quad (8) \end{aligned}$$

Данное уравнение для оценки высших пространственных частот является общим для усеченно-периодического сигнала как с любым числом N элементарных импульсов, так и с $N=1$, когда выражение (8) сводится к известной записи А. А. Харкевича этой функции для одиночного сигнала. При увеличении числа импульсов N в усеченно-периодическом сигнале его амплитудный спектр из непрерывного (для случая одиночного сигнала) превращается в расщепленный и график $\eta_0(\Delta\omega)$ приобретает ярко выраженный ступенчатый характер (рис. 1, кривые 1-3) с хорошей сходимостью в области $\eta_0 \approx 0,9$ с графиками для случая $N=1$ (кривые 4 и 5). Как показывают результаты численного моделирования, для периодической штриховки машиностроительных чертежей с параметрами $T = 1,5 \div 2,5$ мм и $\tau_{\text{min}} = 0,2$ мм по ГОСТу 2303-68 $\eta_0 = 0,9$ при $\Delta\omega = 2\pi\nu_{\text{max}} = 25,5$ вплоть до $N = 200$. Эта величина N значительно превышает практическое число линий в локальных областях штриховки на конструкторских чертежах.

Учитывая реальное распределение контурных линий по ширине на практических конструкторских документах [6], в соответствии с которым среднестатистическая ширина тонких линий составляет величину $\tau \geq 0,3$ мм, можно сделать вывод, что требования к пропускной способности микроголограмм значительно снижаются в случае, когда $\eta_0 = 0,9$ при $\Delta\omega = 17,0$ (см. рис. 1, кривые 1 и 4).

Реальные машиностроительные чертежи представляют собой случайные распределения двумерных прямоугольных импульсов в ограниченном пространстве. Спектральное преобразование нельзя применить непосредственно к такому сигналу, поскольку он в информационном массиве документов не детерминирован, хотя для любой из его реализаций в пределах однократной голографической записи можно найти фурье-образ, отличный от любой другой реализации. Поэтому для оценки $\Delta\omega$ воспользуемся известным в радиотехнике [5] понятием энергетической спектральной плотности, а также взаимосвязью между энергетическим спектром

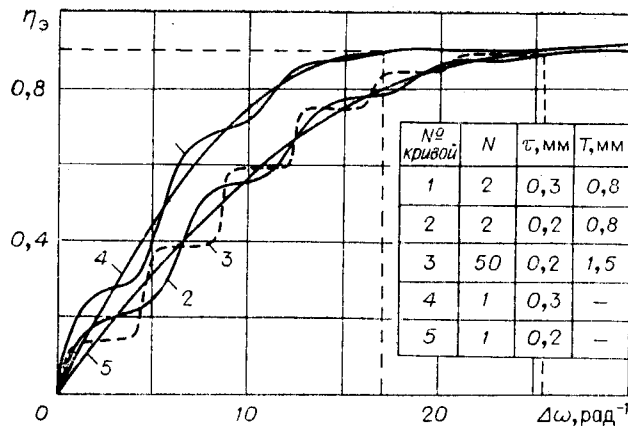


Рис. 1.

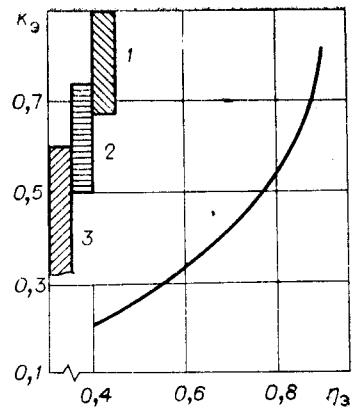


Рис. 2.

$\bar{W}(\omega)$ и спектральной плотностью одиночного сигнала с точностью до постоянного коэффициента

$$\bar{W}(\omega) = S_1^2(\omega) = \tau^2 \frac{\sin^2(0,5\omega\tau)}{(0,5\omega\tau)^2} \quad (9)$$

Поскольку регистрирующая среда является квадратичным детектором, подобие записей (1) и (9) свидетельствует об одинаковом значении v_{\max} , необходимом для передачи наименьшей по ширине одиночной линии в представленных моделях документа. Известное выражение для оценки размера микроголограммы [1] при этом сводится к виду

$$d_H = 2\lambda_w f k_r k_s k_m \tau_{\min}^{-1}$$

где λ_w — длина волны света, используемого при голографической микрозаписи; f — фокусное расстояние объектива фурье-преобразования; k_r — геометрический коэффициент, характеризующий кривизну и знак кривизны волнового фронта, а также относительное расположение транспаранта в объектном канале; $k_s = \Delta\omega\tau_{\min}/2\pi$ — энергетический коэффициент, определяющий полосу пространственных частот для передачи η_s -й доли энергии сигнала, а k_m — коэффициент миниатюризации документальной страницы информации на этапе формирования транспаранта. Например, при $\eta_s = 0,8$ получаем $\Delta\omega\tau_{\min} = 3,4$ и $k_s = 0,54$.

Для оперативного расчета d_H на рис. 2 представлен график зависимости $k_s = f(\eta_s)$, построенный согласно выражению (8) при $N=1$. С практической точки зрения граничное значение η_s целесообразно находить по физической читаемости всех информационных элементов, под которой понимается правильное восприятие каждого элемента вне его логической (для текстов) и геометрической (для чертежей) связи с остальными элементами изображений. Экспериментальные исследования читаемости проводились группой экспертов путем ранжирования воспроизводимых изображений по убыванию качества восприятия с уменьшением η_s при субъективной оценке по категориям «хорошая» (1), «удовлетворительная» (2) и «плохая» (3), шкала которых совмещена с графиком на рис. 2. Можно видеть, что область сходимости функций (2) и (8) является граничным значением η_s , где читаемость практически любого тексто-графического документа оказывается хорошей для визуального восприятия человеком-оператором. Поэтому, если априори известен среднестатистический параметр τ_{\min} массива документальных данных и значение $k_s = 0,8$ по плотности записи удовлетворяет исходному заданию, целесообразно, чтобы $\eta_s \geq 0,9$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ярмош Н. А., Ероховец В. К., Борисевич А. А. О выборе плоскости регистрации микроголограмм.— Изв. АН БССР. Сер. физ.-техн. наук, 1978, № 3.
2. Бродолин Л. И., Вагин Л. Н., Кальмансон В. А., Кап А. З. Проблемы создания средств хранения, поиска и воспроизведения больших массивов документальной информации с использованием методов голографии и растровой фотографии.— НТИ. Сер. 1, 1975, № 9.
3. Вагин Л. Н., Арсеньева Т. М., Назарова Л. Г., Ванин В. А. Голографическая миниатюризация научно-технических документов.— Опт. и спектр., 1975, т. 38, № 5.
4. Акаев А. А., Майоров С. А. Когерентные оптические вычислительные машины.— Л.: Машиностроение, 1977.
5. Харкевич А. А. Спектры и анализ.— М.: Физматгиз, 1962.
6. Ярмош Н. А. Информационное обеспечение процессов проектирования.— Минск: Наука и техника, 1975.

Поступила в редакцию 12 мая 1982 г.
