

ные ошибки и обнаруживающего двойные [7, 11, 12]. В настоящее время проводятся испытания эффективности такого кодирования; коррекция ошибок считывания осуществляется программным путем. По результатам испытаний будет выполнена аппаратная реализация блока коррекции ошибок, что даст возможность повысить достоверность считывания на 2—3 порядка без существенной потери емкости памяти и быстродействия.

Заключение. Проведенные исследования позволили выбрать оптимальные режимы записи и считывания данных, накопить статистический материал о характере и частоте ошибок, выявить их основные источники, а также экспериментально подтвердить возможность считывания больших массивов голограмм с частотой ошибок не более $10^{-6} \div 10^{-7}$ (без применения средств коррекции ошибок).

Авторы выражают благодарность Н. Н. Вьюхиной, Т. Н. Мантушу и Б. Н. Панкову за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Stewart W. S. et al. An experimental read-write holographic memory.— RCA Rev., 1973, vol. 34, N 3, p. 3—44.
2. D'Auria L., Huignard J. P., Slezak C. S., Spitz E. Experimental holographic read-write memory using 3-D storage.— Appl. Opt., 1974, vol. 13, N 4, p. 808—818.
3. Выдрин Л. В. и др. Экспериментальная оптико-электронная (голографическая) система памяти.— Автометрия, 1980, № 2.
4. Ванюшев Б. В. и др. Устройство хранения и считывания цифровых данных в голографической системе архивной памяти.— Автометрия, 1984, № 3.
5. Вьюхина Н. Н. и др. Система считывания страниц информации для голограммных ЗУ.— Автометрия, 1976, № 6.
6. Бутт В. Е., Панков Б. Н. Устройство сопряжения интегральной фотоматрицы с системой считывания страниц информации в оптическом ЗУ.— Автометрия, 1979, № 3.
7. Вьюхина Н. Н. и др. Программные средства для исследований, отладки и тестирования ГЗУ.— Автометрия, 1984, № 3.
8. Бутт В. Е. и др. Автоматизированная измерительная система для исследования характеристик фотоматриц и восстановленных изображений в ГЗУ.— В кн.: Тез. докл. I Всесоюз. конф. по радиооптике. Фрунзе: ФПИ, 1981.
9. Блок А. А. и др. Устройство автоматической записи матриц голограмм цифровых данных.— Автометрия, 1984, № 3.
10. Пен Е. Ф. Расчет достоверности считывания информации в ГЗУ на основе экспериментальных данных характеристик восстановленных изображений.— В кн.: Труды IV Всесоюз. конф. по голографии. Ереван: ВНИИРИ, 1982. ч. 2.
11. Лужецкая О. А., Мантуш Т. Н. Контроль правильности считывания информации в голограммном ЗУ.— Автометрия, 1975, № 3.
12. Винокуров В. С., Аксельрод А. А. Применение корректирующих кодов для повышения надежности записи и считывания информации в голографических запоминающих устройствах.— Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеχνическая, 1981, вып. 5, с. 104—111.

Поступила в редакцию 30 декабря 1983 г.

УДК 538.561.5 : 621.391.268

Ю. В. ВОВК, Ю. А. ЩЕПЕТКИН

(Новосибирск)

ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ ГЕТЕРОДИННОЕ СЧИТЫВАНИЕ ДВОИЧНЫХ ДАННЫХ ИЗ ОДНОМЕРНЫХ ГОЛОГРАММ ФУРЬЕ

Восстановление информации из фурье-голограмм проводится обычно путем спектрального анализа (разложения) функции амплитудного пропускания $t_A(x)$ по пространственным частотам. Разложение осуществ-

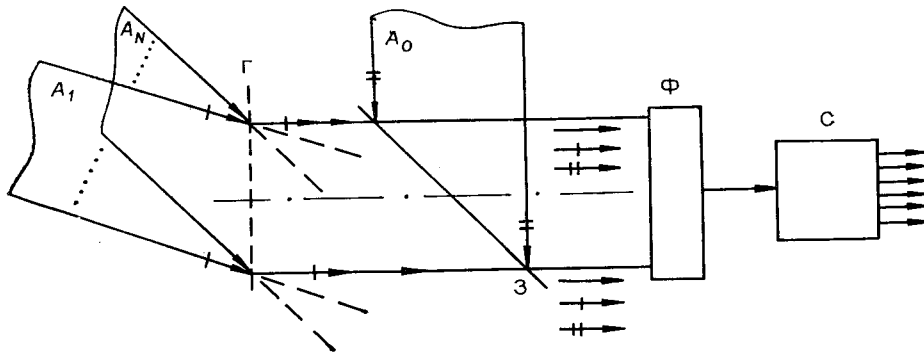


Рис. 1.

вляется в оптической части устройства, а результат считывается набором фотоприемных элементов [1].

В данной работе исследован иной способ восстановления информации, основанный на использовании оптического гетеродина; его целесообразно применять тогда, когда голограммы формируются путем оптического проецирования изображения акустических волн на фотосреду [2]. В этом случае блок фотосчитывания содержит одноэлементный фотоприемник и минимальное число оптических элементов.

Основные этапы процесса восстановления информации могут быть продемонстрированы на классической схеме гетеродинного считывания (рис. 1) [3].

Одномерная голограмма Фурье (Γ), содержащая информацию о двоичном N -разрядном слове, представляет собой совокупность дифракционных решеток, число которых соответствует числу равных единице двоичных разрядов регистрируемого слова. Линейное от экспозиции приближение амплитудного пропускания такой голограммы можно представить в виде

$$t_A(x) = t_0 + t_1 E = t_0 + t_1 \tau \left| R + \sum_{i=1}^N P_i e^{jk_i x} \right|^2, \quad (1)$$

где t_0 и t_1 — первые два коэффициента разложения функции $t_A(x)$ в ряд по степеням экспозиции E в пределах линейного участка t_A — E -характеристики, R и P_i — амплитуды опорной и сигнальных плоских волн, участвовавших в формировании голограммы, τ — время экспонирования фотосреды, $\{k_i\}$ — проекции волновых векторов сигнальных волн на ось X .

Голограмма освещается N восстанавливающими плоскими волнами, причем направления этих волн выбираются таким образом, чтобы пучки, дифрагированные на голограмме в один из первых порядков, оказались коллинеарными. Для однозначного считывания информации восстанавливающие плоские волны должны иметь различный сдвиг Ω_i частоты света. Такими же частотными сдвигами будут обладать продифрагировавшие пучки, при этом значение любого разряда считываемого слова определяется наличием или отсутствием в этих пучках составляющей с частотным сдвигом, соответствующим данному разряду.

Всем требованиям к восстанавливающим волнам в полной мере удовлетворяет совокупность

$$\sum_{i=1}^N A e^{j(k_i x - \Omega_i t)}, \quad (2)$$

где $\Omega_i = k_i V$, а V — константа.

Освещая голограмму набором волн (2), получим, что в направлении оптической оси системы будет распространяться совокупность волн

$$t_1 \tau R A \sum_{i=1}^N P_i e^{-j\Omega_i t}. \quad (3)$$

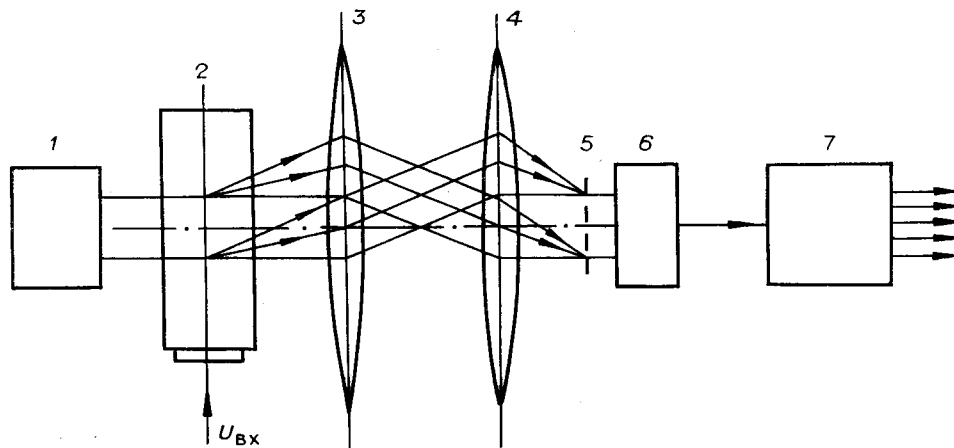


Рис. 2.

Обозначим через A_0 амплитуду опорного луча, вводимого с помощью полупрозрачного зеркала 3 в оптическую систему для выполнения операции гетеродинамирования. Тогда, принимая во внимание, что выходной ток J_Φ фотоприемника Φ пропорционален интенсивности падающего на него света, будем иметь

$$J_\Phi \sim \left| A_0 + t_1 \tau R A \sum_{i=1}^N P_i e^{-j\Omega_i t} \right|^2 = |A_0|^2 + 2A_0 t_1 \tau R A \sum_{i=1}^N P_i \cos \Omega_i t + \\ + |t_1 \tau R A|^2 \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^N P_i P_l e^{-j(\Omega_i - \Omega_l)t}. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что информация, записанная в голограмме Γ (набор $\{P_i\}$), может быть восстановлена путем спектрального анализа тока фотоприемника J_Φ в диапазоне частот $\Omega_1 - \Omega_N$. Эта операция выполняется спектроанализатором С.

Устройства, основанные на использовании оптического гетеродинамирования, очень чувствительны к фазовым помехам, возникающим в любом из каналов, к точности юстировки оптической схемы и ее стабильности. Обеспечение стабильности требует значительных усилий, особенно в случае, когда осуществляется считывание информации с подвижного носителя. Наиболее устойчивой к упомянутым выше возмущениям является схема, в которой опорный и сигнальные пучки проходят через одни и те же оптические элементы (рис. 2).

Устройства, построенные по такой схеме, реализуют процесс «параллельного гетеродинамирования» [3]. Рассмотрим основные режимы считывания, осуществляемые в подобных устройствах.

Гетеродинамирование при полной апертуре. В этом случае устройство считывания (см. рис. 2) работает следующим образом. Плоский пучок света от источника непрерывного когерентного излучения 1 направляется на акустооптический модулятор 2. На электрический вход модулятора подается сигнал

$$U_{\text{вх}} = \sum_{i=1}^N U_0 \cos(\Omega_i t). \quad (5)$$

Поскольку используемые модуляторы работают обычно в режиме дифракции Брэгга, то на их выходе, кроме прошедшего, возникают N дифрагировавших пучков, сформированных многочастотным сигналом (5). Изображение модулятора переносится объективами 3 и 4 в плоскость анализируемой голограммы 5.

Пространственная частота k_i звуковой волны в акустооптическом модуляторе связана с частотой Ω_i возбуждающего электрического сиг-

нала соотношением $k_i = \Omega_i/V_{зв}$, где $V_{зв}$ — скорость звуковой волны. При этом голограмма освещается осевой волной и набором плоских волн, эквивалентных набору (2), в котором $V = V_{зв}$, а амплитуда A зависит от амплитуды освещающей модулятор световой волны и эффективности процесса дифракции света на звуковых волнах в модуляторе.

Прошедшие голограмму световые пучки попадают на вход фотоприемника 6 и преобразуются в многочастотный электрический сигнал вида (4). Этот сигнал обрабатывается устройством спектрального анализа 7, на выходе которого восстановленные из голограммы разряды двоичного слова представлены амплитудами спектральных компонент фототока.

Для определения достоинств и недостатков гетеродинного считывания проведем анализ работы устройства, схема которого приведена на рис. 2.

где $P(x)$ — апертурная функция, $I(x, t)$ — интенсивность освещающего голограмму светового распределения, $t_A(x)$ — амплитудное пропускание голограммы. Следует отметить, что такая схема для считывания информации с фазовых голограмм не пригодна, поскольку для них $|t_A(x)|^2 = 1$.

Для рассматриваемого устройства выражение $I(x, t)$ имеет вид

$$I(x, t) = \left| S_0 + S \sum_{i=1}^N e^{jk_i x - j\Omega_i t} \right|^2 = |S_0|^2 + N |S|^2 + 2SS_0 \sum_{i=1}^N \cos(k_i x - \Omega_i t) + |S|^2 \sum_{i \neq l} \sum_l e^{j(k_i - k_l)x - j(\Omega_i - \Omega_l)t}, \quad (7)$$

где S_0 и S — амплитуды опорного и считывающих световых пучков.

Подставляя (7) в (6), получим

$$J_{\Phi} \sim \int P(x) |t_A(x)|^2 (|S_0|^2 + N |S|^2) dx + 2SS_0 \int P(x) |t_A(x)|^2 \sum_i \cos(k_i x - \Omega_i t) dx + |S|^2 \sum_{i \neq l} \sum_l \int P(x) |t_A(x)|^2 e^{j(k_i - k_l)x - j(\Omega_i - \Omega_l)t} dx \sim J_{\Phi_1} + J_{\Phi_2} + J_{\Phi_3}. \quad (8)$$

Если выбрать рабочий диапазон частот так, чтобы $\Omega_N < 2\Omega_1$, то частота изменения фототоков J_{Φ_1} и J_{Φ_3} будет находиться вне рабочей области, поэтому J_{Φ_1} и J_{Φ_3} далее можно не учитывать. Интересующая нас часть

$$J_{\Phi_2} \sim 2SS_0 \sum_{i=1}^N \int_{-\infty}^{\infty} P(x) |t_A(x)|^2 \cos(k_i x - \Omega_i t) dx \quad (9)$$

представляет собой действительное преобразование Фурье функции $P(x)|t_A(x)|^2$ в дискретных точках k_1, k_2, \dots, k_N , причем коэффициенты преобразования Фурье в этих точках определяют амплитуды гармонических составляющих с частотами $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_N$ в выражении для фототока (8).

Из выражения (9) следует, что амплитуда i -й спектральной составляющей фототока J_{Φ_2} будет зависеть только от значения i -го разряда записанного двоичного слова, если реализовать режим записи, при котором пропускание голограммы по интенсивности пропорционально энергии света, попавшего на фотосреду, и, следовательно, $|t_A(x)|^2 \sim R \sum_{i=1}^N P_i \cos k_i x$.

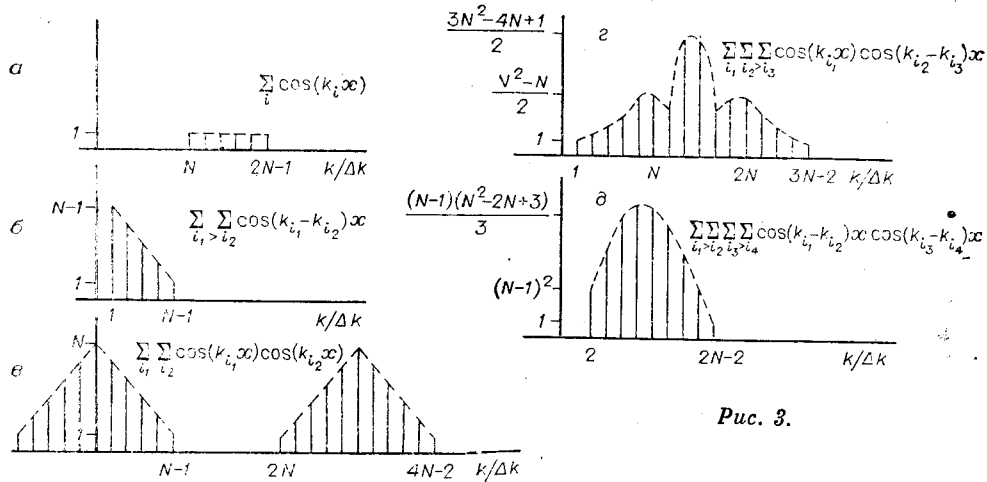


Рис. 3.

Однако обычно при линейной записи голограммы энергии записывающих пучков пропорционально ее амплитудное пропускание $t_A(x)$ [4]. В этом случае с хорошей степенью точности можно записать, что

$$t_A(x) = t_0 + t_1 \tau \left| R + \sum_i P_i e^{j k_i x} \right|^2 = t_0 + t_1 \tau \left(R^2 + \sum_i P_i^2 \right) + 2 t_1 \tau R \sum_i P_i \cos k_i x + t_1 \tau \sum_{i \neq l} P_i P_l e^{j(k_i - k_l)x} = \bar{t}_A + 2 t_1 \tau R \sum_i P_i \cos k_i x + t_1 \tau \sum_{i \neq l} P_i P_l e^{j(k_i - k_l)x}, \quad (10)$$

где \bar{t}_A — среднее амплитудное пропускание голограммы. Квадрат выражения $|t_A(x)|$, входящий в интеграл (9), имеет довольно громоздкий вид:

$$|t_A(x)|^2 = \bar{t}_A^2 + (2 t_1 \tau R)^2 \sum_{i_1} \sum_{i_2} P_{i_1} P_{i_2} \cos k_{i_1} x \cos k_{i_2} x + 4 \bar{t}_A t_1 \tau R \sum_i P_i \cos k_i x + 2 \bar{t}_A t_1 \tau \sum_{i_1 \neq i_2} P_{i_1} P_{i_2} e^{j(k_{i_1} - k_{i_2})x} + (t_1 \tau)^2 \sum_{i_1 \neq i_2} \sum_{i_3 \neq i_4} P_{i_1} P_{i_2} P_{i_3} P_{i_4} e^{j(k_{i_1} - k_{i_2})x} \times e^{j(k_{i_3} - k_{i_4})x} + (2 t_1 \tau)^2 R \sum_{i_1} \sum_{i_2 \neq i_3} P_{i_1} P_{i_2} P_{i_3} \cos(k_{i_1} x) e^{j(k_{i_2} - k_{i_3})x}. \quad (11)$$

Формула (11), кроме информативного члена $\sum_i P_i \cos k_i x$, содержит ряд неинформативных. Определим их спектральный состав с целью оценки влияния неинформативных членов. Результат анализа представлен на рис. 3, а — д в виде распределения значений отдельных сумм из (11). Вычисления проведены в предположении, что $P_i = P$ для всех i и $k_i = (N + i - 1)\Delta k$ (т. е. для эквидистантного ряда пространственных частот в октавном диапазоне). Видно, что последние две кратные суммы имеют спектральные составляющие в основной полосе пространственных частот.

Для определения вклада этих составляющих в уровень считываемого сигнала необходимо оценить значения коэффициентов перед знаками сумм в (11). Известно [4], что $t_0 \approx 1$, $t_A \sim 0,5$, а линейный участок $t_A - E$ -характеристики имеет величину $\sim 2 \times 0,2$ (т. е. $2 R t_1 \tau P N \approx 0,2$). Исходя из этого значения интересующих нас множителей будут следующими:

$$\bar{t}_A^2 \approx 0,25, \quad (2 t_1 \tau R)^2 P^2 \approx 4 \cdot 10^{-2} / N^2, \quad 4 \bar{t}_A t_1 \tau R P \approx 0,2 / N, \\ 2 \bar{t}_A t_1 \tau P^2 \approx 2 \cdot 10^{-2} / N^2, \quad (t_1 \tau P^2)^2 \approx 4 \cdot 10^{-4} / N^4, \quad (2 t_1 \tau P)^2 R P \approx 8 \cdot 10^{-3} / N^3.$$

С учетом полученных значений можно вычислить добавку к основному сигналу от попавших в рабочий диапазон частот интермодуляци-

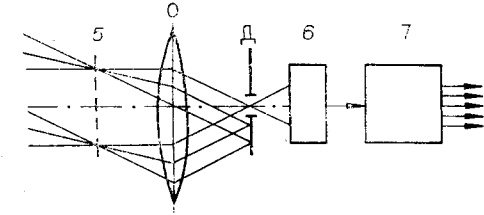
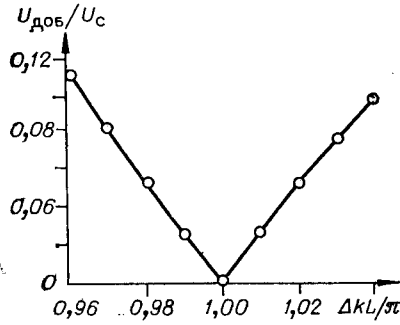


Рис. 5.

Рис. 4.

онных членов (см. рис. 3); она составляет величину $\sim 6 \cdot 10^{-2}$. Ввиду малости такие добавки далее учитываться не будут.

Рассмотренный пример соответствует наихудшему по уровню интермодуляционных помех случаю, когда запись и считывание информации проводятся без фазовой маски. Можно показать, что для другого крайнего случая, когда фазовая маска идеальна ($\sum_{i \neq l} P_i P_l \exp \{j(k_i - k_l)x\} = 0$), интермодуляционные спектральные составляющие в рабочей полосе пространственных частот отсутствуют.

Электрический сигнал $J_{\Phi 2}$ с выхода фотоприемника поступает на устройство параллельного спектрального анализа и подвергается обработке, в результате чего на выходе, соответствующем частоте Ω_l , появляется сигнал

$$U_l \sim \frac{1}{T} \int_0^T J_{\Phi 2}(t) \cos(\Omega_l t) dt. \quad (12)$$

Подставляя (9) в (12) и проводя интегрирование в предположении $P(x) = \text{rect}(x/L - 1/2)$ и $(\Omega_{i+1} - \Omega_i)T = \pi n$ (это условие легко выполняется для эквидистантной сетки частот $\{\Omega_i\}$ соответствующим выбором T), получим

$$\begin{aligned} U_l \sim & \left[(\bar{t}_A)^2 + 2(t_1 \tau R)^2 \sum_i P_i^2 \right] \frac{\sin k_l L}{k_l} + 2\bar{t}_A t_1 R P_l \tau L + 2\bar{t}_A t_1 R \tau \sum_{i \neq l} P_i \frac{\sin(k_i - k_l)L}{k_i - k_l} + \\ & + 2\bar{t}_A t_1 R \tau \sum_i P_i \frac{\sin(k_i + k_l)L}{k_i + k_l} + 2t_1 \tau (t_1 R^2 \tau + \bar{t}_A) \sum_{i > m} \sum P_i P_m \times \\ & \times \left(\frac{\sin(k_i - k_m - k_l)L}{k_i - k_m - k_l} + \frac{\sin(k_i - k_m + k_l)L}{k_i - k_m + k_l} \right) + (t_1 \tau R)^2 \sum_i \sum_m P_i P_m \times \\ & \times \left(\frac{\sin(k_i + k_m - k_l)L}{k_i + k_m - k_l} + \frac{\sin(k_i + k_m + k_l)L}{k_i + k_m + k_l} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Если длину голограммы выбрать так, чтобы $\Delta k L = \pi$, то в (13) исчезают все члены, кроме основного, т. е. $U_l \sim P_l$, и считывание осуществляется без искажений с точностью до не учитываемой нами добавки. Отступление в выборе длины голограммы от величины $L = \pi/\Delta k$ приводит к появлению в выражении (13) помехи, которую трудно оценить аналитически. Значение этой помехи вычислено на ЭВМ; полученный результат представлен на рис. 4 в виде зависимости отношения абсолютной величины добавки в (13) к уровню основного члена от длины голограммы L в окрестности точки $L = \pi/\Delta k$.

Гетеродинирование с фильтрацией. Гетеродинирование при полной апертуре, наряду с достоинствами, обладает и рядом недостатков. Наиболее существенные из них — неустраняемая помеха (последние суммы в (11)) и невозможность считывания информации с фазовых голограмм, что следует из (6).

При создании устройства, пригодного для считывания информации с голограмм любого типа, необходимо применять схему, в которой световой пучок после голограммы попадает на линзу, в фокальной плоскости которой установлена диафрагма (см. рис. 5, где показана только та часть схемы, которая отличается от изображенной на рис. 2).

Ток на выходе фотоприемного устройства в этом случае описывается выражением

$$\hat{J}_{\Phi} \sim \int_{-K}^K \left| \mathcal{F} \left\{ t_A(x) \left(S_0 + S \sum_i e^{j(k_i x - \Omega_i t)} \right) \right\} \right|^2 dk, \quad (14)$$

где K — полуширина щели, $\mathcal{F}\{ \}$ — преобразование Фурье, осуществляемое линзой. Выделяя, как и выше, из (14) только слагаемые с частотами в диапазоне $\Omega_1 - \Omega_N$, будем иметь

$$\hat{J}_{\Phi_2} \sim \int_{-K}^K \operatorname{Re} \left[\mathcal{F}^* \{ t_A(x) S_0 \} \mathcal{F} \left\{ S t_A(x) \sum_{i=1}^N e^{j(k_i x - \Omega_i t)} \right\} \right] dk.$$

Вычисляя преобразование Фурье, для составляющей с частотой Ω_l получим

$$\begin{aligned} \hat{J}_{\Phi_2}^{(\Omega_l)} \sim \int_{-K}^K \left[t_A \frac{\sin kL}{k} \frac{\sin \left(\frac{k_l - k}{2} L \right)}{k_l - k} \cos \left(\frac{k_l L}{2} \right) + t_1 \tau R P_l \frac{\sin^2 \left(\frac{kL}{2} \right)}{k^2} + \right. \\ \left. + t_1 \tau R \sum_i P_i \cos \left(\frac{k_i + k_l}{2} L \right) \frac{\sin \left(\frac{k_i + k_l + k}{2} L \right) \sin \left(\frac{kL}{2} \right)}{(k_i + k_l + k) k} + \right. \\ \left. + t_1 \tau R \sum_{i \neq l} P_i \cos \left(\frac{k_i - k_l}{2} L \right) \frac{\sin \left(\frac{k_i - k_l + k}{2} L \right) \sin \left(\frac{kL}{2} \right)}{(k_i - k_l + k) k} \right] dk. \end{aligned}$$

Результат численного интегрирования последнего выражения для различных значений полуширины щели K графически представлен на рис. 6. Граничные положения занимают кривые, построенные для $l = 1$ и $l = 2$, все остальные ($l = 3, 4, \dots, 32$) находятся внутри этой полосы или совпадают с граничными положениями ($l = 32$ и $l = 31$). Кроме кривых, характеризующих поведение отношения сигнал/шум, на этом рисунке показан характер убывания уровня сиг-

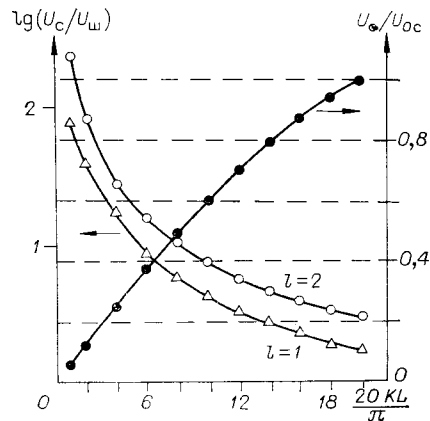


Рис. 6.

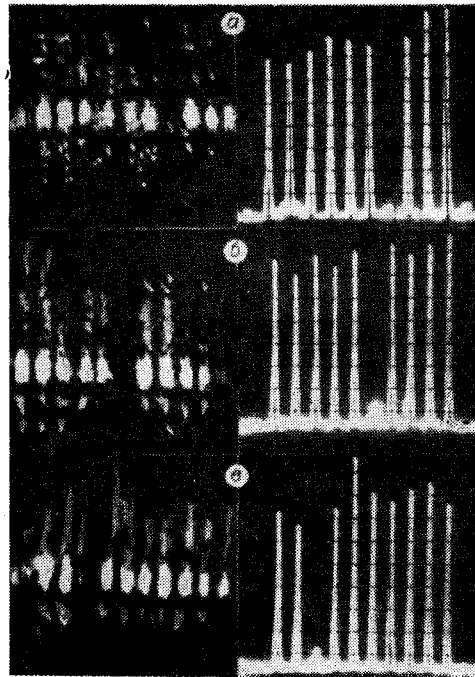


Рис. 7.

нала при уменьшении размера фильтрующей щели. Выбор максимально возможного K зависит от конкретной реализации устройства и предельно допустимого уровня отношения сигнала/шум. Например, допустимому отношению $S/N = 10$ соответствует 30%-ный уровень сигнала.

Экспериментальная проверка процесса гетеродинного считывания информации проводилась в устройстве, оптическая схема которого показана на рис. 2. Источник света — полупроводниковый лазер 32ДЛ101, работающий в режиме непрерывной генерации. В акустооптический модулятор МЛ-201 вводилась сумма десяти эквидистантных гармоник с частотами в диапазоне 56—74 МГц. Оптическая система, состоящая из двух объективов 3 и 4, помимо переноса выходных световых пучков модулятора на голограмму, обеспечивала согласование пространственных частот акустических волн (модулятор) с частотами дифракционных решеток (голограмма). На голограммах размером $\sim 200 \times 10$ мкм² были зарегистрированы 10-разрядные двоичные слова, один из разрядов которых равен нулю. Световые пучки, прошедшие через голограмму, воспринимались фотодиодом, ток которого после усиления поступал на устройство спектрального анализа (серийный спектроанализатор СЧ-45).

На рис. 7, а — в приведен результат считывания трех голограмм, содержащих наборы двоичных разрядов 1111110111, 1111101111 и 1101111111. На этих фотографиях показаны изображения, восстановленные из голограмм обычным методом (слева), и изображения, наблюдаемые на экране спектроанализатора при гетеродинном считывании тех же голограмм (справа). Максимальное отношение сигнал/шум, достигнутое в экспериментах, 25 дБ, минимальное — 6 дБ, наибольший разброс уровня единиц 6 дБ (в 2 раза).

ВЫВОДЫ

1. Применение гетеродинного считывания информации из одномерных голограмм в устройствах, основанных на проецировании изображения ультразвуковых волн в плоскость фотосреды, позволяет существенно упростить оптическую часть таких устройств и повысить достоверность считывания информации.

2. Минимум интермодуляционных искажений при гетеродинном считывании соответствует режиму записи голограмм, при котором пропускание фотосреды по интенсивности пропорционально экспозиции.

3. Интермодуляционные помехи, возникающие в режиме гетеродинного считывания при полной апертуре, лежат в рабочей области пространственных частот и в наихудшем случае имеют уровень порядка $6 \cdot 10^{-2}$ от уровня сигнала.

4. Гетеродинирование с фильтрацией за счет снижения уровня сигнала позволяет увеличить отношение сигнал/шум.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акаев А. А., Майоров С. А. Когерентные оптические вычислительные машины. — Л.: Машиностроение, 1977.
2. Вовк Ю. В., Щепеткин Ю. А. Синтез голограмм двоичной информации акустооптическими модуляторами. — Автометрия, 1980, № 2.
3. Карлтон Х., Малони В., Мелтз Г. Коллинеарное гетеродинирование в оптических процессорах. — ТИИЭР, 1969, № 5.
4. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. — М.: Мир, 1973.

Поступила в редакцию 4 октября 1983 г.