

5. Чернышев Л. Ф. Программирование экспериментальных исследований оптико-электронных систем с использованием концепций Р-технологии.— В кн.: Р-технология программирования и средства ее инструментальной поддержки задач. Киев: ИК АН УССР, 1982.
6. Харкевич А. А. Борьба с помехами.— М.: Госфизматиздат, 1963.
7. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки.— М.: Мир, 1976.

Поступила в редакцию 16 января 1984 г.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ СЧИТЫВАНИЯ ДАННЫХ В ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ЗУ

В последнее время создано несколько экспериментальных образцов голографических ЗУ (ГЗУ) [1—4]. Испытания этих устройств выявили недостаточную степень надежности их работы и, в частности, низкую достоверность фотосчитывания. Причины такого положения заключаются главным образом в несовершенстве элементной базы ГЗУ и в недостаточном внимании разработчиков к вопросам надежности работы этих устройств.

Цель настоящей статьи — изложить результаты экспериментальных исследований достоверности фотосчитывания, полученные в ходе испытаний опытного образца архивного ГЗУ [4]. Выполненная работа была направлена на получение статистических данных о характере и частоте ошибок считывания; на исследование зависимости достоверности фотосчитывания от характеристик и режима работы фотоматрицы, качества восстановленных изображений, аберраций оптики, дефектов голограмм; на оценку эффективности методов и устройств повышения достоверности фотосчитывания данных.

Аппаратура и методика эксперимента. Экспериментальные исследования по фотосчитыванию проводились на устройствах [3, 4], содержащих автоматизированные накопители модулей памяти, оптические и электронные системы считывания данных [5, 6]. Управление работой этих устройств осуществлялось от ЭВМ СМ-4, при этом обеспечивались автоматическая адресная выборка модулей памяти из накопителя, выборка заданной голограммы (или подмассива голограмм) из модуля, считывание и ввод данных в ЭВМ, контроль, диагностика и отображение результатов считывания [7].

Эксперименты по фотосчитыванию проводились в несколько этапов. Вначале с помощью фотоматричной измерительной системы (ФМИС) [8] были исследованы характеристики фотоматрицы МФ-14. Измерения показали, что среднее значение и относительное среднеквадратическое отклонение темнового тока используемой нами фотоматрицы соответственно равны 550 мкА и 3%, средняя крутизна фотоэлектрических характеристик $\sim 7 \cdot 10^7$ А/Дж, а разброс этих характеристик незначителен. Модули памяти (матрицы голограмм размерностью 32×32 и более) предварительно просматривались под микроскопом с целью выявления дефектных голограмм. В среднем их наблюдалось $\sim 1 \div 2\%$ от общего количества голограмм. Далее проводилось измерение статистических характеристик восстановленных изображений с учетом шумов оптического канала считывания (шумы рассеяния, аберрации считывающего пучка,

перекрестные помехи и т. п.). Эти измерения выполнялись с помощью ФМИС и аппаратуры фотосчитывания [5, 6]. В результате многократных измерений установлено, что в целом по массиву 32×32 голограмм средний (\bar{K}) и минимальный (K_{\min}) контрасты изображений «1» и «0» составляют примерно 40:1 и 4:1, отношения сигнал/шум (С/Ш) изображений «1» и «0» — 4,5:1 и 2:1, а для одиночных голограмм — $\bar{K} \approx 100:1$, $K_{\min} \approx 10:1$, $(\text{С/Ш})_1 \approx 7:1$. Здесь под контрастом понимается отношение $K = \bar{P}_1/\bar{P}_0$, а $(\text{С/Ш})_{1,0} = \bar{P}_{1,0}/\sigma_{1,0}$, где \bar{P}_1 , \bar{P}_0 , $\sigma_{1,0}$ — соответственно средние значения и среднеквадратические отклонения мощностей изображений «1» и «0». При этом среднее отношение сигнал/фон соседних голограмм равно 60:1, среднее значение дифракционной эффективности голограмм $\sim 4\%$, а относительное среднеквадратическое отклонение этой величины $\sim 10\%$. Полученные характеристики восстановленных изображений соответствуют оптимальному режиму записи голограмм, при котором средняя экспозиция составляет $\sim 8 \cdot 10^{-3}$ Дж/см², соотношение мощностей опорного и сигнального пучков $\sim 10:1$ (при записи голограмм использовались фотопластинки ПЭ-2) [9].

Для упрощения контроля результата фотосчитывания записывались голограммы тестовых изображений: «шахматное», «антишахматное», «единичное» поля и т. п. Режим визуального сравнения результата фотосчитывания (на экране дисплея) с исходным изображением использовался только при считывании одиночных голограмм. При считывании массива голограмм это сравнение выполнялось автоматически по совпадению контрольной суммы, и в случае ошибки на экране дисплея отображались адрес голограммы и ее содержимое.

В процессе фотосчитывания варьировались величина световой энергии (путем задания времени накопления t_n) E и пороговый сигнал различения «1» и «0» I_n . Вначале производилось считывание отдельных голограмм (обычно центральной и угловых в матрице), при этом последовательно устанавливалось одно из значений I_n ($0 < I_n < I_{T \max}$). Для каждого значения I_n определялся диапазон допустимого изменения E (от E_{\min} до E_{\max}), при котором отсутствовали ошибки считывания. Таким образом находилась зона безошибочного считывания отдельных голограмм. Аналогичным образом формировалась зона безошибочного (или с ограниченным количеством ошибок) считывания для матрицы голограмм. На рис. 1 показаны зоны безошибочного считывания отдельной голограммы (1—1) и считывания матрицы 16×16 голограмм с частотой ошибок $R = 10^{-5}$ (2—2), где E_0 — средняя энергия насыщения фотоприемника, I_T — среднее значение темнового сигнала фотоматрицы. Оптимальная пара значений E и I_n определялась следующим образом: при заданной степени вероятности ошибки значение E выбиралось вблизи вершины соответствующей зоны, поскольку в этом случае реализуется наименьшее значение времени накопления, а следовательно, и наибольшая скорость считывания при заданной вероятности ошибки.

В частности, при $R = 10^{-5}$ для фотоматрицы с $I_T = 550$ мкА и $E_0 = 3 \cdot 10^{-12}$ Дж/бит оптимальные значения E и I_n составили $6 \cdot 10^{-12}$ Дж/бит и 420 мкА, а время накопления $t_n \sim 150$ мкс при мощности восстанавливающего пучка ~ 2 мВт.

Результаты эксперимента. Критичности зависимостей количества

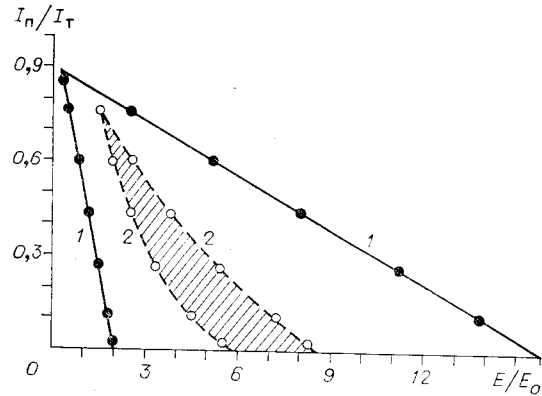


Рис. 1.

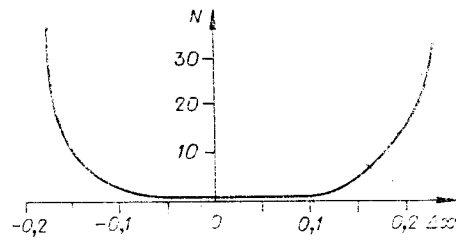


Рис. 2.

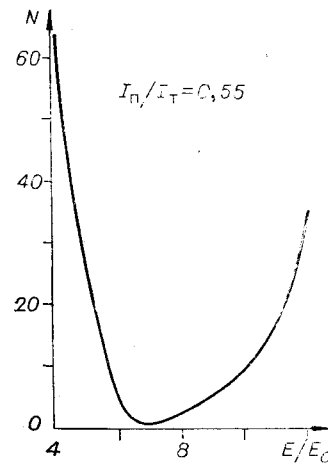


Рис. 3.

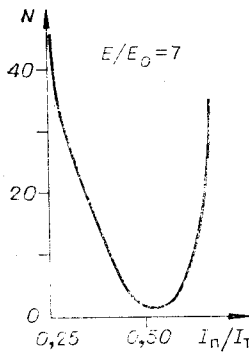


Рис. 4.

ошибочно считанных голограмм от относительной погрешности позиционирования восстанавливающего пучка Δx (обусловленной aberrациями оптики и нестабильностью углового положения пучка лазера) и параметров режима считывания E/E_0 и I_n/I_T показаны соответственно на рис. 2—4. Видно, что влияние погрешности позиционирования становится существенным, если Δx превышает $\pm 15\%$ от размера голограммы. Такая же сильная зависимость наблюдается при изменении параметров E/E_0 и I_n/I_T .

Далее оценивалась продолжительность безошибочного считывания матрицы из 32×32 голограмм с тестовыми изображениями страниц (кроме $10 \div 20$ дефектных голограмм). Время полного цикла считывания указанного массива голограмм составляло ~ 20 с, включая операции контроля правильности считывания. В среднем наблюдалась одна ошибка на 100 циклов считывания, что соответствует частоте появления ошибок $\sim 10^{-8}$. Анализ показывает, что имеют место в основном одиночные ошибки на одно 16-разрядное слово (свыше 80%), причем преобладают ошибки типа «1» \rightarrow «0». Ошибки считывания обусловлены главным образом разбросом мощностей восстановленных изображений «1» и «0» ($\sigma'_1 \sim 0,2$, $\sigma'_0 \sim 0,3$), нестабильностью дифракционной эффективности голограмм ($\sigma'_n \sim 0,1$) и зависимостью мощности изображений «1» от количества «1» в регистрируемом изображении страниц. В свою очередь, наиболее существенное влияние на разброс мощностей изображений «1» и «0» оказывают дифракционные помехи ($\sigma'_{1д} \sim 0,1$), нелинейные искажения ($\sigma'_{нел} \sim 0,1$), неравномерность светопропускания ячеек жидкокристаллического управляемого транспаранта ($\sigma'_T \sim 0,08$).

В результате экспериментальных исследований влияния дефектов носителя на достоверность считывания установлено, что при площади дефекта $\sim 2\%$ от площади голограммы характеристики восстановленного изображения (для отдельной голограммы) ухудшаются следующим образом: средний контраст снижается от 100:1 до 78:1, отношения $(C/Ш)_1$ и $(C/Ш)_0$ — соответственно от 7:1 до 5:1 и от 3,3:1 до 2:1. При этом расчетная вероятность ошибочного считывания возрастает от $R \sim 10^{-10}$ до $R \sim 10^{-7}$. Расчет проведен по методике [10].

Отметим, что все перечисленные результаты получены без использования каких-либо средств коррекции ошибок. С целью дальнейшего повышения достоверности считывания введено кодирование данных с применением корректирующего кода Хемминга, исправляющего одиноч-

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-