

3. Закшецкая Т. Я., Ковальский Л. В., Полянский В. К. Безопорная голограмма как фильтр оптического коррелятора // Оптическая голография и ее применение.— Л.: ЛДНТП, 1974.
4. Полянский В. К., Росляков С. Н., Тарновецкий В. В. Яркие характеристики изображения, восстановленного по безопорной голограмме // Укр. физ. журн.— 1980.— 25, № 4.
5. Стрэтт Дж. В. (Рэлей). Теория звука.— М.: ГИТТЛ, 1955.— Т. 2.— С. 417.
6. Горелик Г. С. Колебания и волны.— М.: ГИФМЛ, 1959.
7. Стринадко Л. В., Полянский В. К., Стринадко М. Т. О структуре поля, рассеянного фазовым транспарантом // Оптика и спектроскопия.— 1980.— 49, № 5.
8. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография.— М.: Мвр, 1973.
9. Полянский П. В. Влияние фазовой модуляции объектного поля на результат голографической фильтрации // Автометрия.— 1989.— № 1.
10. Мохунь И. И., Полянский В. К., Протасевич В. И., Яценко В. В. Влияние фазовых неоднородностей на свойства оптического тракта // Автометрия.— 1982.— № 2.

Поступила в редакцию 10 октября 1988 г.

УДК 681.327.68 : 778.38

А. А. БЛОК
(Новосибирск)

ВЛИЯНИЕ СПОСОБОВ КОДИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ В ГЗУ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОССТАНОВЛЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ СТРАНИЦ ДАННЫХ

Достоверность считывания цифровой информации в голографических запоминающих устройствах (ГЗУ) в сильной степени зависит от стабильности характеристик качества изображений страниц данных, восстановленных из массива голограмм, на которую, в свою очередь, влияет большое количество факторов: флуктуации параметров элементов ГЗУ (лазера, устройства набора страниц данных, дефлектора, формирующей оптики и т. д.), нестабильность параметров режима записи и обработки голограмм, неравномерность характеристик регистрирующей среды, пыль, турбулентность воздушной среды, вибрации и т. д. [1 — 3].

Одним из наиболее существенных дестабилизирующих факторов является влияние информационного содержания страниц данных на характеристики восстановленных изображений. Под информационным содержанием в этом случае подразумевается количество оптических «1» N_1 и их размещение в странице данных. Анализ публикаций и опыт практической работы по записи больших массивов голограмм различных типов реальной цифровой информации и исследованию их характеристик показывают, что влияние информационного содержания страниц данных на характеристики восстановленных изображений изучено недостаточно.

Цель настоящей статьи — показать воздействие информационного содержания страниц данных на характеристики восстановленных из голограмм изображений для различных типов информации (полутонные изображения, текст, графика) и предложить достаточно эффективный способ кодирования данных, позволяющий стабилизировать характеристики восстановленных изображений и тем самым повысить достоверность считывания информации.

Рассмотрим физические аспекты влияния содержимого страницы данных на характеристики ее качества при восстановлении. Регистрация фурье-голограмм цифровых данных практически всегда осуществляется на нелинейном участке характеристической кривой фотоматериала. Это связано с тем, что при записи фурье-голограмм в ГЗУ при-

ходится идти на компромисс между достижением высокой дифракционной эффективности η голограммы и удовлетворительным качеством восстановленного изображения. В соответствии с этим нами выбран критерий оптимизации режима записи голограмм: достижение максимальными точками. Эти ложные изображения частично накладываются на истинные и могут приводить при считывании страницы данных к появлению ложных «1» и «0». Уровень нелинейности записи, определяющий интенсивность ложных изображений, существенно зависит от информационного содержания страниц данных. Кроме описанного эффекта, изменение информационного содержания является причиной флуктуации уровня дифракционного фона, что также приводит к нестабильности характеристик восстановленных изображений [4].

Нами проведены экспериментальные исследования влияния информационного содержания на характеристики качества восстановленных изображений страниц данных. Голограммы регистрировались с помощью устройства записи голограмм (УЗГ) [3] на голографических фотопластинках ПЭ-2, обработка осуществлялась в проявителе ГП-2 [5]. Для ввода информации использовался электрически управляемый цифровой транспарант на основе жидких кристаллов (ЭУЦТ) размерностью 32×32 бит [6]. Статистические характеристики двухградационных изображений измерялись в устройстве считывания голограмм (УСГ) [7] по методике, описанной в [8]. Определялись следующие характеристики восстановленных изображений: средняя удельная дифракционная эффективность одной оптической «1» $\eta_1 = \eta/N_1$, средний контраст $K = \bar{P}_1/\bar{P}_0$ и относительные среднеквадратические отклонения мощностей оптических «1» и «0» $\sigma'_{1,0} = \sigma_{1,0}/\bar{P}_{1,0}$, где $\bar{P}_{1,0}$, $\sigma_{1,0}$ — средние значения и среднеквадратические отклонения мощностей оптических «1» и «0».

Характеристики восстановленных изображений зависят от количества оптических «1» N_1 и конфигурации их размещения в странице. Чтобы исследовать раздельно влияние указанных факторов, сначала записывались матрицы голограмм тестовых страниц данных идентичной конфигурации (заполнение оптическими «1» различного количества строк при условии их равномерного распределения по площади страницы данных), но с различным значением N_1 и определялась зависимость характеристик восстановленных изображений от N_1 . На рис. 1 показаны зависимости η_1 и K от количества оптических «1» N_1 . Видно, что с увеличением N_1 от 160 до 830 происходит уменьшение значения $\eta_1 \sim \sim$ в 2 раза, $K \sim$ в 5 раз. Падение значения η_1 объясняется тем, что из-за нелинейности записи голограмм дифракционная эффективность η при увеличении N_1 изменяется нелинейным образом и растет медленнее, чем значение N_1 . Уменьшение значения K при увеличении N_1

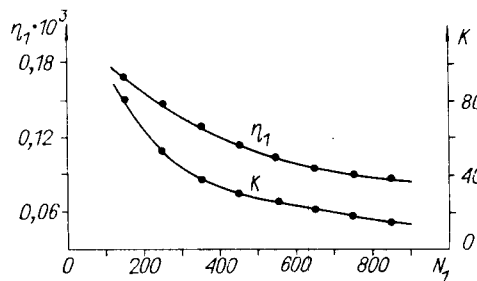


Рис. 1

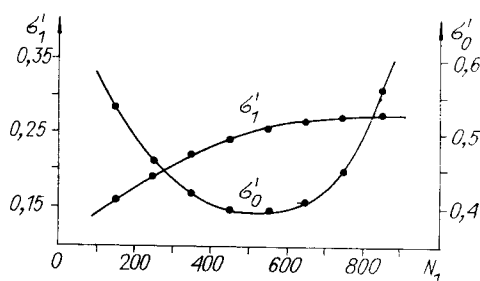


Рис. 2

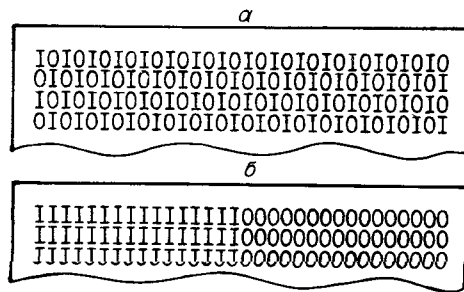


Рис. 3

к увеличению σ_1' . Влияние указанных причин на разброс мощности оптических «0» P_0 аналогично, но при увеличении N_1 количество оптических «0» N_0 уменьшается, что вызывает падение значения σ_0' . В то же время увеличение N_1 ведет к росту уровня нелинейности записи голограмм, что, в свою очередь, повышает разброс значений P_0 . При $N_1 > 500$ влияние нелинейности записи на разброс значений P_0 преобладает над уменьшением влияния неравномерности пропускания ячеек ЭУЦТ и мощности предметного пучка, в результате чего σ_0' увеличивается.

Для исследования влияния конфигурации размещения оптических «1» на характеристики восстановленных изображений записывались матрицы тестовых страниц данных с одинаковым количеством «1» N_1 , но различным размещением их в странице. На рис. 3 показаны фрагменты (четыре строки) трех типов тестовых страниц данных, которые позволяют наглядно продемонстрировать влияние дифракционного фона на характеристики восстановленных изображений. Записывались матрицы голограмм указанных страниц данных; измеренные характеристики восстановленных из них изображений приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что различие в конфигурации размещения оптических «1» и «0» оказывает наиболее сильное влияние на контраст K восстановленных изображений. Для страницы (рис. 3, а) каждый оптический «0» окружен четырьмя «1», поэтому уровень дифракционного фона максимальный, а значение K минимальное. Для другой страницы (рис. 3, б) уровень дифракционного фона меньше, а значение K выше, так как оптический «0» окружен только двумя близлежащими «1». Минимальный уровень дифракционного фона и максимальное значение K имеют место при пространственном разделении оптических «1» и «0» в странице (рис. 3, в). Значения η_1 , σ_1' слабо зависят от конфигурации размещения оптических «1» в странице. Для страницы, показанной на рис. 3, б, наблюдается увеличение значения σ_0' , что объясняется более сильным влиянием нелинейности записи на разброс мощностей P_0 для данной конфигурации «1» и «0».

Затем была проведена запись модулей голограмм различных типов информации (полутоновые изображения, текст, графика), закодированной в цифровом виде. Выявлено, что в страницах данных изменяются одновременно количество оптических «1» N_1 и конфигурация их размещения, причем диапазон изменения N_1 зависит от типа информации. Для полутоновых изображений (карты местности) количество оптических «1» N_1 изменяется в диапазоне 59—862, для текстовой информации — 304—497, для графической информации (структурные формулы химических соединений) — 222—310. Соответственно наибольший раз-

обусловлено снижением \bar{P}_1 и повышением \bar{P}_0 вследствие роста уровня нелинейности записи, а также увеличением уровней дифракционного фона и фона соседних голограмм. На рис. 2 приведены зависимости σ_1' , σ_0' от количества оптических «1» N_1 . Значение σ_1' при изменении N_1 от 160 скаккая ячеек ЭУЦТ и неравномерностью мощности предметного пучка, влияние которых при повышении N_1 растет, что приводит

Таблица 1

Страница данных	$\eta_1 \cdot 10^3$	K	σ'_1	σ'_0
Рис. 3, а	0,12	33	0,26	0,45
Рис. 3, б	0,11	56	0,24	0,62
Рис. 3, в	0,11	42	0,24	0,5

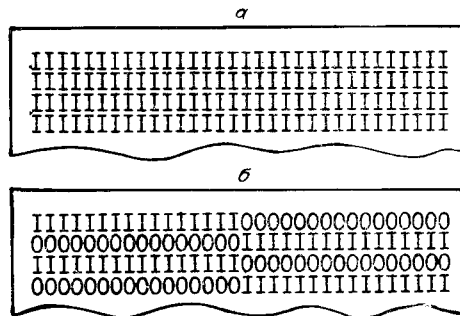


Рис. 4

брос характеристик восстановленных изображений наблюдался для полуповых изображений. Измеренные значения характеристик восстановленных изображений для страниц с одинаковым значением N_1 , но различной конфигурацией размещения «1» и «0» усреднялись. Зависимости усредненных характеристик от количества «1» N_1 имеют такой же вид, как для тестовых страниц данных (см. рис. 1, 2). Конфигурация размещения «1» и «0» наиболее сильно влияет на значения контраста K . Таким образом, для стабилизации характеристик восстановленных изображений при записи различных типов информации необходимо было разработать способ кодирования данных, позволяющий эффективно стабилизировать информационное содержание страниц данных.

Известно, что стабилизация информационного содержания страниц данных наиболее просто и эффективно достигается при парафазном способе кодирования информации, когда каждый бит кодируется двумя соседними информационными точками («1» кодируется набором 10, а «0» — 01) [9]. Основным недостатком парафазного способа кодирования является снижение емкости памяти в 2 раза. Компромиссный способ кодирования информации, предложенный в [10], состоит в том, что каждое n -разрядное двоичное слово, для которого $N_1 \leq n/2$, кодируется прямым двоичным кодом, а при $N_1 > n/2$ — инверсным кодом. Каждое слово снабжается признаком, который равен 1 при кодировании прямым кодом и 0 при кодировании инверсным кодом. Признаки кодируются двумя информационными точками, как при парафазном способе кодирования. Однако этот способ кодирования также имеет ряд недостатков: усложнение алгоритма и аппаратуры записи, считывания информации, снижение емкости памяти за счет неинформативных признаков слов. Кроме того, диапазон изменения N_1 остается достаточно большим: $0 \leq N_1 \leq N_c/2$, где N_c — количество информационных точек в странице данных. Эффективность стабилизации N_1 для этого способа кодирования информации особенно низка при записи информации с большим диапазоном изменения N_1 в исходных страницах данных.

Нами предложен, исследован и реализован новый способ кодирования данных в ГЗУ, заключающийся в регулярной инверсии информационных слов. Входная страница данных состоит из 32 строк, содержащих по два 16-разрядных слова [11]. Способ кодирования путем регулярной инверсии информационных слов заключается в том, что в нечетных строках первое слово записывается в прямом коде, второе — в инверсном, в четных строках — наоборот. На рис. 4 в качестве примера показаны фрагменты страницы данных, закодированной прямым двоичным кодом (а) и путем регулярной инверсии слов (б). Видно, что во втором случае каждое слово, записанное в прямом коде, граничит со словами в инверсном коде и наоборот. Предложенный способ кодирования информации позволяет стабилизировать количество оптических «1» и конфигурацию их размещения в странице, достаточно прост в реализации и не приводит к снижению емкости памяти.

Для оценки эффективности предложенного способа кодирования данных проведена запись модулей голограмм вышеперечисленных типов информации с использованием указанного способа. Измерены ха-

Таблица 2

Тип информации	Способ кодирования данных	$\bar{\eta}_1 \cdot 10^3$	$\bar{\omega}'_{\eta_1}$	\bar{K}	$\bar{\omega}'_K$	$\bar{\sigma}'_1$	$\bar{\omega}'_{\sigma_1}$	$\bar{\sigma}'_0$	$\bar{\omega}'_{\sigma_0}$	$N_{1\min} - N_{1\max}$
Полутоновые изображения (карта местности)	Прямой двоичный код	0,1	0,09	27	0,15	0,24	0,084	0,47	0,08	59—862
	Регулярная инверсия слов	0,11	0,026	22	0,026	0,21	0,027	0,39	0,03	478—542
Текстовая информация	Прямой двоичный код	0,12	0,048	24	0,038	0,2	0,039	0,52	0,03	304—497
	Регулярная инверсия слов	0,1	0,028	20	0,03	0,19	0,026	0,4	0,027	478—537
Графическая информация (структурные формулы химических соединений)	Прямой двоичный код	0,14	0,04	45	0,043	0,17	0,034	0,59	0,036	222—310
	Регулярная инверсия слов	0,11	0,027	23	0,028	0,19	0,025	0,38	0,029	487—530

характеристики восстановленных изображений страниц данных по массивам голограмм (~ 1000 голограмм). Для сравнения измерены аналогичные характеристики для модулей голограмм, записанных с использованием обычного способа кодирования (прямым двоичным кодом). Обработанные результаты измерений сведены в табл. 2, где $\bar{\eta}_1$, \bar{K} , $\bar{\sigma}'_1$, $\bar{\sigma}'_0$ — средние по массиву голограмм значения характеристик восстановленных изображений страниц данных; $\bar{\omega}'_{\eta_1}$, $\bar{\omega}'_K$, $\bar{\omega}'_{\sigma_1}$, $\bar{\omega}'_{\sigma_0}$ — относительные среднеквадратические отклонения указанных характеристик; $N_{1\min} - N_{1\max}$ — интервал изменения количества оптических «1» в страницах.

Видно, что регулярная инверсия слов значительно уменьшает диапазон изменения N_1 в страницах данных, например, для полутоновых изображений \sim в 13 раз. Эффективно стабилизируется и конфигурация размещения оптических «1» и «0». Это приводит к близким значениям характеристик восстановленных изображений для различных типов информации и к одинаковому диапазону их изменения по массиву голограмм, что позволяет существенно повысить достоверность считывания информации в ГЗУ.

Разброс характеристик восстановленных изображений страниц данных обусловлен изменением информационного содержания страниц и нестабильностью характеристик регистрирующей среды, ЭУЦТ, лазера и т. д. Чтобы выделить вклад перечисленных выше факторов, записывался массив голограмм с одинаковым информационным содержанием (тестовая страница типа «шахматное поле») и измерялись характеристики восстановленных изображений страниц данных. После обработки данных измерений получены следующие средние значения характеристик и их относительные среднеквадратические отклонения: $\bar{\eta}_1 = 0,11 \cdot 10^{-3}$; $\bar{\omega}'_{\eta_1} = 0,025$; $\bar{K} = 24$; $\bar{\omega}'_K = 0,02$; $\bar{\sigma}'_1 = 0,22$; $\bar{\omega}'_{\sigma_1} = 0,019$; $\bar{\sigma}'_0 = 0,42$; $\bar{\omega}'_{\sigma_0} = 0,018$. Поскольку два вида разброса характеристик изображений страниц данных, обусловленные нестабильностью информационного содержания и совокупностью вышеперечисленных факторов, являются независимыми, можно величину результирующего разброса представить как сумму двух независимых случайных величин, при этом

Т а б л и ц а 3

Тип информации	Способ кодирования данных	$\omega'_{\eta_1 x}$	ω'_{Kx}	$\omega'_{\sigma_1 x}$	$\omega'_{\sigma_0 x}$
Полутоновые изображения (карта местности)	Прямой двоичный код	0,086	0,148	0,082	0,078
	Регулярная инверсия слов	0,007	0,017	0,019	0,024
Текстовая информация	Прямой двоичный код	0,041	0,032	0,034	0,024
	Регулярная инверсия слов	0,013	0,022	0,018	0,02
Графическая информация (структурные формулы химических соединений)	Прямой двоичный код	0,031	0,038	0,028	0,031
	Регулярная инверсия слов	0,01	0,02	0,016	0,023

его относительная дисперсия равна сумме относительных дисперсий составляемых:

$$\bar{\omega}'^2 = \omega_x'^2 + \omega'^2, \quad (1)$$

где $\bar{\omega}'^2$ — общая относительная дисперсия характеристик изображений страниц данных; $\omega_x'^2$ — относительная дисперсия характеристик, обусловленная нестабильностью информационного содержания страниц; ω'^2 — относительная дисперсия, обусловленная совокупностью прочих факторов.

Используя имеющиеся значения $\bar{\omega}'$ для различных типов информации (см. табл. 2), ω' для массива голограмм с одинаковым информационным содержанием, из (1) можно определить значения ω_x' , обусловленные только флуктуациями информационного содержания страниц данных (табл. 3).

Из табл. 3 видно, что предложенный способ кодирования данных путем регулярной инверсии слов значительно уменьшает флуктуации характеристик голограмм, обусловленные нестабильностью информационного содержания страниц данных. Для полутоновых изображений флуктуации удельной дифракционной эффективности $\omega'_{\eta_1 x}$ уменьшаются \sim в 12 раз, контраста $\omega'_{Kx} \sim$ в 8,7 раза, относительного среднеквадратического отклонения мощности оптических «1» $\omega'_{\sigma_1 x} \sim$ в 4,3 раза, а оптических «0» $\omega'_{\sigma_0 x} \sim$ в 3,3 раза, для текстовой информации $\omega'_{\eta_1 x}$ уменьшается \sim в 3,2 раза, $\omega'_{Kx} \sim$ в 1,5 раза, $\omega'_{\sigma_1 x} \sim$ в 1,9 раза, $\omega'_{\sigma_0 x} \sim$ в 1,2 раза, для графической информации $\omega'_{\eta_1 x}$ уменьшается \sim в 3,4 раза, $\omega'_{Kx} \sim$ в 1,9 раза, $\omega'_{\sigma_1 x} \sim$ в 1,8 раза, $\omega'_{\sigma_0 x} \sim$ в 1,3 раза. Эффект стабилизации характеристик восстановленных изображений страниц данных тем сильнее, чем больше их разброс при обычном кодировании данных прямым двоичным кодом.

Заключение. Таким образом, в данной работе показано, что изменение информационного содержания страниц данных приводит к значительным флуктуациям характеристик голограмм. Например, при изменении количества оптических «1» от 160 до 830 происходит уменьшение удельной дифракционной эффективности $\eta_1 \sim$ в 2 раза, контраста $K \sim$ в 5 раз, увеличение относительного среднеквадратического отклонения

исследования, заключающиеся в том, что используются незначительно известные способы стабилизации информационного содержания страниц данных обладают существенными недостатками: парафазный способ кодирования снижает емкость памяти в 2 раза, а способ, описанный в [10], кроме снижения емкости памяти, усложнения алгоритма и аппаратуры записи, считывания информации, недостаточно эффективен при большом исходном разбросе информационного содержания страниц. Предложенный способ кодирования данных в ГЗУ, заключающийся в регулярной инверсии информационных слов, позволяет эффективно стабилизировать количество оптических «1» и конфигурацию их размещения в странице, достаточно прост в реализации и в отличие от известных способов не приводит к снижению емкости памяти. Проведенные экспериментальные исследования стабилизации характеристик голограмм при использовании описанного способа кодирования подтвердили его эффективность при записи различных типов информации (полутонные изображения, текст, графическая информация). Например, для полутонных изображений (карты местности) значение $\omega'_{\eta_1 x}$ уменьшается \sim в 12 раз, $\omega'_{kx} \sim$ в 8,7 раза, $\omega'_{\sigma_1 x} \sim$ в 4,3 раза, $\omega'_{\sigma_0 x} \sim$ в 3,3 раза. Данный способ кодирования информации был использован в архивном ГЗУ [7] и позволил существенно поднять уровень достоверности считывания информации.

Автор выражает благодарность В. А. Домбровскому, Е. Ф. Пену и Т. Н. Мантушу за полезные обсуждения статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sutherland K. K., Lauer J. P., Olenick R. W. Hologram: a commercial holographic ROM // Appl. Opt.— 1974.— 13, N 6.— P. 1345.
2. Inagaki T., Furucawa Y., Coto Y., Akimura T., Nishimura Y. Hologram writer using a plasma display panel // Appl. Opt.— 1974.— 13, N 4.— P. 819.
3. Блок А. А., Ванюшев Б. В., Волков А. В. и др. Устройство автоматической записи матриц голограмм цифровых данных // Автометрия.— 1984.— № 3.
4. Домбровский В. А., Домбровский С. А., Пен Е. Ф. Влияние дифракционных помех на качество восстановленных изображений в ГЗУ // Сб. тр. IV Всесоюз. конф. по голографии.— Ереван: ВНИИРИ, 1982.— Ч. 2.
5. Усанов Ю. Е. Влияние состава проявителя на свойства голографического изображения // Регистрирующие среды для голографии.— Л.: Наука, 1975.
6. Блок А. А., Гибин И. С., Гудова Г. И. и др. Разработка и исследование электроуправляемого транспаранта на основе жидких кристаллов // Труды IV Всесоюз. конф. по голографии.— Ереван: ВНИИРИ, 1982.— Ч. 2.
7. Ванюшев Б. В., Волков А. В., Гибин И. С. и др. Устройство хранения и считывания цифровых данных в голографической системе архивной памяти // Автометрия.— 1984.— № 3.
8. Домбровский В. А., Домбровский С. А. Исследование метода быстрого измерения статистических характеристик оптического изображения с помощью фотоматрицы // Тез. докл. II Всесоюз. конф. по радиооптике.— Тбилиси: ИК АН ГССР, 1985.
9. Вербовецкий А. А., Федоров В. Б. Запись на фазовые голограммы двоичной информации в парафазном коде // Оптика и спектроскопия.— 1972.— 33, вып. 6.
10. Акаев А. А., Майоров С. А., Смирнов Н. А. Об одном способе повышения помехозащищенности голографического запоминающего устройства // Помехи в цифровой технике.— Вильнюс, 1974.
11. Вьюхина Н. Н., Литвинцева А. П., Мантуш Т. Н. и др. Программные средства для исследований, отладки и тестирования ГЗУ // Автометрия.— 1984.— № 3.

Поступила в редакцию 15 февраля 1988 г.