

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я

2002, том 38, № 3

УДК 681.2 : 537.7 : 518.5

С. Б. Одиноков, Е. Е. Сальников
(Москва)

**ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА РАДУЖНЫХ
ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ
МОДУЛЯЦИОННОЙ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ**

Предложена методика оценки качества голографического изображения субъективными методами и интегрального критерия качества, основанного на совокупном отклике зрительного анализатора. Разработана схема измерения модуляционной передаточной функции изображения, восстановленного с радужной голограммы. При сравнении модуляционной передаточной функции с визуальными качественными характеристиками проверяется соответствие объективных измерений субъективному восприятию человека-наблюдателя.

Введение. Известно, что радужные голограммы используются для защиты товаров от несанкционированного копирования. Улучшение качества выполнения радужных голограмм соответственно повышает защищенность маркируемых ими изделий. Однако в большинстве случаев радужные голограммы, выполненные на простом уровне, но с высоким качеством, уже сами по себе могут служить защитой соответствующего товара. В основе методики оценки качества радужных голограмм, предназначенных для зрительного восприятия, должны лежать субъективные методы оценки качества. Однако эти методы предполагают участие большого количества людей и большого объема экспериментальных исследований. Для оперативной оценки качества изображения, необходимой при отработке технологии изготовления систем, формирующих изображение, следует применять объективные методы, которые должны применяться только после тщательной проверки соответствия их результатов субъективным оценкам.

В данной работе проведено сравнение интегральных критериев качества, полученных субъективным и объективным методами, на основе которого сделаны выводы о пригодности разработанной методики для объективного контроля качества голографических изображений.

Методика получения качественных характеристик. Для оценки объемного восприятия голографического изображения разработан тест-объект, представляющий собой расположенные на различных расстояниях от голограммы тест-таблицы с периодом $\Delta z = 3$ мм по глубине голографируемого пространства в виде ступеней (рис. 1). Каждая плоская тест-таблица пред-

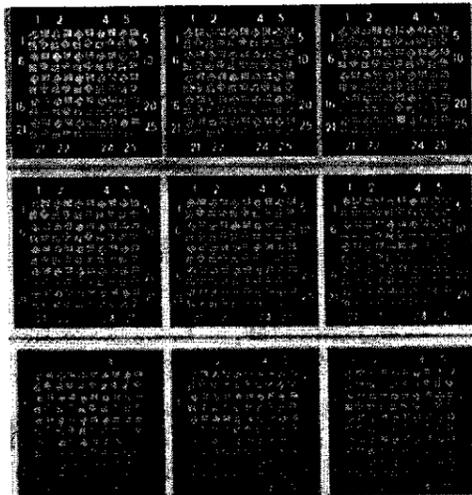


Рис. 1. Тест-объект

ставляет собой набор П-образных мис с частотами $\nu = 1; 2; 3; 4; 5 \text{ мм}^{-1}$ различного контраста ($K = 1; 0,75; 0,5$). Такие тест-таблицы располагались на каждой ступени.

Указанный набор пространственных частот выбран в соответствии с пространственно-частотной характеристикой зрительного анализатора [1].

С тест-объекта были изготовлены 12 голограмм по схеме рис. 2 на серийном фоторезисте двух различных партий. Пластины экспонировались излучением He-Cd-лазера в течение 2 мин. Проявление осуществлялось в растворе гидроксида калия (KOH) при различных режимах обработки (табл. 1).

Все 12 голограмм, а также непосредственно тест-объект были предъявлены экспертам-наблюдателям. Исследования проводились с участием десяти наблюдателей, которые оценивали качество изображения по шкале категорий с последующим переводом в шкалу отношений (табл. 2).

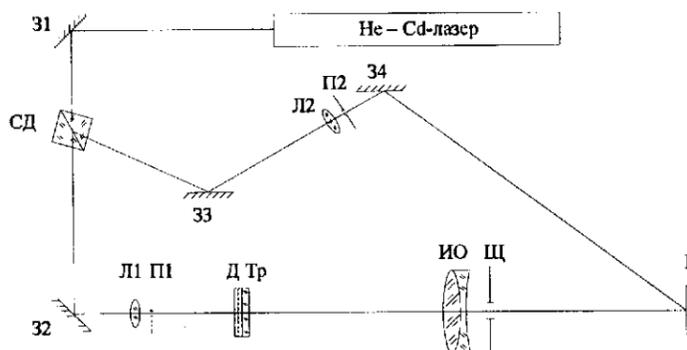


Рис. 2. Одноэтапная схема получения радужных голограмм [2]: 31–34 – зеркала; СД – светоделитель; Л1, Л2 – расширительные линзы; П1, П2 – точечные диафрагмы; Д – диффузор; Тр – транспарант; ИО – изображающий объектив; Щ – щелевая диафрагма; Г – голограмма

Таблица 1

Номер голограммы	Номер партии	Время обработки, с
1	654	7
2	654	7
3	654	7
4	654	9
5	654	9
6	654	9
7	659	7
8	659	7
9	659	7
10	659	9
11	659	9
12	659	9

Таблица 2

Шкала категорий	Шкала отношений
Отличное	1,00
Почти отличное	0,95
Хорошее	0,85
Почти хорошее	0,75
Удовлетворительное	0,60
Почти удовлетворительное	0,40
Плохое	0,20
Очень плохое	0

Восстановление голографического изображения осуществлялось в белом свете (применялся диапроектор «Витязь» с галогенной лампой КГМ-150). Угол наклона восстанавливающего пучка выбирался наблюдателем субъективно, чтобы качество изображения было наилучшим с точки зрения эксперта. Результаты экспериментов обрабатывались по общепринятым методикам [3, 4]. В качестве примера в табл. 3 приведены экспериментальные оценки, с помощью которых была получена одна субъективная характеристика (голограмма 1, $z_x = 3$ мм, $K = 1$); A_k – оценка по шкале категорий, A_o – оценка по шкале отношений.

Таким образом, были получены качественные характеристики, оценивающие восприятие пространственной частоты для различных плоскостей изображения при различных контрастах. Полученные в результате экспериментов характеристики приведены на рис. 3. Все представленные характеристики относятся к голограмме 1. Для остальных голограмм и самого тест-объекта были получены аналогичные характеристики.

Средняя оценка вычислялась по формуле

$$A(v) = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} A_{oi} \quad (1)$$

Для того чтобы на основе имеющихся субъективных характеристик получить интегральный критерий качества голографического изображения, необходимо определить весовые коэффициенты, которые учитывают важность каждого из оцениваемых свойств изображения, причем величины коэффициентов нормируются путем наложения условия

$$\sum_{j=1}^{imn} k_j = 1, \quad (2)$$

Таблица 3

Эксперты	Пространственная частота, мм ⁻¹									
	v=1		v=2		v=3		v=4		v=5	
	2	5	1	5	1	5	1	3	0,6	2
3	5	1	5	1	5-	0,95	3-	0,4	2	0,2
4	5	1	5	1	5	1	3	0,6	3-	0,4
5	5	1	5	1	4	0,85	3-	0,4	1	0
6	5	1	5	1	5-	0,95	3-	0,4	2	0,2
7	5	1	5	1	5	1	3	0,6	2	0,2
8	5	1	5	1	5	1	3-	0,4	2	0,2
9	5	1	5	1	4	0,85	3-	0,4	2	0,2
10	5	1	5	1	5	1	3	0,6	2	0,2
Средняя оценка $A(v)$	1		1		0,96		0,5		0,2	

где j – общее число экспертных оценок для данного голографического изображения; i – число различных пространственных частот на тест-таблице; n – число различных контрастов; m – число исследованных плоскостей тест-объекта.

В данном случае все оцениваемые свойства голографического изображения связаны между собой и поэтому весовые коэффициенты могут быть при-

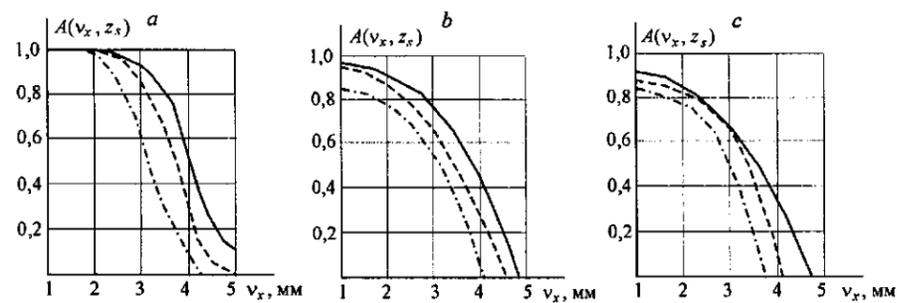


Рис. 3. Характеристики качества голограммы 1, полученные с помощью субъективного метода: $K = 1$ (а); $0,75$ (б); $0,5$ (с). ($z_s = 3$ мм (сплошные кривые), 6 мм (штриховые), 9 мм (штрихпунктирные))

$$Q = \frac{1}{imn} \sum_{j=1}^{imn} A_{imn}(v). \quad (4)$$

В табл. 4 приведены значения Q для двенадцати исследованных голограмм и тест-объекта. По вычисленным критериям можно сделать вывод, что лучшее качество изображения в данном случае дает голограмма 1. Для достижения лучшего качества изображения на фоторезисте различных партий необходимо для партии № 654 производить проявление в течение 7 с и в течение 9 с для партии № 659 в растворе КОН. Для большей наглядности можно использовать относительный критерий качества, который определяется отношением показателя Q голограммы к Q тест-объекта. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что данный критерий можно успешно использовать для оценки качества голографического изображения при обработке технологии изготовления голограмм. Однако объем экспериментальных исследований при этом достаточно велик.

Для оперативной оценки качества голографического изображения, необходимой при подборе оптимальных технологических режимов изготовления изобразительных голограмм, целесообразно использовать объективные методы.

Методика измерения модуляционной передаточной функции. На рис. 4 приведена функциональная схема устройства, предназначенного для оценки качества восстановленного с радужной голограммы изображения тест-объекта, с помощью которого измеряется модуляционная передаточная функция. Устройство состоит из осветителя 1, голограммы 3, проекционного объектива 4, светофильтров 5, анализирующего элемента 6, приемника излучения 7, электронного блока 8, электроизмерительного прибора 9, откидного зеркала 10, окуляра 11. Глаз оператора – 12.

Изображение тест-объекта 2, формируемое радужной голограммой 3, проецируется объективом 4 в плоскость анализирующего элемента 6, который представляет собой щель, перемещающуюся с постоянной скоростью в плоскости изображения для последовательного измерения освещенности в изображении. Приемник излучения 7 осуществляет преобразование световой энергии в электрическую. Электрический сигнал усиливается и фильтруется электронной схемой 8 и регистрируется с помощью измерительного прибора 9. Светофильтры предназначены для коррекции спектральной чувствительности приемника излучения под пространственно-частотную характеристику глаза.

Таблица 4

Номер голограммы	Q
1	0,491
2	0,315
3	0,292
4	0,432
5	0,381
6	0,295
7	0,324
8	0,343
9	0,287
10	0,314
11	0,452
12	0,302
Тест-объект	0,613

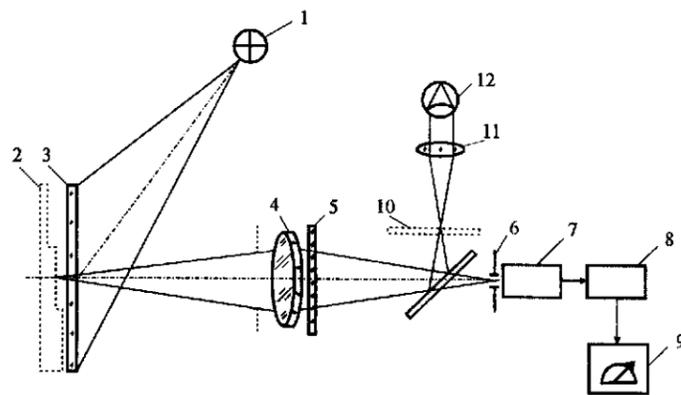


Рис. 4. Функциональная схема опико-электронного прибора, предназначенного для измерения модуляционной передаточной функции радужной голограммы

С помощью этого прибора исследованы те же голограммы и тест-объект, которые были оценены субъективным методом. При этом измерялся контраст в изображении П-образных мр разных пространственных частот в различных плоскостях объемного изображения тест-объекта. Измерения производились путем сканирования изображения тест-объекта анализирующим элементом 6, который представлял собой щель переменной ширины. Ширина щели изменялась от 0,17 до 0,21мм с шагом 0,01мм.

Восстановление изображения осуществлялось тем же источником света, с помощью которого получены качественные характеристики субъективным методом. Угол падения пучка света от восстанавливающего источника равнялся углу падения опорной волны на голограмму при ее получении ($\sim 30^\circ$). При этом контролировалась освещенность, созданная восстанавливающим источником света в плоскости голограммы (70 лк) [5]. При измерении использовался привод точного (микрометрического) перемещения сканирующей щели анализирующего элемента 6. Интересующие пространственные частоты выделялись последовательным наведением окуляра 11. По результатам измерений были построены графики, аналогичные сенсорным характеристикам рис. 3 для всех двенадцати голограмм и исходного тест-объекта, отдельно для анализирующих элементов различной ширины. На рис. 5 приве-

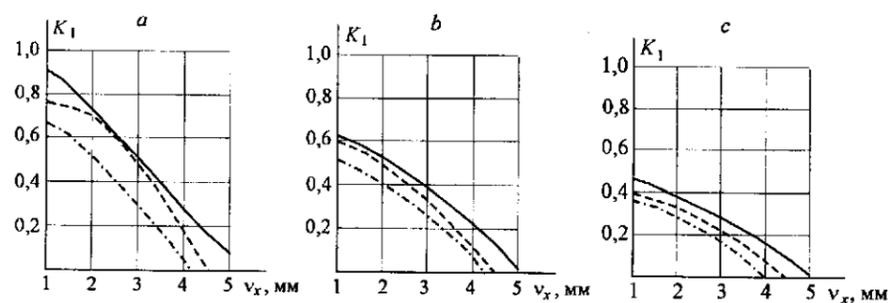


Рис. 5. Модуляционные передаточные функции для голограммы 1, полученные с помощью объективного метода (при ширине щели 0,2мм). Остальные обозначения такие, как на рис. 3

дены зависимости $K(\nu)$ для голограммы 1 при ширине щели $b = 0,20$ мм.

На основе измерений, полученных объективным методом, был рассчитан интегральный критерий качества для каждой голограммы и тест-объекта по формуле

$$q = \frac{1}{imn} \sum_{j=1}^{imn} k_{imn}(\nu). \quad (5)$$

В табл. 5 приведены значения интегрального критерия качества для голограмм 1–12 и тест-объекта по результатам объективных измерений.

Результаты сравнения значений критерия качества, рассчитанного на основе субъективных данных и результатов измерений с помощью прибора, показаны на рис. 6. На графике величины объективного и субъективного критериев выражены в относительных единицах, причем значения критериев нормированы к значениям соответствующих интегральных критериев тест-объекта, т. е. $Q^* = Q/Q_{ТО}$, $q^* = q/q_{ТО}$.

Таблица 5

Номер голограммы	$b = 0,17$		$b = 0,18$		$b = 0,19$		$b = 0,20$		$b = 0,21$	
	q	q^*								
1	0,344	0,6	0,349	0,62	0,36	0,69	0,358	0,72	0,265	0,65
2	0,212	0,37	0,252	0,45	0,245	0,47	0,214	0,43	0,187	0,41
3	0,195	0,34	0,202	0,36	0,224	0,43	0,204	0,41	0,173	0,38
4	0,298	0,52	0,314	0,56	0,298	0,57	0,304	0,61	0,246	0,54
5	0,258	0,45	0,309	0,55	0,277	0,53	0,294	0,59	0,228	0,5
6	0,195	0,34	0,231	0,41	0,235	0,45	0,209	0,42	0,173	0,38
7	0,229	0,4	0,285	0,51	0,251	0,48	0,239	0,48	0,205	0,45
8	0,246	0,43	0,297	0,53	0,266	0,51	0,249	0,5	0,209	0,46
9	0,183	0,32	0,196	0,35	0,209	0,4	0,194	0,39	0,168	0,37
10	0,223	0,39	0,274	0,49	0,251	0,48	0,229	0,46	0,228	0,44
11	0,304	0,53	0,316	0,56	0,318	0,61	0,319	0,64	0,23	0,55
12	0,206	0,36	0,241	0,43	0,235	0,45	0,214	0,43	0,182	0,4
Тест-объект	0,573	1,0	0,561	1,0	0,522	1,0	0,498	1,0	0,455	1,0

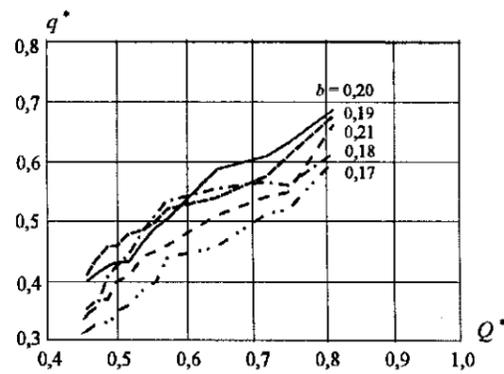


Рис. 6. Графики зависимостей интегральных критериев качества, полученные с помощью субъективного и объективного методов

Из графиков на рис. 6 видно, что, хотя зависимость $q(Q)$ и не является линейной, большему значению объективной оценки качества соответствует большее значение субъективной оценки, т. е. искомая зависимость монотонная. Следовательно, с помощью интегрального критерия качества голографического изображения, полученного объективным методом, можно однозначно судить о качестве изображения с точки зрения наблюдателя, так как лучшему качеству по Q соответствует большая величина q .

Сравнение зависимостей $q^*(Q^*)$ для различных значений ширины анализирующего элемента показывает, что при ширине щели $b = 0,20$ характер зависимости $q^*(Q^*)$ наиболее близок к линейному. Этот факт иллюстрируется рис. 7, на котором представлена зависимость среднеквадратичной погрешности измерения, вычисляемой по формуле

$$S = \sqrt{\sum_1^N (q - Q)^2 / N(N - 1)}, \quad (6)$$

от ширины щели (здесь N – число исследованных голограмм). Поэтому в дальнейшем при оценке качества голографического изображения, восстановленного с радужной голограммы, лучше использовать именно этот анализирующий элемент.

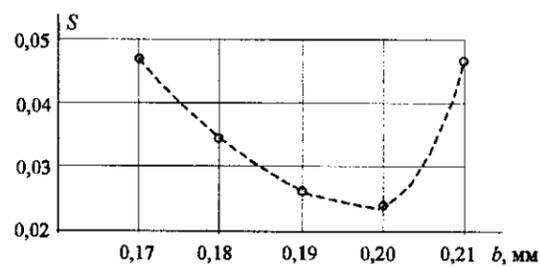


Рис. 7. График зависимости среднеквадратичной погрешности измерения от ширины анализирующего элемента

Заключение. Разработан объемный тест-объект для исследования и оценки качества голографического изображения объективным и субъективным методами. Предложена методика оценки качества голографического изображения субъективным методом с помощью интегрального критерия качества. Такая методика позволяет оценить качество изображения адекватно субъективному восприятию. На спроектированной установке проведены экспериментальные исследования по объективной оценке качества голографического изображения и проверено их соответствие субъективным оценкам, что подтвердило правомочность использования объективных методов оценки качества радужных голограмм. Использование разработанного прибора позволяет сократить время и упростить отработку технологического процесса изготовления высококачественных радужных голограмм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Одинокое С. Б., Сальников Е. Е., Лушников Д. Л.** Определение МПФ одноэтапной радужной голограммы // Сб. тр. междунар. конф. «Прикладная оптика-2000». С.-Пб: ГОИ им. С. И. Вавилова, 2000. Т. 1. С. 108.
2. **Chen H., Yu F. T. S.** One-step rainbow hologram // Opt. Lett. 1978. 17, N 21. P. 3343.
3. **Азгальдов Г. Г., Райхман Э. П.** О квалитометрии. М: Изд-во стандартов, 1973.
4. **Гребеников О. Ф.** Основы записи и воспроизведения изображения. М: Искусство, 1932.
5. **Марков В. Б., Народетский Р. М., Полонский И. З.** Осветительное устройство УОГ для восстановления голографического изображения // Прикладная голография: Тез. респ. семинара. Киев: Наук. думка, 1984.

*Московский государственный
технический университет им. Н. Э. Баумана,
E-mail: odinokov@r12.bmstu.ru*

*Поступила в редакцию
19 июня 2001 г.*