

## ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНЫХ И ФАЗОВЫХ ГОЛОГРАММ ДИФФУЗНЫХ ОБЪЕКТОВ

*В. И. Локшин, Г. Б. Семенов и А. Ф. Кавтреев*

Проведены экспериментальные исследования дифракционной эффективности и отношения сигнала к шуму для амплитудных и фазовых двумерных голограмм диффузных объектов. Получены количественные данные, характеризующие влияние типа материала, величины экспозиции и способа обработки фотослоев на основные характеристики голограмм, зарегистрированных на фотоматериалах Микрат ВРЛ, СРБШ и на усовершенствованных слоях Валента [3].

Решение целого ряда практических задач с использованием голографического метода получения изображения во многих случаях связано с регистрацией голограмм диффузных объектов. При исследовании свойств таких голограмм весьма большой интерес представляют параметры, определяющие яркость и отношение сигнала к шуму в восстановленном изображении. Среди основных факторов, влияющих на величину этих параметров, следует отметить: тип фотоматериала, условия регистрации голограммы (выбор рабочей точки на характеристике фотоматериала, соотношение интенсивностей объектного и референтного пучков, пространственная частота записи, толщина фоточувствительного слоя и т. д.) и условия последующей обработки фотоматериала.

В существующей литературе вопрос о дифракционной эффективности и отношении сигнала к шуму амплитудных и фазовых голограмм диффузных объектов уже обсуждался. В частности, Упатниекс и Леонард [1] показали теоретически, что шум, возникающий в изображении диффузных объектов для случая фазовой голографической записи, обусловлен главным образом взаимной интерференцией точек объекта. Вельзель [2] провел теоретический анализ дифракционной эффективности и отношения сигнала к шуму в изображении диффузных объектов с учетом нелинейного характера регистрации голограмм. В упомянутых работах приводятся также результаты экспериментальных исследований дифракционной эффективности и отношения сигнала к шуму в изображении для голограмм, зарегистрированных на фотоматериалах Kodak 649 F и Agfa Gevaert.

Настоящая статья посвящена исследованию дифракционной эффективности голограмм и отношения сигнала к шуму в восстановленном изображении для амплитудных и фазовых двумерных голограмм, зарегистрированных на фотоматериалах Микрат ВРЛ, СРБШ, и на усовершенствованном слое Валента [3]. Нами были исследованы зависимости названных выше параметров при различных соотношениях интенсивностей объектного и референтного пучков и при разных величинах экспозиции в процессе записи голограмм.

### Методика исследований

Регистрация голограмм диффузных объектов осуществлялась по обычной двухлучевой схеме (рис. 1). Излучение когерентного источника  $I$  ( $\lambda=6328 \text{ \AA}$ ) делилось на два пучка с помощью светоделительной пластины

2. Часть пучка, отраженная от пластины 2, с помощью зеркала 3 направлялась в микрообъектив 4 и использовалась затем для освещения объекта. В качестве объекта 5 использовалось матовое стекло с непрозрачной полоской 6 шириной 2 мм. Размер освещенной области матового стекла ограничивался диафрагмой 7 диаметром 12 мм. Другая часть пучка, проходящая сквозь пластинку 2, расширялась с помощью телескопической системы, состоящей из линз 8 и 9, и использовалась в качестве референтного пучка при регистрации голограммы 10 на фотопластинке 11. Диафрагмы 12 и 13, расположенные соответственно в фокальных плоскостях микрообъектива 4 и линзы 8, осуществляют фильтрацию рассеянного и многократно отраженного в оптических элементах света. Угол между объектным и референтным пучками составлял  $10^\circ$ , расстояние от плоскости фотопластинки 11 до поверхности матового стекла 5 равнялось 250 мм. Диаметр регистрируемой голограммы 10 ограничивался до 8 мм с помощью диафрагмы 14. При указанных параметрах схемы регистрации обеспечивалось равномерное освещение матового стекла 5 в пределах диафрагмы 6.

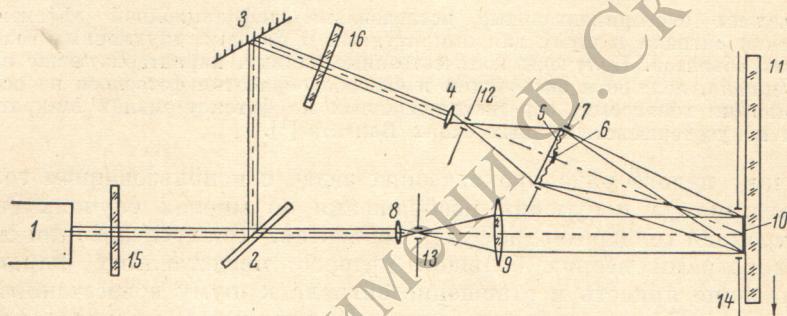


Рис. 1. Схема установки для регистрации голограмм.

Для исследования зависимости характеристик голограммы от величины экспозиции на различные участки фотопластинки регистрировались последовательно во времени 11 голограмм. Величина экспозиции при регистрации каждой из последующих голограмм изменялась с помощью нейтральных фильтров 15, а время экспонирования сохранялось постоянным. Сменные фильтры 16, установленные в объектном пучке, позволяли изменять соотношение интенсивностей референтного и объектного пучков. Для получения характеристической кривой фотоматериала на каждую из фотопластинок помимо голограмм впечатывался сенситометрический клин. Экспонированные таким образом фотопластинки проявлялись в проявителе Д-19. Время проявления для слоев Микрат-ВРЛ и СРВШ в соответствии с рекомендациями заводов-изготовителей составляло соответственно 5 и 4 мин. Усовершенствованные слои Валента проявлялись в том же проявителе в течение 3 мин. Все голограммы после проявления и промывки фиксировались в кислом дубящем фиксаже.

Измерения дифракционной эффективности голограмм осуществлялись с помощью установки, схема которой представлена на рис. 2. Здесь излучение когерентного источника 1 преобразовывалось с помощью оптической системы, состоящей из линз 2 и 3, в параллельный пучок лучей диаметром 8 мм и направлялось на одну из голограмм, зарегистрированных на фотопластинке 5. Линза 6 проецировала плоскость фотопластинки 5 на фотокатод 9 ФЭУ-51. При этом излучение, дифрагированное в первый порядок дифракции голограммы (пучок II на рис. 2), а также нулевая составляющая дифракции (I) попадали на один и тот же участок фотокатода ФЭУ. Заслонка 7 позволяла поочередно перекрывать упомянутые выше пучки I и II. Диафрагма 4 исключала возможность прохождения излучения через неэкспонированные участки фотопластинки 5, а сменные нейтральные фильтры 8 обеспечивали режим измерения на линейном участке световой характеристики ФЭУ.

Дифракционная эффективность измерялась как отношение величины потока, распространяющегося в первый порядок дифракции голограммы к величине падающего на голограмму потока. С помощью установки, представленной на рис. 2, измерялась также и оптическая плотность голограмм.

Для измерения отношения сигнала к шуму восстанавливалось действительное изображение диффузного объекта, которое представляло собой светящийся кружок диаметром 12 мм с темной полосой шириной 2 мм, проходящей через центр кружка. В плоскость сфокусированного

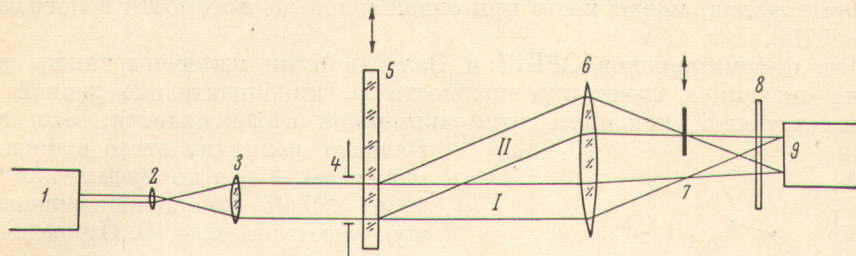


Рис. 2. Схема установки для измерения дифракционной эффективности голограмм.

изображения устанавливали щелевую диафрагму размером  $0.4 \times 5$  мм, которая ориентировалась параллельно краям темной полоски и могла перемещаться в плоскости изображения.

Отношение сигнала к шуму определялось с помощью следующей формулы:

$$C/\Pi = \frac{(\Phi_c - \Phi_t)}{\Phi_t},$$

где  $\Phi_c$  и  $\Phi_t$  — величины потоков, попадающих в пределы щелевой диафрагмы, установленной в светлой и темной областях изображения соответственно. Подобная оценка отношения сигнал/шум, хотя и не является достаточно строгой, тем не менее позволяла сравнить голограммы, зарегистрированные на различных фотоматериалах, а также установить влияние условий обработки фотоматериала на качество восстановленного изображения.

### Экспериментальные результаты

Экспериментальные результаты представлены на рис. 3—7.

На рис. 3 приведены кривые зависимости дифракционной эффективности амплитудных голограмм диффузного объекта от плотности голограммы для нескольких соотношений интенсивностей объектного и референтного пучков. Голограммы были зарегистрированы на усовершенствованном фотослое Валента. Как видно из рис. 3, максимальное значение дифракционной эффективности имеет место при соотношении интенсивностей упомянутых выше пучков, равном 1:5. Следует отметить, что в случае голограмм недиффузных объектов (например, голографических синусоидальных решеток) наибольшая дифракционная эффективность достигается при соотношении пучков 1:1. Такое отличие можно объяснить тем, что при регистрации голограммы диффузного объекта интенсивность рассеянного им излучения в плоскости записи голограммы существенно изменяется от точки к точке. Поэтому даже в том случае, когда средние величины интенсивностей объектного и референтного пучков равны, в отдельных точках голограммы интенсивность объектного пучка оказывается заметно выше. В результате ухудшается контраст регистрируемой на фотопластинке интерференционной картины и как следствие снижается дифракционная эффективность голограммы. Для повышения дифракционной эффективности в случае голограмм диффузных объектов целесообразно

увеличивать интенсивность референтного пучка по сравнению со средней интенсивностью объектного пучка (рис. 3).

На рис. 4 приведены кривые зависимости дифракционной эффективности амплитудных голограмм диффузных объектов от плотности голограммы для фотоматериалов Микрат ВРЛ, СРБШ и усвоенного Валента. При регистрации голограмм соотношение интенсивностей объектного и референтного пучков в соответствии с рис. 3 было выбрано равным 1 : 5. Отметим, что максимальные значения дифракционной эффективности для голограмм, зарегистрированных на упомянутых типах фотоматериалов, имеют место при одной и той же плотности голограммы, равной 0.8.

Для фотоматериалов СРБШ и Валента были измерены также отношения сигнала к шуму при плотности  $D$ , приблизительно равной 0.8, соответствующей максимуму дифракционной эффективности. Для слоя Валента величина этого отношения равнялась 20, в то время как для слоя СРБШ отношение сигнала к шуму не превышало 10. Приведенные

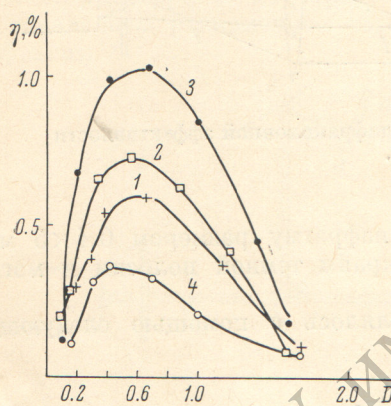


Рис. 3. Зависимость дифракционной эффективности ( $\eta$ ) амплитудных голограмм от плотности  $D$  для различных соотношений интенсивностей объектного и референтного пучков.

1 — 1 : 2, 2 — 1 : 3, 3 — 1 : 5, 4 — 1 : 10.

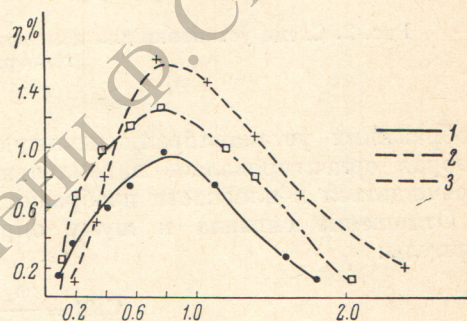


Рис. 4. Зависимость дифракционной эффективности ( $\eta$ ) амплитудных голограмм от плотности  $D$  для различных типов фотоматериалов.

1 — Валента, 2 — Микрат ВРЛ, 3 — СРБШ.

результаты были получены при следующих режимах обработки фотоматериалов. Микрат ВРЛ проявлялся в проявителе Д-19 при 20° С в течение 5 мин., СРБШ и Валента — в том же проявителе в течение 4 и 3 мин. соответственно.

На рис. 5 и 6 приведены кривые зависимости дифракционной эффективности и отношения сигнала к шуму фазовых голограмм диффузных объектов от плотности голограмм до отбеливания. Зависимости на рис. 5 относятся к голограммам, полученным путем отбеливания амплитудных голограмм в отбеливателе на основе красной кровяной соли [4].

Красная кровяная соль — 7 г  
Бромистый калий — 8 г  
Дистиллированная вода — 1 л

На рис. 6 приведены аналогичные зависимости для фазовых голограмм, полученных с использованием отбеливателя R-10 [4]:

Раствор А

Бихромат аммония — 20 г  
Концентрированная серная кислота — 14 мл  
Дистиллированная вода — 1 л.

Раствор Б

Хлористый натрий — 45 г  
Дистиллированная вода — 1 л.

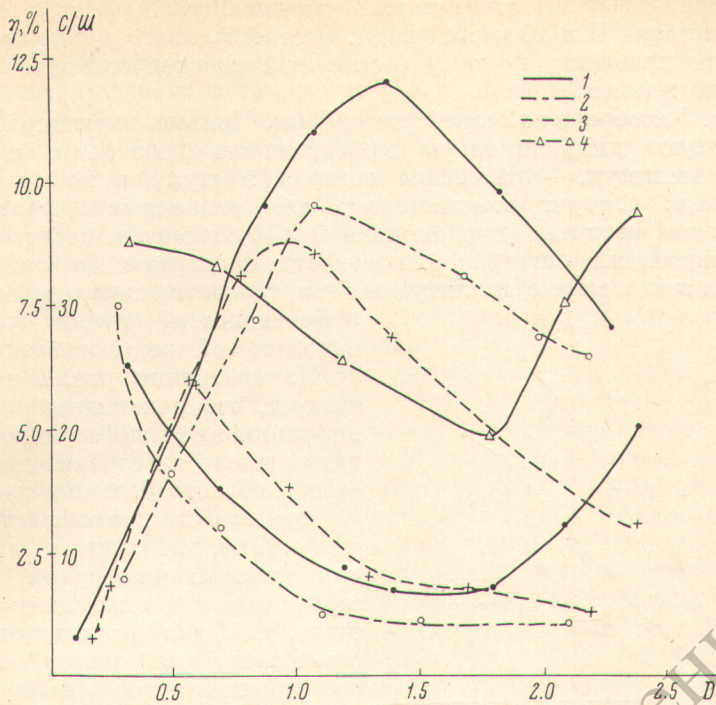


Рис. 5. Зависимости дифракционной эффективности ( $\eta$ ) и отношения сигнала к шуму ( $c/m$ ) фазовых голограмм диффузного объекта, полученных с использованием отбеливателя на основе красной кровяной соли, от плотности голограмм до отбеливания. 1 — Валента, 2 — Микрат ВРЛ, 3 — СРВШ, 4 — голограмма на слое Валента, помещенная при реконструкции в диметилфталат.

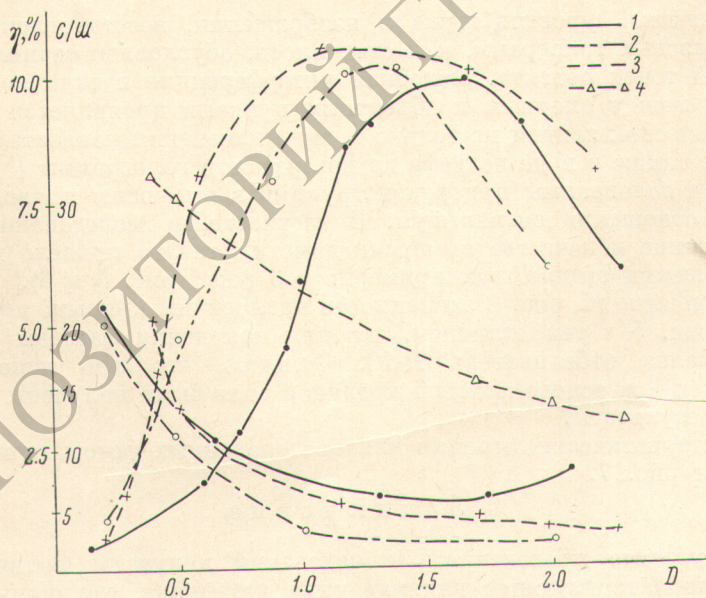


Рис. 6. Зависимость дифракционной эффективности ( $\eta$ ) и отношения сигнала к шуму ( $c/m$ ) фазовых голограмм диффузного объекта, полученных с использованием отбеливателя  $R=10$ , от плотности голограмм до отбеливания. 1 — Валента, 2 — Микрат ВРЛ, 3 — СРВШ, 4 — голограммы на слое СРВШ в иммерсии (диметилфталат).

Для приготовления отбеливателя смешивались 1 часть раствора А, 1 часть раствора Б и 10 частей воды. Этот отбеливатель разлагается при длительном хранении, поэтому составлять его следует непосредственно перед отбеливанием.

На рис. 5 изображено 2 семейства кривых. Кривые, имеющие максимум, характеризуют дифракционную эффективность голограмм, а кривые, имеющие минимум, — отношение сигнала к шуму в восстановленном изображении. Следует отметить, что для различных фотоматериалов максимальная величина дифракционной эффективности достигается при разных значениях оптической плотности голограмм до отбеливания, в то время как в случае амплитудных голограмм максимальные величины

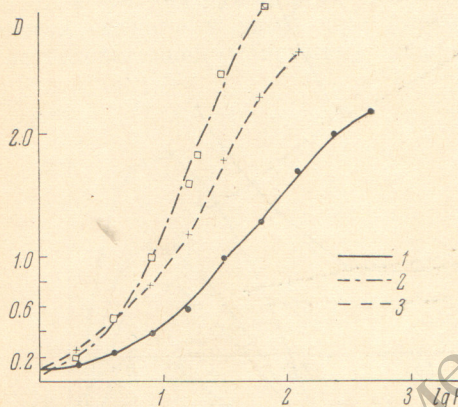


Рис. 7. Характеристические кривые для фотоматериалов.

1 — Валента, 2 — Микрат ВРЛ, 3 — СРБШ.

сигнал/шум также при максимальной эффективности по крайней мере в 2 раза хуже.

Повышенный уровень шума в изображении, восстановленном с помощью фазовых голограмм, как отмечалось, обусловлен взаимной интерференцией точек объекта. Подобная интерференция в отличие от интерференции между опорным и объектным пучками проявляется в фазовой голографической записи не только в виде изменения показателя преломления, но также в виде рельефа на поверхности голограммы [5]. Поэтому помещение голограммы при реконструкции в иммерсию приводит к увеличению отношения сигнал/шум. В частности, в исследованном случае использование в качестве иммерсии диметилфталата привело к увеличению отношения сигнал/шум примерно в 3 раза (рис. 5 и 6).

Приведенные на рис. 6 зависимости аналогичны кривым, представленным на рис. 5 с тем отличием, что для получения фазовых голограмм использовался отбеливатель R-10. Отметим, что при использовании отбеливателя на основе красной кровяной соли были получены несколько лучшие результаты.

Характеристические кривые для исследованных фотоматериалов приведены на рис. 7.

### З а к л ю ч е н и е

В результате проведенных исследований получены количественные данные, характеризующие влияние типа материала, величины экспозиции и способа обработки фотослоя на дифракционную эффективность и отношение сигнала к шуму амплитудных и фазовых двухмерных голограмм диффузных объектов.

Установлено, что при регистрации амплитудных голограмм наиболее яркие изображения могут быть получены с помощью голограмм, зарегистрированных на слоях СРБШ ( $\eta=1.5\%$ ). Слои Валента, хотя и уступают по дифракционной эффективности СРБШ приблизительно в 2 раза,

однако характеризуются вдвое более высоким отношением сигнал/шум. Для получения амплитудных голограмм с максимальной величиной дифракционной эффективности на любом из исследованных слоев необходимо экспонировать фотоматериал до средней плотности  $D \approx 0.8$ .

В отличие от амплитудных голограмм максимальные величины дифракционных эффективностей фазовых голограмм для различных материалов достигаются при разных значениях средней плотности голограммы до отбеливания. Так, для исследованных фотоматериалов и использованных отбеливателей величины средних плотностей, соответствующих максимуму дифракционной эффективности, изменялись от 1.0 до 1.6. При этом наибольшее значение дифракционной эффективности фазовой голограммы 12% было получено на слое Валента с использованием отбеливателя на основе красной кровяной соли.

Необходимо отметить, что изображения, восстановленные с помощью фазовых голограмм диффузных объектов, характеризуются низким по сравнению с амплитудными голограммами отношением сигнала к шуму. Так, наибольшее отношение сигнал/шум, соответствующее максимальной величине эффективности, не превышало 10 для всех исследованных слоев.

Эффективным способом увеличения отношения сигнала к шуму фазовых голограмм является использование иммерсии при реконструкции, за счет чего можно повысить отношение сигнала к шуму примерно в 3 раза без существенного уменьшения дифракционной эффективности.

В заключение необходимо отметить, что фазовые голограммы, полученные путем отбеливания амплитудных голограмм, темнеют под действием света и вследствие этого их дифракционная эффективность падает.

#### Литература

- [1] I. Upatnieks, C. Leonard. J. Opt. Soc. Am., 60, 297, 1970.
- [2] C. H. F. Velzel. Opt. Commun., 3, 133, 1971.
- [3] Э. А. Загорская. Опт. мех. промышл., 72, 1973.
- [4] J. Upatnieks, C. Leonard. Appl. Opt., 8, 85, 1969.
- [5] R. L. Lamberts, C. N. Kurtz. App. Opt., 10, 1342, 1971.

Поступило в Редакцию 20 июня 1972 г.