

06; 07

© 1991 г.

ФАЗОВЫЕ ИСКАЖЕНИЯ ПУЧКОВ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ УСИЛЕНИИ ИХ ТЕПЛОВЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ГОЛОГРАММАМИ

А. М. Березинская, А. М. Духовный

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование влияния неравномерности распределения интенсивности по сечению опорного и объектного пучков на фазовые аберрации диффузных и плоских объектных пучков при нестационарном усилении их тепловыми динамическими голограммами (ДГ). Установлено, что наибольший вклад в фазовые искажения объектного пучка вносит неравномерность опорного пучка, и найдены условия усиления пучков ДГ, при которых фазовые искажения минимальны. Результаты исследований были реализованы в неразрушающем контроле при измерении деформаций диффузно отражающих объектов с использованием оптических усилителей изображений на основе тепловых ДГ.

Введение

Проблема импульсного усиления оптических изображений, возникающая в прикладных задачах, например при неразрушающем голографическом контроле крупногабаритных или удаленных объектов, может успешно решаться методами динамической голографии, в частности с использованием в качестве усилителя динамических голограмм (ДГ) с тепловым механизмом записи. Такие ДГ позволяют осуществлять эффективное нестационарное преобразование как плоских, так и диффузных пучков одинаковой частоты излучения [1-3] при практически любых требуемых габаритах усилителя. Энергообмен между пучками в этом случае, как известно, обеспечивается изменяющимися по пространству и времени фазовыми набегами пучков [4], зависящими от параметров записи ДГ, в том числе от интенсивности опорного пучка и соотношения пучков на входе голограммы [2, 5], с одной стороны, с другой стороны, фазовые набеги являются источником аберраций объектной волны, снижающих качество голографических изображений [6] и точность измерений при неразрушающем контроле. В этой связи представляет практический интерес исследование фазовых искажений (ФИ) усиливаемой волны, обусловленных неравномерностью распределения интенсивности по сечению взаимодействующих пучков и приводящих к различию величин усиления по сечению объектного пучка, а следовательно, нарушению фазовых соотношений в процессе преобразования.

Теория

Теоретический анализ ФИ усиливаемых ДГ пучков проводился на основе численного решения системы связанных дифференциальных уравнений, описывающей взаимодействие диффузного объектного с плоским опорным пучком в отражательной ДГ с тепловым механизмом записи [2]. Объектный диффузный пучок был представлен в виде набора плоских компонентов $\sum_{i=1}^N E_i$, как одинаковых, так и заметно различающихся по амплитуде. Фазовому набегу φ_i , приобретаемому i -м компонентом объектного пучка в нелинейной среде, соответствует фаза волны E_i в конце импульса на выходе ДГ, а ФИ объектного пучка, обус-

повленные неравномерным распределением интенсивности по сечению взаимодействующих пучков, определялись как разность фазовых набегов $\Delta\varphi = \varphi_i - \varphi_{k \neq i}$, приобретаемых его компонентами в процессе усиления. Рассматривалось влияние неравномерности распределения интенсивности как объектного, так и опорного пучков на ФИ объектной волны. Модель записи ДГ в первом случае предполагала наличие двух компонентов неравной начальной интенсивности в объектном пучке с учетом нелинейного взаимодействия между ними ($G'/G = 1$;

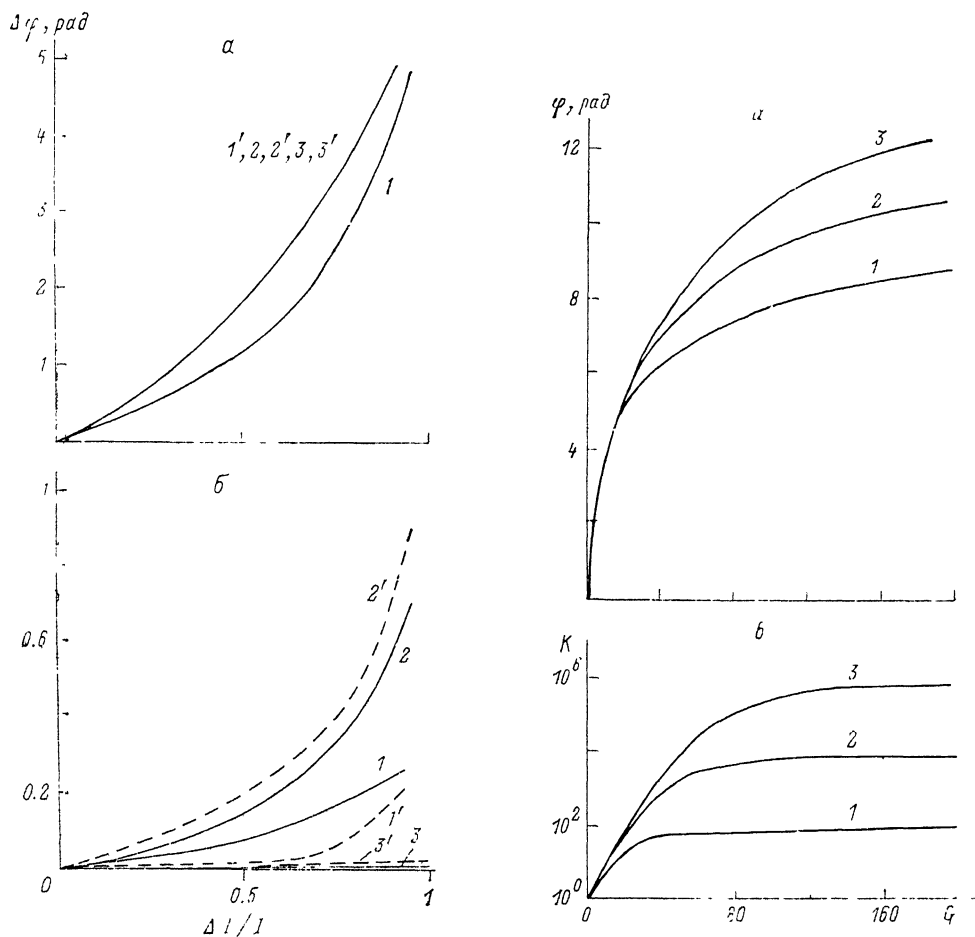


Рис. 1. Зависимость фазовых искажений объектного пучка от степени неравномерности опорного (а) и объектного (б) пучков при $G=40$:

G'/G : 1—3 — 0, 1'—3' — 1; M : 1, 1' — 10^2 ; 2, 2' — 10^4 ; 3, 3' — 10^6 .

Рис. 2. Зависимость фазовых набегов усиленных ДГ пучков (а) и коэффициентов усиления (б) от параметра нелинейности G .

$M=10^2$ (1), 10^4 (2), 10^6 (3); $G'/G=0$.

G' , G — параметры нелинейности, ответственные за интер- и кроссмодуляционное взаимодействие соответственно и в его отсутствие ($G'/G=0$), а также равномерное распределение интенсивности в опорном пучке. Во втором случае объектный пучок состоял из ста компонентов одинаковой интенсивности: большее число компонентов слабо влияет на результат вычислений [2], $G'/G=0$, 1, а распределение интенсивности в опорном пучке описывалось ступенькообразной функцией. Форма импульса излучения принималась прямоугольной.

На рис. 1 представлены результаты расчета ФИ объектной волны в зависимости от нормированной разности интенсивностей $(I_2 - I_1)/I_2 = \Delta I/I$, характеризующей степень неравномерности пучков по интенсивности при различных значениях отношений интенсивностей опорного к объектному пучку M на входе

ДГ и параметра G'/G . Как следует из рисунка, фазовые aberrации объектного пучка значительно более чувствительны к неравномерности распределения интенсивности по сечению опорного пучка (рис. 1, а), чем объектного (рис. 1, б), причем наличие интермодуляционного взаимодействия ($G'/G=1$) незначительно изменяет величину ФИ по сравнению с его отсутствием ($G'/G=0$). Неравномерность распределения интенсивности опорного пучка, как нетрудно видеть из рис. 1, а, приводит к возрастанию ФИ с увеличением $\Delta I/I$ и M (кривые 1, 2), однако в наиболее актуальной для практики области больших значений M (случай усиления малоинтенсивных изображений) отмеченный рост существенно замедляется и $\Delta\varphi$ перестает практически зависеть от M (кривые 2, 3). В то же время ФИ объектного пучка, обусловленные неравномерностью самой объектной волны, напротив, снижаются с ростом M в области больших M достигая весьма малых значений $\Delta\varphi$ (рис. 1, б, кривые 3, 3'). При $M < 100-200$, как показывают расчеты, темп роста интенсивности слабого компонента объектного пучка более быстрый, чем у сильного, что ведет первоначально к росту $\Delta\varphi$ в течение импульса, затем к выравниванию интенсивностей компонентов и установлению исходной величины $\Delta\varphi$. Это обстоятельство приводит к заметно меньшим величинам $\Delta\varphi$ в области сравнительно малых величин M , чем это следовало бы ожидать исходя из общей тенденции к возрастанию $\Delta\varphi$ с уменьшением M , однако при этом приходится считаться с ростом амплитудных искажений объектного пучка. Меньшие значения $\Delta\varphi$ при наличии интермодуляционного взаимодействия ($G'/G=1$) в области $M < 100-200$ также объясняются большей скоростью перераспределения интенсивностей компонентов объектного пучка в сторону их выравнивания, чем в случае $G'/G=0$. Более благоприятная ситуация с точки зрения ФИ при неравномерном распределении интенсивности объектного пучка, чем в случае неравномерности опорного, становится понятной, если иметь в виду то обстоятельство, что неравномерность $\Delta I/I$ в первом случае связана с различием в интенсивностях компонентов объектной волны, следовательно, в величинах M для этих компонентов, а во втором — отличием для них значений параметра G , причем приведенный на графике интервал значений $\Delta I/I$ соответствует изменению величин M и G более чем на порядок. В свою очередь зависимости $\Delta\varphi$ от M и G существенно отличаются друг от друга, что можно видеть на рис. 2, где приведены фазовые набеги (рис. 2, а) и соответствующие им коэффициенты усиления объектной волны K ($K = w_{\text{вых}}/w_{\text{вх}} \cdot T_0$, где $w_{\text{вх}}$, $w_{\text{вых}}$ — плотности энергии объектной волны на входе и выходе ДГ соответственно; T_0 — прозрачность ДГ) при записи ДГ двумя плоскими волнами (рис. 2, б) в зависимости от G при различных величинах M . Как следует из рис. 2, а, если изменение параметра G на два порядка приводит к различию фазового набега пучка $\Delta\varphi = 8-12$ рад, то при изменении M на четыре порядка в широком диапазоне изменения G отличие в фазовых набегах пучков (ср. кривые 1 и 3) в наихудшем случае больших G не превышает 4 рад. Таким образом, более сильная зависимость $\Delta\varphi$ от G , чем от M , обеспечивает меньшую чувствительность ФИ объектного пучка к его неравномерности распределения интенсивности по сечению, чем к неравномерности опорного пучка. Отметим, что создание равномерного по сечению опорного пучка является технически решаемой задачей, в то время как наличие неравномерности интенсивности объектного пучка является принципиально неустранимым при усилении изображений диффузно рассеивающих объектов. Вместе с тем, как следует из рис. 1, б, расчетные ФИ объектной волны были невелики и не превышали $\pi/4$ при градации интенсивности объектного пучка примерно в 20 раз и соотношениях пучков в пределах шести порядков, при этом коэффициенты усиления достигали значительной величины (рис. 2, б).

Следует отметить также, что в рассматриваемом случае нестационарного преобразования пучков тепловыми ДГ изменение фазовых набегов компонентов объектного пучка в течение импульса излучения приводит к снижению его степени пространственной и временной когерентности. При дальнейшем использовании усиленного ДГ пучка для регистрации изображений на голограмме это приведет к падению дифракционной эффективности последней. Как показывает практика, для решения значительного числа задач в голографии приемлемое качество восстановленных изображений обеспечивается при степени взаимной

когерентности записывающих голограмму пучков $|\gamma| > 0.1-0.2$, что соответствует случаю, когда фаза одного пучка плавно меняется на величину $\Delta\varphi = 10-11$ рад в течение импульса, как это имеет место при записи ДГ, а другого остается неизменной за этот же период времени [7]. Из рис. 1 видно, что разности фазовых набегов компонентов объектного пучка в исследованном диапазоне параметров записи ДГ заметно меньше отмеченной выше разности фаз и они тем самым не ограничивают его дальнейшее использование для получения голографических изображений.

Эксперимент

Экспериментальное исследование ФИ объектного пучка, обусловленных неравномерным распределением интенсивности по сечению опорного пучка, было проведено в условиях нестационарного усиления диффузного и плоского пучков отражательной ДГ с плоской опорной волной в смеси газов, состоящей из окислов азота и ксенона [8] с прозрачностью $T_0=0.4$. Запись ДГ осуществлялась на длине волны второй гармоники ($\lambda=0.53$ мкм) излучения моноимпульсного лазера на неодимовом стекле, объектный диффузный пучок формировался путем пропускания излучения через диффузную рассеивающую стеклянную пластину с угловым размером $\Omega=2.4 \cdot 10^{-4}$ ср. Для измерения величин ФИ применялась двухэкспозиционная голографическая методика. В первой экспозиции на голограмме регистрировался неискаженный объектный пучок, т. е. в отсутствие

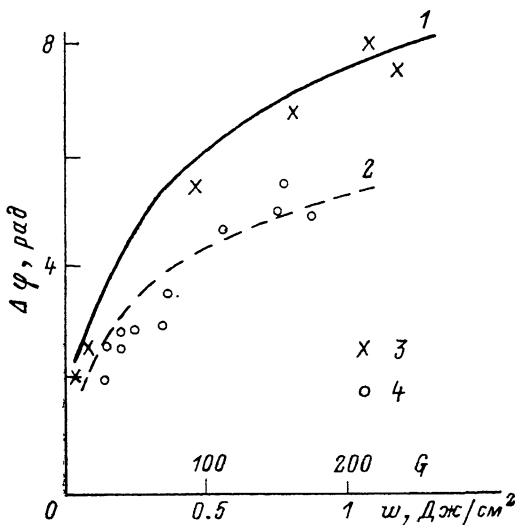


Рис. 3. Теоретическая (1, 2) и экспериментальная (3, 4) зависимости фазовых искажений усиленных плоского (1, 3) и диффузного (2, 4) пучков от плотности энергии опорной волны.

опорной волны на ДГ, во второй — объектный пучок с приобретенными в процессе усиления ФИ (опорная волна подается на ДГ). Голографическая интерферограмма ФИ регистрировалась в полосах конечной ширины, что достигалось изменением угла наклона опорного пучка на нее между экспозициями. Создание невозмущенного поля обеспечивалось перекрытием части сечения опорного на ДГ пучка, вследствие чего соответствующая часть сечения объектного пучка проходила через ДГ, не усиливаясь в обеих экспозициях. В тех случаях, когда коэффициенты усиления объектного пучка были весьма велики и это приводило к резкому снижению контраста получаемых интерференционных полос из-за существенной разницы в величинах дифракционной эффективности голограммы, в обеих экспозициях фиксировались волновые фронты усиленных объектных пучков при различных значениях плотностей энергии w опорного пучка. Это позволило, зная $\Delta\varphi$ в одной из экспозиций, найти величину ФИ в другой, измерить ФИ диффузного и плоского объектных пучков в широком интервале изменения параметра нелинейности G и данные эксперимента сравнить с результатами расчета. Отметим, что дифракционная эффективность полученных голограмм была достаточно высокой, несмотря на то что опорный пучок на голографическую интерферограмму формировался из пучка, не прошедшего через ДГ, и это находится в согласии с выводами теории о сравнительно незначительном снижении степени взаимной когерентности пучков в условиях экспериментов.

Зависимость величины ФИ диффузного и плоского пучков, измеренной по изложенной методике, от плотности энергии опорного пучка представлена на рис. 3. В случае плоской волны w соответствует значению плотности энергии в центре пучка, где наблюдается максимальный изгиб интерференционных

полос, определяющий величину $\Delta\varphi$. На рисунке также приведены расчетные зависимости $\Delta\varphi$ от w для условий записи ДГ, соответствующих условиям экспериментов. Так как интерферограмма регистрирует усредненную по времени разность фазовых набегов, то в расчетах учитывалось временное изменение амплитуды и фазы усиленного объектного пучка в течение действия импульса. В случае преобразования ДГ диффузного пучка проводилось также усреднение $\Delta\varphi$ по спектру пространственных частот с учетом угловой зависимости коэффициента усиления. Такое усреднение фазовых набегов, реализуемое в эксперименте, объясняет наблюдавшуюся меньшую величину ФИ диффузного объектного пучка по сравнению с ФИ плоской волны (рис. 3). Хорошее соответствие результатов расчетов с экспериментальными данными позволяет сделать вывод о допустимости применения на практике принятой в работе методике расчета ФИ и, следовательно, возможности выбора оптимальных условий процесса усиления изображений тепловыми ДГ с учетом фазовых аберраций изображений.

Интересно заметить, что при исследовании ФИ плоской волны в зависимости от соотношения интенсивностей пучков на входе ДГ при $M=0.8$ наблюдалось изменение направления изгиба интерференционных полос на противоположное по сравнению со случаями $M > 1$. Это согласуется с выводом нестационарной теории записи ДГ вырожденными по частоте пучками в нелинейных средах с локальным инерционным откликом о том, что перекачка энергии всегда идет из более в менее интенсивную волну, если не принимать специальных мер и направление перекачки задается знаком разности фазовых набегов взаимодействующих пучков [4].

Проведенное исследование позволило провести демонстрационный эксперимент по регистрации деформаций диффузно рассеивающего объекта методом двухэкспозиционной голографической интерферометрии с применением усилителя изображений на основе тепловой ДГ. Объектом служила металлическая пластина, в которой между экспозициями создавалась деформация микрометрическим винтом. Соотношение пучков на входе усилителя было ≈ 1700 , $w = 0.1$ Дж/см², коэффициенты в этих условиях были $K=15-20$. Одновременно с записью интерферограмм усиленных ДГ изображений регистрировались интерферограммы неусиленных изображений. Были получены интерферограммы сравнительно высокого качества, причем структуры интерференционных полос для усиленных и неусиленных изображений не отличались друг от друга, что свидетельствовало о практически безаберрационном усилении изображений или малости ФИ, вносимых ДГ.

Таким образом, осуществленное в данной работе исследование фазовых аберраций объектных пучков в зависимости от параметров записи ДГ показало, что, во-первых, на ФИ более сильное влияние оказывает неравномерность распределения интенсивности по сечению опорного пучка, чем объектного, и, во-вторых, достаточно малые ФИ усиливаемого изображения можно обеспечить соответствующим выбором условий преобразования пучков ДГ. И в заключение отметим, что применение импульсного голографического усилителя изображений (ГУИ) при записи голографических изображений диффузно рассеивающих объектов позволяет, как показывают оценки, по меньшей мере, более чем на порядок снизить требования к источнику излучения или чувствительности регистрирующего фотоматериала, так как ГУИ позволяет без дополнительных затрат энергии в отличие от лазерного усилителя, например, перераспределить почти всю энергию излучения в направлении на фотоматериал, в то время как в схеме без усиления ее значительная часть рассеивается в большой телесный угол и не принимает участия в формировании изображения на фотоматериале. Еще одна задача, которая может решаться с помощью ГУИ, — это повышение чувствительности регистрирующих фотоматериалов по объектному пучку, ограничиваемой собственными шумами фотоматериалов. По нашим экспериментальным данным уровень пространственных шумов ДГ при записи диффузных объектов в поглощающих газах в телесном угле 10^{-2} ср составлял 10^{-8} , что заметно ниже уровня шумов в этом же телесном угле при записи голограмм на промышленных галлойдосеребряных фотопластинках, составляющего $10^{-7}-10^{-6}$ [9], и, таким образом, используя ГУИ, можно снизить минимально воз-

возможный уровень регистрируемого сигнала. Аналогичная задача была решена в [10], где использование ГУИ на фоторефрактивном кристалле позволило усилить лазером на парах меди и зарегистрировать маломощный световой сигнал исходной интенсивности, более чем в 5 раз меньшей уровня собственных шумов квантового усилителя.

И, наконец, последнее, весьма перспективный для использования в голографической интерферометрии регистрирующий фотоматериал ФТИРОС в настоящее время не находит широкого применения на практике, так как он может записывать голограммы с приемлемой дифракционной эффективностью только в области $M \sim 1$ [11]. Проблема регистрации голограмм изображений объектов на ФТИРОСе в значительной мере снимается при использовании импульсного усилителя изображений на основе тепловых ДГ.

Список литературы

- [1] Грозный А. В., Духовный А. М., Лецев А. А. и др. // Оптическая голография. Л.: Наука, 1979. С. 92—122.
- [2] Березинская А. М., Духовный А. М., Стаселько Д. И. // ЖТФ. 1983. Т. 53. Вып. 10. С. 1986—1994.
- [3] Березинская А. М., Духовный А. М. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 12. С. 105—107.
- [4] Винецкий В. Л., Кухтарев Н. В., Одулов С. Г., Соскин М. С. // УФН. 1979. Т. 129. Вып. 1. С. 113—137.
- [5] Березинская А. М., Духовный А. М., Стаселько Д. И. // ЖТФ. 1983. Т. 53. Вып. 3. С. 499—507.
- [6] Березинская А. М., Духовный А. М. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 24. С. 2259—2263.
- [7] Березинская А. М., Духовный А. М., Стаселько Д. И. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 10. С. 1933—1941.
- [8] Березинская А. М., Духовный А. М., Стаселько Д. И. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. Вып. 15. С. 905—909.
- [9] Чураев А. Л., Стаселько Д. И. // Опт. и спектр. 1986. Т. 61. Вып. 3. С. 591—597.
- [10] Земсков К. И., Казарян М. А., Люксютов С. Ф. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 48. Вып. 4. С. 187—189.
- [11] Бугаев А. А., Захарченя Б. П., Чудновский Ф. А. Фазовый переход металл—полупроводник и его применение. Л.: Наука, 1979. 183 с.

Поступило в Редакцию

2 февраля 1990 г.

В окончательной редакции

13 сентября 1990 г.