

## О ПОВЫШЕНИИ КОНТРАСТА ИЗОБРАЖЕНИЯ, РЕГИСТРИРУЕМОГО ЧЕРЕЗ РАССЕИВАЮЩИЙ СЛОЙ В ЧАСТИЧНО КОГЕРЕНТНОМ СВЕТЕ

Е. В. Ивакин и А. И. Куцук

Рассмотрена возможность уменьшения шумов в изображении, вызванных светорассеянием, путем записи безопорных голограмм сфокусированного изображения (БГСИ) в свете с частичной пространственной когерентностью. Экспериментальные исследования, проведенные с помощью аргонового лазера и теплового источника, показали, что существует оптимальное соотношение между размером области пространственной когерентности излучения и шириной функции импульсного отклика объектива, при котором контраст восстановленного изображения наибольший.<sup>1</sup>

Из известных когерентно-голографических методов улучшения качества изображения, искаженного средой с фазовыми неоднородностями, можно выделить группу методов, основанных на осреднении волнового фронта за время экспонирования. Осреднение реализуется либо за счет движения рассеивающих частиц среды при неподвижном объекте [1, 2], либо обеспечивается статистическими свойствами источника света [3]. В последнем случае по сравнению с [1, 2] нет необходимости в сравнительно долговременном накоплении голограмм (что существенно повышает скорость обработки изображений), так как осреднение обеспечивается ограниченной временной когерентностью излучения. При этом расстояние до зоны наблюдения определяется длиной линии задержки, специально введенной в опорный пучок, а глубина регистрируемого пространства — шириной функции продольной когерентности.<sup>2</sup>

В данной работе рассмотрена другая возможность улучшения качества изображения, регистрируемого в условиях светорассеяния, основанная на записи БГСИ в свете с частичной пространственной когерентностью. Как и в методе, описанном в [3], для ее реализации не требуется операция накопления голограмм, но предлагаемый нами вариант голографического уменьшения шумов рассеянного света выгодно отличается от него отсутствием опорного пучка.

Как известно, одним из условий формирования контрастной спекл-структуры БГСИ диффузного объекта является значительное превышение размера области пространственной когерентности квазимонохроматического источника света ширины функции импульсного отклика (ФИО) оптической системы. В этом случае световые волны с хаотизированными фазами, приходящие в данную точку изображения от различных точек объекта в пределах области кружка рассеяния, складываются когерентно. Уменьшение соотношения между указанными выше величинами приводит к тому, что спекл-структура БГСИ локализуется в более или менее узкой области сфокусированного изображения, а контраст ее падает [7]. Если размер области пространственной когерентности излучения ненамного превышает исходную ширину ФИО в плоскости объекта, то любое ее уширение (в том числе и вызванное дефокусировкой изображения [7]) приведет к снижению когерентности поля в плоскости регистрации БГСИ и, сле-

<sup>1</sup> Работа доложена на XI Всесоюзной школе по когерентной оптике и голографии. Ростов Великий, март 1979 г.

<sup>2</sup> Использование источника света с ограниченной и заданной временной когерентностью в схеме с двухлучевым интерферометром позволяет, кроме того, определять расстояние до удаленного объекта [4], детектировать когерентный источник на некогерентном фоне [5], исследовать параметры рассеивающих сред [6].

довательно, к уменьшению контраста спекл-структуры. Эта чувствительность БГСИ, регистрируемой при соответствующем выборе степени пространственной когерентности света, к различным факторам уширения ФИО системы использована нами для улучшения качества изображения, переданного через рассеивающую среду.

ФИО оптической системы, состоящей из безаберационного объектива и рассеивающего слоя небольшой оптической плотности  $\tau$ , имеет вид явно выраженного центрального пика, соответствующего нерассеянной и рассеянной на малые углы частям излучения, а также «крыльев», относительная интенсивность и ширина которых зависят от оптических характеристик среды и геометрии наблюдения [8]. «Крылья» ФИО являются основной причиной ухудшения качества изображения при наблюдении через рассеивающий объем обычным способом, а их происхождение связано с рассеянием света на сравнительно большие углы.

Основываясь на широко используемой модели происхождения спекл-структуры сфокусированного изображения диффузного объекта, можно качественно

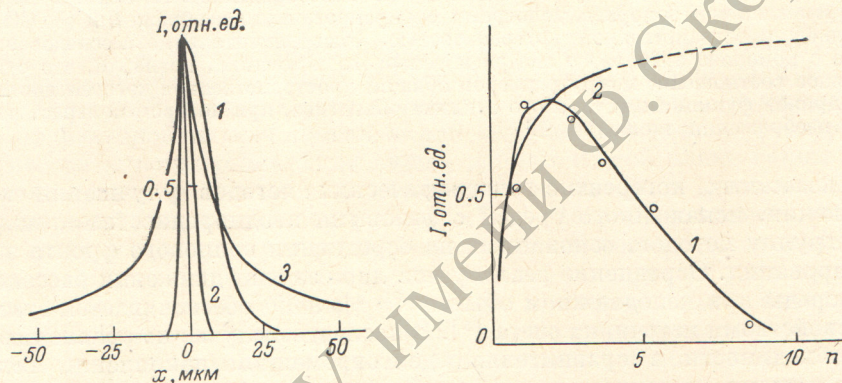


Рис. 1. Приведенные к плоскости объекта функции пространственной когерентности теплового источника (1) и импульсного отклика объектива в отсутствие (2) и при наличии рассеивающей среды (3).  $\tau=3$ .

Рис. 2. Зависимость контраста восстановленного изображения (1) при  $\tau=3$  и среднего контраста спекл-структуры БГСИ (2) при  $\tau=0$  от отношения размера области пространственной когерентности к полуширине исходной ФИО объектива.

объяснить сущность предложенного способа коррекции качества изображения. Она сводится к тому, что при использовании света с ограниченной пространственной когерентностью рассеянное на большие углы излучение (как строящее периферийные участки ФИО) теряет когерентность и, следовательно, не участвует в записи БГСИ.

Распределение интенсивности света в плоскости БГСИ описывается выражением [9]

$$I(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \gamma_{12}(x' - x'') h(x - x') h^*(x - x'') Q(x') Q(x'') dx' dx'' \quad (1)$$

Здесь  $\gamma_{12}$  и  $h$  — пространственно инвариантные функции комплексной степени когерентности и амплитудного импульсного отклика объектива совместно с искажающей средой соответственно,  $Q$  — комплексная амплитуда поля в плоскости объекта. Благодаря наличию быстро флуктуирующей фазовой части поля  $Q$ , а также конечной ширине ФИО объектива, интенсивность  $I$  содержит спекл-структуру. Ее средний контраст зависит, в частности, от соотношения между ширинами  $\gamma_{12}$  и  $h$  и в свою очередь определяет яркость восстановленного изображения.

В выполненных нами экспериментах в качестве объекта использовалась фигурная диафрагма, наложенная на матовую стеклянную пластинку. Запись БГСИ производилась на высокоразрешающую фотопленку по стандартной

схеме [10]. Источником света служил одномодовый аргоновый лазер, излучение которого фокусировалось линзой в плоскость вращающегося с большой скоростью стеклянного диска, матированного с одной стороны. Перемещением диска вдоль светового пучка относительно его фокальной перетяжки регулировалась степень пространственной когерентности света в плоскости объекта. Рассеивающая среда представляла собой пластинку толщиной 5 мм из молочного стекла марки МС-19, неподвижно закрепленную в пространстве между объектом и объективом. На рис. 1 представлены приведенные к плоскости объекта ФИО объектива и объектива совместно с рассеивающей средой, построенные путем фотометрирования распределения освещенности изображения щели шириной порядка 1 мкм.

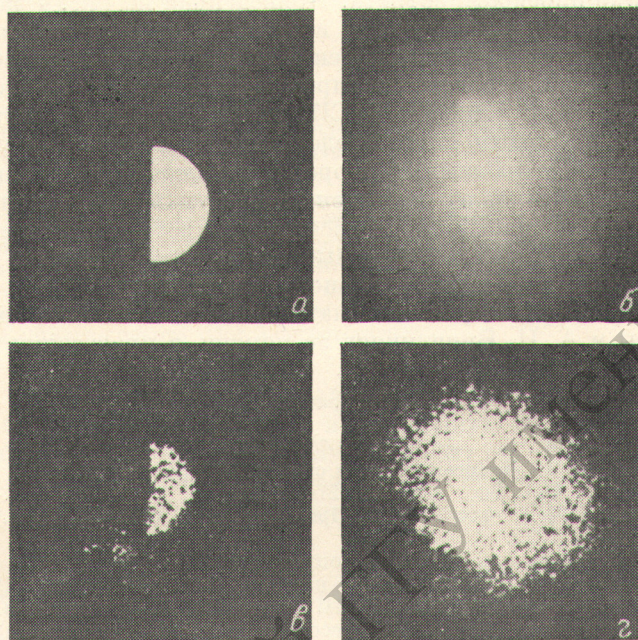


Рис. 3. Изображения, полученные при обычном фотографировании в отсутствие (а) и при наличии рассеивающей среды (б), а также восстановленные из БГСИ, записанных при частично (в) и полностью когерентном (г) освещении.

Восстановление «позитивного» изображения, сформированного благодаря дифракции света на спекл-структуре БГСИ, осуществлялось He—Ne лазером. Нулевой порядок (осевое «негативное» изображение) устранялось пространственным фильтрованием. Рис. 2 иллюстрирует зависимость контраста восстановленного из БГСИ изображения от отношения размера области пространственной когерентности, измеренной на уровне  $|\gamma_{12}|=0.8$ , к исходной ФИО объектива. Контраст вычислялся на основании данных фотометрирования светлого и темного участков восстановленного изображения.

Как следует из рис. 2, зависимость  $K(n)$  имеет максимум в области  $n$ , сравнимых с единицей. Качественно характер этой зависимости можно объяснить на основании графика 2 на рис. 2, построенного по данным работы [11], для нормальной спекл-структуры [12]. Из него, в частности, видно, что при  $n < 1$  средний контраст спекл структуры стремится к нулю, а при  $n \geq 1$  он максимален и практически не зависит от  $n$ . С точки зрения фильтрации это означает, что в первом случае яркость восстановленного изображения мала в сравнении с собственными шумами фотопленки, а во втором то, что весь свет, в том числе и рассеянный на большие углы, принимает участие в формировании БГСИ, и следовательно, не происходит подавления рассеянного фона на этапе восстановления.

То значение  $n$ , при котором контраст изображения максимален, очевидно, зависит от свойств как рассеивающей среды, так и всей системы фотографирования в целом. В частности, оптимум по  $n$  определяется требуемой разрешающей способностью в изображении. Например, если ограничиться передачей только низких пространственных частот, то наибольшее значение  $K$  может быть достигнуто при увеличенном  $n$ . В этом случае доля света, используемого для записи БГСИ, возрастает.

На рис. 3 представлены изображения диффузного транспаранта, полученные по той же схеме, но с использованием в качестве источника света газоразрядной лампы ДАЦ-50, имеющей малый размер светящегося тела. Для монохроматизации излучения использовался красный светофильтр. Размер области пространственной когерентности подбирался путем изменения расстояния от источника света до плоскости объекта. Приведенная на рис. 1 зависимость степени пространственной когерентности излучения от расстояния между двумя точками в плоскости объекта приближенно соответствует круговому источнику с плавным (близким к гауссовому) распределением яркости по его поверхности. Из рис. 3 следует, что с помощью БГСИ, регистрируемых в свете с частичной пространственной когерентностью, представляется возможным увеличить контраст изображения. Незначительный ореол, наблюдающийся в выходной плоскости (рис. 3, *в*), обусловлен собственными шумами фотоленки. Результат восстановления БГСИ (рис. 3, *з*), записанной в свете гелий-неонового лазера, демонстрирует тот факт, что излишне высокая пространственная когерентность излучения не приводит к положительному результату.

В заключение авторы выражают благодарность Э. П. Зеге за полезные обсуждения работы и А. Н. Бриндикову за помощь в проведении эксперимента.

#### Литература

- [1] K. A. Stetson. J. Opt. Soc. Am., 57, 1060, 1967.
- [2] А. Д. Гальперн, Ю. Н. Денисюк. Опт. и спектр., 30, 340, 1971.
- [3] H. J. Couplfield. J. Opt. Soc. Am., 58, 276, 1968.
- [4] А. С. Медовиков, В. Н. Морозов, М. Т. Прилепин, А. С. Семенов, А. Б. Сергеев. Квант. электрон., 6, 2466, 1979.
- [5] Пат. США № 3824018, кл. G01b 9/02, опубл. 16.07.74.
- [6] А. Р. Иванов, А. Р. Chaikovski, A. A. Kumeisha. Opt. Lett., 1, 226, 1977.
- [7] Н. Г. Власов, Р. Б. Мацонашвили, Ю. П. Пресняков, Б. М. Степанов. В сб.: Физические основы голографии Матер. XI Всесоюз. школы по голографии, 198. Л., 1979.
- [8] А. П. Иванов. Оптика рассеивающих сред. «Наука и техника», Минск, 1969.
- [9] J. C. Dainty. Opt. Acta, 17, 767, 1970.
- [10] И. С. Клименко, Е. Г. Матинян, Г. В. Скродкий. ДАН СССР, 211, 571, 1973.
- [11] H. Fujii, T. Asakura. Nov. Rev. D'Optique, 6, 5, 1975.
- [12] J. C. Dainty. Progress in Optics. Ed. E. Wolf, 14, 3, North-Holland, 1976.

Поступило в Редакцию 28 мая 1980 г.