

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фомин Я. А., Савич А. В. Оптимизация временных параметров системы распознавания одномерных нормальных совокупностей // Радиотехника.— 1984.— 39, № 11.
2. Фомин Я. А., Савич А. В. Оптимизация системы распознавания многомерных совокупностей // Радиотехника.— 1985.— 40, № 12.
3. Фомин Я. А., Тарловский Г. Р. Статистическая теория распознавания образов.— М.: Радио и связь, 1986.
4. Безродный Б. Ф., Савич А. В., Фомин Я. А. Оптимизация системы распознавания одномерных нормальных совокупностей // Автометрия.— 1987.— № 5.
5. Фомин Я. А., Савич А. В. Оптимизация системы распознавания гауссовских ансамблей с разными ковариационными матрицами // Радиотехника.— 1987.— 42, № 7.
6. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники.— М.: Радио и связь, 1989.
7. Володин И. П. Оценки необходимого объема наблюдений в задачах статистической классификации // Теория вероятностей и ее применение.— 1977.— 22, вып. 2, 4.
8. Ху Т. Целочисленное программирование и потоки в сетях.— М.: Мир, 1974.
9. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов сумм, рядов и произведений.— М.: Наука, 1971.

Поступила в редакцию 10 октября 1988 г.

УДК 535.4 : 621.391

П. В. ПОЛЯНСКИЙ

(Черновцы)

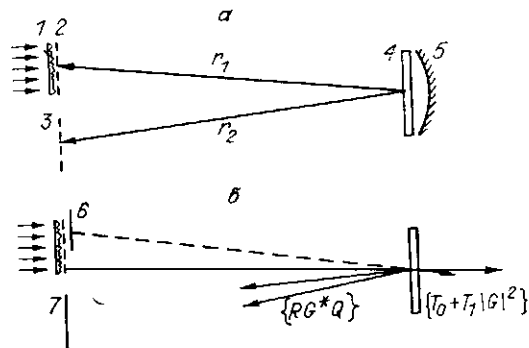
О СОГЛАСОВАННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ ГОЛОГРАММЫ

Одной из актуальных в приложениях особенностей голографической записи информации является возможность восстановления изображения объекта-эталоны по его фрагменту. До сих пор такая возможность рассматривалась применительно к пропускающей безопорной голограмме, используемой в качестве согласованного фильтра когерентного коррелятора. Специфика традиционно обсуждаемой методики заключается в искажении координатного распределения интенсивностей в корреляционном поле вследствие того, что на фантомное изображение считывающей части объекта (первый дифракционный порядок) наложено поле этой же части, прошедшее сквозь голограмму без рассеяния (нулевой порядок). Распределение яркостей в выходной плоскости коррелятора определяется соотношением амплитуд и фаз компонентов изображающего поля нулевого и первого порядков. В большинстве случаев фантомное изображение отсутствующего фрагмента объекта характеризуется значительно меньшей яркостью, чем изображение считывающей части, так что для фоторегистрации выходного сигнала его составляющую, соответствующую считываемому фрагменту, приходится ослаблять с помощью фильтров [1]. Лишь в случае негативной записи возможно иное распределение интенсивностей, причем правильная яркостная тонопередача имеет место при некотором определенном соотношении размеров и амплитуд считывающей и отсутствующей частей объектной сцены [2].

Как показано в [3, 4], изображение объекта-эталоны с правильной яркостной тонопередачей независимо от типа голограммы (амплитудная или фазовая) и величины считываемого фрагмента может быть получено при использовании в качестве согласованного фильтра нелинейной внеосевой голограммы. В этом случае, однако, необходимо формирование гомоцентрического опорного источника и выполнение условий максимизации яркости отклика второго порядка. В данной работе исследуем

Рис. 1. Схема записи (а) и считывания (б) отражательного голографического фильтра:

1 — диффузор; 2 — объект; 3 — виртуальный опорный источник; 4 — голограмма; 5 — зеркало; 6 — амплитудный экран; 7 — диффузно отражающий экран



возможность пространственного разделения компонентов корреляционного поля нулевого и первого дифракционных порядков и восстановления изображения объекта по его части с неискаженным распределением яркостей без необходимости формирования квазиточечного опорного источника при минимальном усложнении схемы регистрации безопорной голограммы.

Рассмотрим процесс фильтрации на голограмме, записанной в схеме, показанной на рис. 1, а и отличающейся от схемы регистрации безопорной голограммы лишь наличием расположенного за фотослоем зеркала. Для удобства представления экспериментальных результатов геометрические параметры схемы подбираются так, чтобы объект и формируемое зеркалом его действительное изображение были локализованы в одной плоскости и имели одинаковый масштаб. Представляя объект ансамблем N оптических ретрансляторов (ОР) [2, 4], его поле в области регистрации опишем в виде

$$G = \sum_{q=1}^N a_q \exp\{-ik(\mathbf{r}_1 + \rho_q)\}, \quad (1)$$

где a_q — комплексная амплитуда сигнала ОР с индексом q в текущей точке регистрирующей среды; \mathbf{r}_1 — радиус-вектор геометрического центра объекта относительно данной точки; ρ_q — радиус-вектор q -го ОР относительно этого центра. Рассматривая зеркальное изображение объекта как виртуальный опорный источник, его поле в области регистрации опишем в аналогичной форме:

$$Q = \sum_{p=1}^N b_p \exp\{ik(\mathbf{r}_2 - \rho_p)\}. \quad (2)$$

(При нулевой или положительной кривизне зеркала изменяются знаки при \mathbf{r}_2 и ρ_p , что, однако, не ограничивает общности результата исследования.) Голограмма, записанная в схеме рис. 1, а, может рассматриваться как отражательная безлинзовая фурье-голограмма поля $G + Q$. Подавая на вход такой голограммы поле (1), восстановим распределение комплексных амплитуд, один из компонентов которого представляет собой корреляционный отклик — фантомное изображение виртуального опорного источника. Полученная голограмма может считываться как в проходящем, так и в отраженном свете (рис. 1, б); ее общий оператор имеет вид

$$\{T_0 + (T_1 + R)|G + Q|^2\}, \quad (3)$$

где T_0 характеризует относительную амплитуду нерассеянной составляющей считывающего поля (нулевой порядок); T_1 и R — относительные амплитуды прошедшего и отраженного дифрагировавшего излучения. Рассмотрим результат считывания фильтра (3) частью объектного поля. Воздействуя парциальным оператором (3) вида $\{T_0 + T_1|G|^2\}$ на поле подансамбля ОР объекта с индексами $j = 1, 2, \dots, M$, получаем

$$\left(T_0 + T_1 \sum_{j=1}^M |a_j|^2\right) \sum_{q=1}^M a_q \exp\{-ik(\mathbf{r}_1 + \rho_q)\} +$$

$$\begin{aligned}
& + \left(T_1 \sum_{j=1}^M |a_j|^2 \right) \sum_{q=M+1}^N a_q \exp \{ -ik(\mathbf{r}_1 + \rho_q) \} + \\
& + T_1 \sum_{q \neq j=1}^N \sum_{g=1}^M \sum_{p=1}^N a_j^* a_g \exp \{ -ik(\mathbf{r}_1 + \rho_q + \rho_j - \rho_g) \}. \quad (4)
\end{aligned}$$

Как и при фильтрации на безопрной голограмме, составляющие восстановленного поля, соответствующие считывающей и отсутствующей частям объекта (первое и второе слагаемые выражения (4)), имеют разные амплитудные коэффициенты; таким образом, в проходящем излучении распределение яркостей по полю изображения оказывается нарушенным.

Одновременно вследствие дифракции поля M считывающих ОР на парциальном операторе (3) вида $\{RG*Q\}$ восстанавливается распределение комплексных амплитуд

$$\left(R \sum_{j=1}^M |a_j|^2 \right) Q + R \sum_{q \neq j=1}^N \sum_{p=1}^M \sum_{p=1}^N a_q^* a_p \exp \{ ik(\mathbf{r}_2 - \rho_j + \rho_q - \rho_p) \} \quad (5)$$

— действительное изображение виртуального опорного источника с наложенным ореолом. Фрагменты изображения Q , соответствующие считывающему и отсутствующему компонентам предмета, воспроизводятся с одинаковыми амплитудными коэффициентами: имеет место правильная яркостная тонопередача. Мощностью подансамбля считывающих ОР определяется только интегральная яркость корреляционного отклика и отношение интенсивностей информативного сигнала и шума, описываемого вторым слагаемым выражения (5). Возрастание относительной мощности шума по мере уменьшения числа считывающих ОР обуславливает снижение контраста в области корреляционного отклика и может быть охарактеризовано зависимостью частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) процесса формирования изображения опорного источника от величины M/N .

Целью экспериментального исследования были проверка возможности восстановления изображения рассеивающего объекта по его части при использовании в качестве согласованного фильтра отражательной голограммы и оценка качества этого изображения в зависимости от мощности подансамбля считывающих ОР.

Обоснуем выбор объекта-эталона. Традиционно применяемые при изучении апертурных зависимостей процесса формирования изображения [5] периодические структуры (решетки) в данном случае использовать нецелесообразно по следующим соображениям. Если на вход отражательного голографического фильтра подается поле единственного ОР, то, как видно из (5), на выходе восстанавливается центрированная относительно изображения считывающего ОР автосвертка объекта. Из корреляционной теории случайных процессов [6] известно, что в автокорреляциях и автосвертках периодических объектов отображается исходная периодика. Поэтому в случае использования в качестве объекта-эталона решетки даже при считывании голограммы (3) в наименее благоприятных условиях ($M=1$, изображение не выделено в распределении (5)) в области корреляционного отклика сохраняется высокий контраст. Получаемые с такими тест-объектами ЧКХ не характеризуют контраст в области корреляционного отклика для диффузных предметов.

Нами использовался объект, представлявший собой подсвечиваемый сквозь диффузор амплитудный транспарант, тестируемая часть которого — решетка с пространственной частотой 3 мм^{-1} , а восстанавливаемая — фотограмма спекл-структуры. Диффузором служил образец шлифованного стекла, подготовленный абразивом М-28. Известно [7], что использование такого диффузора позволяет исключить влияние на результат эксперимента регулярной составляющей рассеянного поля. Угол поля зрения, оцениваемый из центра голограммы, составлял $1,9 \cdot 10^{-2}$.

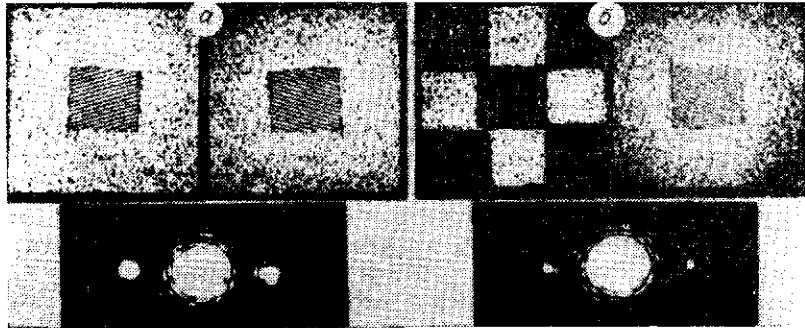


Рис. 2. Результат фильтрации объектного поля (а) и его части (б) в проходящем и отраженном свете

Размеры регулярного и случайного распределений подбирались так, чтобы их спектры перекрывались, вследствие чего в области корреляционного отклика ореол, соответствующий случайному компоненту, полностью покрывал решетку. Угол между векторами \mathbf{r}_1 и \mathbf{r}_2 составлял $5 \cdot 10^{-2}$, при этом влияние астигматизма косых пучков на структуру корреляционного отклика пренебрежимо мало. Регистрация отражательных голографических фильтров осуществлялась на фотопластинках ИФГ-03. Корреляционный отклик, формируемый в отсутствие зеркала, наблюдался на рассеивающем экране, помещенном в область локализации виртуального опорного источника, либо регистрировался на низкоконтрастную пленку КН-2. (Пленка с низким коэффициентом контрастности использована для обеспечения линейной регистрации изображения.) Считывание фильтра производилось полем всего объекта или только его части со статистическим распределением. Фотограммы откликов получались при одинаковых экспозициях, их среднее пропускание составляло 0,4.

На рис. 2 иллюстрируется результат фильтрации объектного поля (а) и его части (б). Слева на каждом фрагменте показаны изображения, наблюдаемые в проходящем свете, справа — в отраженном. Яркость фантомного изображения перекрытой части объекта (рис. 2, б) на несколько порядков ниже яркости изображения считывающей части. Корреляционные отклики, наблюдаемые в отраженном свете, различаются лишь контрастом, что качественно подтверждается дифрактограммами снимков их центральных участков (решеток). На рис. 3 приведен результат дифрактометрического исследования контраста фотограмм корреляционных откликов в зависимости от площади S перекрытого фрагмента объекта с общей площадью S_0 (предполагая, что $(S_0 - S)/S_0 = M/N$), $\eta = I_1/I_0$, где I_1, I_0 — интенсивности излучения в первом и нулевом дифракционных порядках, отнесено к η_{\max} , полученному для сформированного сферическим зеркалом в отсутствие голограммы-фильтра изображения объекта-эталоны. Уменьшение относительной энергии излучения, дифрагирующего в первый порядок, свидетельствует о снижении контраста в области корреляционного отклика по мере уменьшения отношения M/N и подтверждает адекватность предложенной модели фильтрации на отражательной голограмме.

Таким образом, результаты эксперимента подтвердили возможность восстановления изображения объекта по его части при исполь-

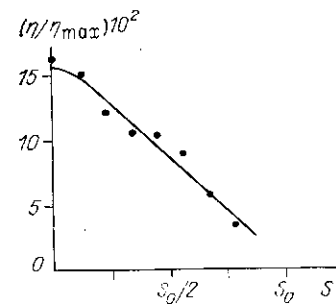


Рис. 3. Зависимость контраста корреляционного отклика от величины перекрытой части объекта-эталоны

зовании в качестве согласованного фильтра отражательной голограммы, зарегистрированной без гомоцентрического опорного пучка, и инвариантность координатного распределения интенсивностей в этом изображении от мощности считывающего подасамбля ОР.

Специфика голографического коррелятора как изображающей системы заключается в том, что амплитудная модуляция объекта на этапе фильтрации (изменение соотношения амплитуд ОР вплоть до экранирования значительной их части) приводит не к искажению соответствующей части изображения, а лишь к изменению интегральной яркости и контраста отклика. Кроме того, эксперименты, подобные описанным в [8] применительно к пропускающим внеосевым голограммам, показали, что и при использовании отражательных фильтров нераспределение энергии между изображением и ореолом, сопровождающееся снижением контраста, может быть обусловлено и чисто фазовой модуляцией пучка в области полевой диафрагмы (локализации ансамбля ОР). Согласно теории изображающих систем [9], аналогичное влияние на структуру изображения оказывает апертурное ограничение — реальное (уменьшение размеров действующего участка фильтра, если на этом участке уменьшается не более одной зоны корреляции подложки — фазово-неоднородного экрана) либо эффективное (рассогласование фаз парциальных изображающих сигналов, если апертурной диафрагмой охватывается несколько зон корреляции подложки). Однако физические причины снижения контраста вследствие модуляции поля в области полевой и апертурной диафрагм различны. Если апертурное ограничение состоит в отфильтровывании высоких пространственных частот посредством их экранирования либо за счет свертки идеального дифракционного изображения с функцией рассеяния точки, обусловленной дисперсией фаз парциальных изображающих сигналов [4], то амплитудная или фазовая модуляция поля в пространстве объекта приводит к уменьшению числа когерентно суперпонирующихся парциальных изображений объекта и возрастанию относительной мощности ореола. Указанные особенности присущи также голографическому коррелятору на базе нелинейной голограммы [3, 4].

В заключение отметим различие свойств нелинейных внеосевых и отражательных фильтров в задаче восстановления изображения по его части. Если при фильтрации на нелинейных голограммах возможно восстановление изображения всех элементов объектной сцены как при одновременной, так и при наложенной записи их полей [4], то считывание отражательного голографического фильтра с наложенной записью полем некоторого элемента объекта приводит к формированию изображения только этого элемента, что является следствием высокой угловой селективности объемных голограмм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография.— М.: Мир, 1973.
2. Полянский В. К., Росляков С. Н., Тарновецкий В. В. Яркостные характеристики изображения, восстановленного по безопорной голограмме // Укр. физ. журн.— 1980.— 25, № 4.
3. Полянский П. В. О формировании сопряженного изображения в схеме обобщенного голографического фильтра // Оптика и спектроскопия.— 1988.— 65, № 2.
4. Полянский П. В. О согласованной фильтрации с использованием нелинейной голограммы // Автометрия.— 1989.— № 5.
5. Экспериментальная радиооптика/Под ред. В. А. Зверева и Н. С. Стенанова.— М.: Наука, 1979.
6. Вейдт Дж., Пирсол А. Применения корреляционного и спектрального анализа.— М.: Мир, 1983.
7. Полянский В. К. Спектральные характеристики бесцветного стекла с матовой поверхностью // Журн. прикл. спектр.— 1970.— 13, вып. 6.
8. Полянский П. В. Влияние фазовой модуляции объектного поля на результат голографической фильтрации // Автометрия.— 1989.— № 1.
9. Ноль Р. В. Введение в оптику.— М.; — Л.: ОГИЗ, 1947.

Поступила в редакцию 21 сентября 1989 г.