

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ

УДК 621.391:535.4

П. В. ПОЛЯНСКИЙ
(Черновцы)

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ ОБЪЕКТНОГО ПОЛЯ
НА РЕЗУЛЬТАТ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Исследованию влияния фазовых искажений оптического поля на свойства информационного канала и качество изображения посвящены фундаментальные монографии [1, 2] и более поздние работы [3, 4]. Актуальность этой проблемы возрастает в связи с развитием голографии [5—7] и средств оптической обработки информации [8, 9]. Принципиальный и практический интерес представляет вопрос о влиянии статистической фазовой модуляции поля на функционирование голографических распознающих устройств. Настоящая работа посвящена исследованию зависимости интенсивности корреляционного отклика от фазовых искажений объектного поля, а также выявлению новых информативных возможностей голографического коррелятора, обусловленных его чувствительностью к таким искажениям.

Рассмотрим процесс фильтрации на основе схемы безлинзовой фурье-голографии (рис. 1). В результате регистрации интерференционной картины опорного поля

$$\Omega = a_0 \exp \{-ikr_0\} \quad (1)$$

и поля предмета

$$G = \sum_{q=1}^N a_q \exp \{-ik(r_0 + \rho_q)\}, \quad (2)$$

представленного ансамблем N вторичных излучателей — оптических ретрансляторов (ОР) [5, 6], где a_0, a_q — амплитуды опорного поля и полей ОР с соответствующими индексами в области наблюдения; r_0 — радиус-вектор опорного источника относительно центра голограммы, а ρ_q — радиус-вектор q -го ОР относительно опорного источника, формируется дифракционная структура голограммы-фильтра, которой удобно поставить в соответствие матрицу $(N+1)$ -го ранга:

$$|\Omega + G|^2 = \begin{bmatrix} |\Omega|^2 & \Omega^*G \\ G^*\Omega & |G|^2 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

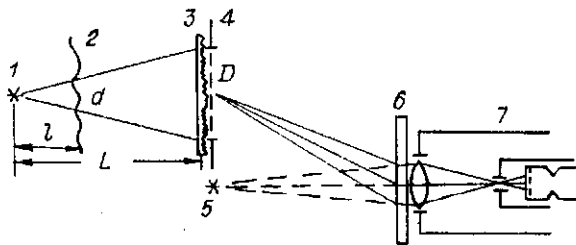


Рис. 1. Схема оптического коррелятора с голограммой в роли фильтра:

1 — освещающий источник, 2 — фазовый экран, 3 — объект, 4 — диафрагма, 5 — корреляционный пик, 6 — голограмма-фильтр, 7 — детектор (фотометр); $L = 25$ см, $D = 1$ см, $S_0 \sim 0,25$ см²

Процесс фильтрации состоит в считывании голограммы объектным полем в отсутствие опорного источника, фантомное изображение которого является корреляционным откликом. Если на вход фильтра (3) подается поле (2), то на выходе (среди прочих) восстановится составляющая

$$\{G^*Q\}G = \{G^*G\}Q = Q \sum_{q=1}^N |a_q|^2 + a_0 \sum_{q \neq p=1}^N \sum_{p=1}^N a_q^* a_p \exp\{-ik(r_0 + \rho_p - \rho_q)\}, \quad (4)$$

где $\{G^*G\}$ — оператор восстановления изображения опорного источника. Согласно теории безопорной голограммы [5], формирование корреляционного пика является следствием эрмитовости этого оператора. Первое слагаемое в правой части (4) соответствует N -кратно усиленному по амплитуде изображению опорного источника, а второе — ореолу, распределенному по площади, вчетверо превышающей площадь предмета, и состоящему из $N(N-1)$ случайно сдвинутых по локализации и фазе парциальных изображений оригинала.

При наличии искажений поле (2) преобразуется к виду

$$Q = \sum_{p=1}^N a_p \alpha_p \exp\{-ik(r_0 + \rho_p)\}, \quad (5)$$

где $\alpha_p = \exp\{i\xi_p\}$ символизирует случайное изменение фаз комплексных амплитуд ОР, ξ_p — приращение фазового угла освещающего поля, а выражение (4) — к виду

$$\{G^*Q\}Q = Q \sum_{q=1}^N a_q^* (a_q \alpha_q) + a_0 \sum_{q \neq p=1}^N \sum_{p=1}^N a_q^* a_p \alpha_p \exp\{-ik(r_0 + \rho_p - \rho_q)\}. \quad (6)$$

Оператор $\{G^*Q\}$ уже не является эрмитовым. Шпур соответствующей матрицы с общим членом $a_q^* a_p \alpha_p$ становится комплексным, и первое слагаемое (6) не описывает амплитуду корреляционного отклика.

Нетрудно видеть, однако, что оператор $\{G^*Q\}$ может быть разложен на эрмитову и неэрмитову составляющие, поскольку $a_p \alpha_p = a_p + (\alpha_p - 1)a_p$. Пока величина $\langle |\alpha_p - 1| \rangle < 1$, корреляционный пик может быть восстановлен. Его амплитуда в рассматриваемом случае уменьшается по сравнению с максимальным значением (получаемым в отсутствие искажений) в

$$1 + \frac{\sum_{q=1}^N (\alpha_q - 1) |a_q|^2}{\sum_{q=1}^N |a_q|^2} \quad (7)$$

раз.

Рассмотрим случай, когда фазовые искажения поля вводятся с целью исследования их влияния на трассе освещающего пучка (см. рис. 1). Геометрические условия эксперимента выбираются таким образом, чтобы введение экрана 2 приводило к чисто фазовой модуляции поля в пространстве предмета 3 при неизменных локализациях и амплитудах ОР.

Запись голограммы-фильтра осуществляется при максимальном смещении фазового экрана к источнику 1. Так как размеры источника малы по сравнению с площадью зоны корреляции фазовых неоднородностей экрана S_0 , освещающее поле «на входе» предмета $A_0 = A \exp\{i\varphi_0\}$ практически не искажено.

На стадии фильтрации фазовый экран может поступательно перемещаться как в осевом, так и в поперечных к оси направлениях. Если фильтрация производится при расположении экрана на расстоянии l от начального положения, то действующая площадь экрана определяется выражением $S \simeq d^2$, где $d = DlL^{-1}$ (см. рис. 1). При этом освещающее поле перекрывается набором из

$$M \simeq \frac{D^2}{S_0} \left(\frac{l}{L}\right)^2 \quad (8)$$

зон корреляции фазового экрана. Амплитуда поля за экраном опишется в виде суммы парциальных полей таких зон:

$$A_0 \sum_{m=1}^M \alpha_m \equiv A_0 \sum_{m=1}^M \exp\{-ik(n-1)h_m\}, \quad (9)$$

где n — показатель преломления вещества фазового экрана; h_m — отклонение глубины рельефа экрана в данной точке от некоторого среднего уровня.

Освещающее поле в пространстве предмета также расчленяется на M зон. В результате дифракции на голограмме-фильтре парциального объектного поля, соотносимого с каждой зоной корреляции, формируется корреляционный пик с фазой, определяемой задержкой $\alpha_m = \exp\{-ik(n-1)h_m\}$ на соответствующей зоне фазового экрана. В зависимости от конкретной физической реализации выражения (9) результат фильтрации, вообще говоря, будет различным. Для статистической оценки влияния дисперсии задержек парциальных сигналов на амплитуду корреляционного пика удобно вместо дискретной суммы использовать интеграл:

$$A = A_0 \int_0^H F(h) \exp\{-ik(n-1)h\} dh, \quad (10)$$

здесь A_0 — амплитуда отклика в отсутствие фазовой модуляции; H — максимальная глубина геометрического рельефа экрана; $F(h)$ — функция распределения зон корреляции по глубине. Универсальное выражение для функции распределения, необходимое для вычисления интеграла (10), отсутствует. Поскольку в рассматриваемом случае, когда $\langle |\alpha_m - 1| \rangle < 1$ (условие существования корреляционного отклика), результат не зависит существенно от конкретного вида $F(h)$, следует ожидать, что при достаточном для статистического усреднения M зависимость мощности корреляционного пика от глубины фазовой модуляции объектного поля (или, что то же, от l^2 — см. (8)) должна иметь характер, близкий к нормальному распределению.

Содержанием экспериментального исследования было: 1) получение вида зависимости относительной интенсивности корреляционного пика от смещения фазового экрана из начального положения; 2) сопоставление результатов оценки дисперсии процесса изменения яркости корреляционного отклика с масштабом фазовых неоднородностей образца, использовавшегося в качестве фазового экрана.

Предметом служил транспарант, подсвечиваемый сквозь диффузор — шлифованное стекло, подготовленное абразивом М-28. В качестве фазового экрана использовались образцы из различных сортов стекол (оптических, покровных, фототехнических и др.). Приводимые ниже данные иллюстрируют типичные результаты, получаемые со стеклянными подложками фотопластинок ЛОИ-2 толщиной 1,3 мм. Рефлектограмма одного из образцов, полученная при его освещении коллимированным пучком когерентного излучения ($\lambda = 633$ нм), показана на рис. 2. Различие в масштабах структурности в направлениях bb и hh позволяет сопоставить скорость ослабления корреляционного отклика с размерами зоны однородности экрана вдоль этих направлений.

Запись голограммы-фильтра осуществлялась при различном расположении фазового экрана: в фокальной плоскости линзы, формирующей освещающий

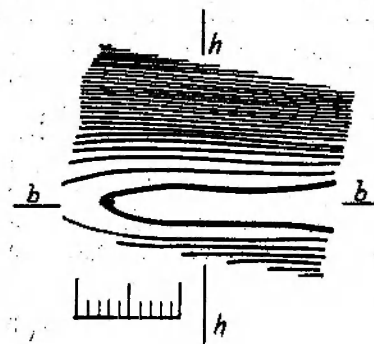


Рис. 2. Рефлектограмма образца, используемого в качестве фазового экрана. Масштаб 1 см

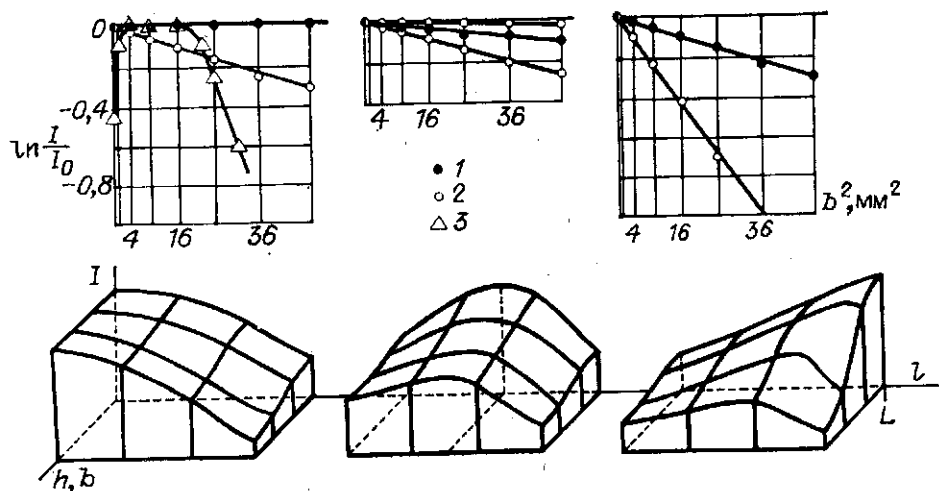


Рис. 3. Зависимости интенсивности корреляционного отклика от смещения фазового экрана из начального положения.
 Вверху (слева направо) — поперечные характеристики при $l_0 = 0, 5, 25$ см; 1 — $l = l_0$; 2 (слева направо) — $l - l_0 = 7, \pm 3, 7$ см; 3 — смещение вдоль оси hh при $l - l_0 = 7$ см; внизу — соответствующие объемные «тела яркости» корреляционного пика в функции продольного и поперечного смещений

пучок, — $l_0 = 0$, вплотную к предмету — $l_0 = L$ либо, наконец, в некотором промежуточном положении — $0 < l_0 < L$. Считывание производилось полем предмета при расположении экрана, соответствующем условиям записи, а также при его смещении на различные расстояния $l - l_0$ по оси пучка. В каждой позиции l снималась серия отсчетов для поперечных смещений экрана. Вся совокупность отсчетов (около 500 в каждой серии измерений) нормировалась по максимальному, соответствующему неизменной геометрии записи и считывания.

В результате этих экспериментов было установлено, что интенсивность корреляционного отклика как функция продольного смещения фазового экрана из начального положения описывается экспоненциальной формулой вида

$$I = I_0 \exp \{ -(l - l_0)^2 / \beta \}, \quad (11)$$

где β — экспериментально определяемый параметр.

Аналогичный характер (но с иным значением β) имеет зависимость интенсивности корреляционного пика от величины смещения экрана в поперечных направлениях. При построении графика удобно откладывать по оси абсцисс значения $(l - l_0)^2$, а по оси ординат — $\ln I/I_0$. Логарифмируя соотношение (11), замечаем, что эти величины связаны линейно, модуль тангенса угла наклона β прямой характеризует дисперсию исследуемого процесса.

Обработанные таким образом результаты измерений в трех описанных группах экспериментов представлены на рис. 3. В верхней части приведены графики для поперечных сдвигов фазового экрана, показанного на рис. 2, при его локализации в различных «сечениях» освещающего поля. Поперечное смещение экрана при $l = l_0 = 0$ не влияет на интенсивность корреляционного пика; такое же смещение при $l_0 \neq 0$ и $l \neq l_0$ приводит к снижению его яркости. Если есть основания считать процесс на трассе освещающего пучка, приводящий к изменению фазовой структуры поля, нормальным, то определяемая по изменению корреляционного отклика дисперсия является важнейшей характеристикой, позволяющей по известным формулам [2] найти корреляционную функцию, структурную функцию и другие статистические параметры. Из рисунка видно, что чувствительность отклика к поперечным смещениям экрана возрастает по мере приближения его к предмету. При перемещении экрана вдоль линии bb имеет место монотонное угасание корреля-

ционного отклика, что соответствует сравнительно высокой однородности образца вдоль этого направления. Горизонтальный участок графика для перемещения вдоль линии hh , протяженность которого соответствует размеру центральной однородной области образца (ср. с рис. 2), переходит в прямую с отличным от нуля тангенсом угла наклона при возрастании числа зон корреляции экрана, по которым происходит усреднение. Обнаружено, что статистическая закономерность (11) проявляется, если число независимых реализаций, по которым производится усреднение, $M \geq 10$. Аналогичная оценка числа реализаций, допускающего возможность аппроксимации нормальным распределением, получена при исследовании статистики поля в классических изображающих системах [9].

В нижней части рис. 3 показаны объемные «тела яркости» корреляционного пика как функции продольных и поперечных смещений экрана. Образующие объемных фигур описываются нормальным законом распределения, что подтверждает справедливость предложенной модели процесса.

Таким образом, в результате проведенного исследования установлено, что фазовые искажения объектного поля приводят к рассогласованию считывающего поля со структурой голографического фильтра и, как следствие, к снижению яркости корреляционного пика. Голографический коррелятор позволяет осуществлять распознавание в смысле идентификации считывающего и зарегистрированного полей. Поля объектов, принадлежащих к некоторому классу, представляют собой различные реализации случайного процесса, описываемого общими для данного класса статистическими параметрами: средним значением, корреляционной функцией, дисперсией и функцией распределения. Координатное распределение фазовой структуры изменяется от объекта к объекту в пределах класса. Вследствие высокой чувствительности голографического фильтра к фазовым искажениям и связанной с этим свойством его эффективности в задаче идентификации опознавание в смысле групповой классификации объектов посредством такого фильтра не может быть осуществлено, что является существенным ограничением области применимости голографических распознающих устройств. С другой стороны, чувствительность голографического коррелятора к фазовым искажениям освещающего поля (при стабильных условиях внутри коррелятора — на трассе «предмет — фильтр») открывает возможность использовать такой фильтр для диагностики фазовых структур, т. е. при решении обратных задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере.— М.: Наука, 1967.
2. Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2: Случайные поля.— М.: Наука, 1978.
3. Токовинин А. А., Щеглов П. В. Проблема достижения высокого разрешения в наземной оптической астрономии // УФН.— 1979.— 129, № 4.
4. Волнистова Л. И., Дрофа А. С. Влияние рассеивающей среды на качество оптического изображения // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.— 1985.— 21, № 1.
5. Ковальский Л. В., Полянский В. К. Исследование возможностей метода голографии без использования опорного пучка // Оптика и спектроскопия.— 1970.— 28, № 2.
6. Полянский В. К., Ковальский Л. В., Ангельский О. В. Голографическое изображение объекта в лучах, прошедших через рассеивающий слой // Укр. физ. журн.— 1980.— 25, № 10.
7. Юу Ф. Т. С. Введение в теорию дифракции, обработку информации и голографию.— М.: Сов. радио, 1979.
8. Мохунь И. И., Полянский В. К., Протасевич В. И., Яценко В. В. Влияние фазовых неоднородностей на свойства оптического тракта // Автометрия.— 1982.— № 2.
9. Устинов Н. Д., Матвеев И. Н., Протопопов В. В. Методы обработки оптических полей в лазерной локации.— М.: Наука, 1983.

Поступила в редакцию 4 декабря 1987 г.