

Кросс-корреляционная голография с кодированным опорным пучком (перспективы развития и применения)

В работе кратко рассмотрены свойства голографической корреляционной схемы общего вида в аспекте возможного использования в спецзадачах. Так, полагается, что при записи один из интерферирующих на голограмме пучков может подвергаться целенаправленной кодировке амплитудно-фазовыми транспарантами. Анализируются экспериментальные ситуации, когда записывающий и восстанавливающий пучки имеют различия. Практические возможности корреляционной схемы иллюстрируются несколькими примерами, которые могут иметь перспективы для задач спецтехники.

1. ВВЕДЕНИЕ

Голографические методы формирования лазерных полей с требуемыми свойствами находят широкое применение во многих задачах научного, технического и специального характера. Предпосылками такого применения служат фундаментальные свойства голографии, позволяющие регистрировать распределения амплитуды и фазы оптических полей и вытекающие из этого уникальные возможности анализа и синтеза требуемых оптических сигналов [1]. Важным свойством голографической системы является корреляционный характер образования результирующего сигнала, который связан с тем, что он формируется в результате наложения нескольких полей при записи и восстановлении голограммы. Поэтому он определяется произведением нескольких функций распределения поля лазерных пучков, включая целенаправленно преобразованные. Это свойство оказывается полезным при использовании голографических схем кодировки и распознавания оптической информации или же при формировании лазерных пучков с требуемыми пространственными и угловыми характеристиками.

В данной работе показано, каким образом открывающаяся возможность определенного маневра свойствами используемых полей и их изменением может быть полезна при решении практических задач. С этой целью проводится краткий анализ возможных свойств голографической корреляционной системы и приводятся некоторые экспериментальные результаты, которые могут привлечь внимание разработчиков спецтехники.

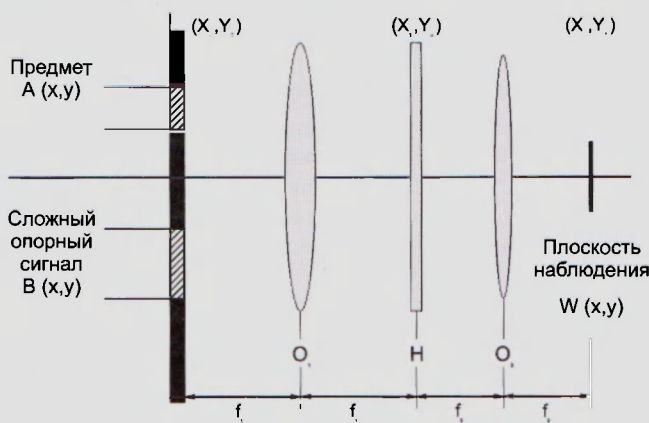


Рис. 1

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Рассмотрение основано на свойствах известной схемы Фурье-голографии [2]. Акцентируется возможность целенаправленно изменять амплитудно-фазовые характеристики пучка, считывающего голограмму, по сравнению с использовавшимся при записи. Эти пучки можно считать опорными, если обобщить понятие простого стационарного опорного пучка. Схема в эквивалентном виде сводится к телескопической системе, показанной на рис. 1.

Система состоит из двух объективов O_1 и O_2 , которые выполняют операции прямого и обратного Фурье-преобразования над распределениями полей в их передних фокальных плоскостях. Задняя фокальная плоскость первого объектива совпадает с передней фокальной плоскостью второго. Фокусные расстояния объективов определяют линейное увеличение полученных изображений. Для простоты они полагаются равными.

В передней фокальной плоскости (x_1, y_1) объектива O_1 располагаются амплитудно-фазовые транспаранты $A(x_1, y_1)$ и $B(x_1, y_1)$, которые формируют опорный и сигнальный пучки. Их роль, естественно, могут играть и другие оптические сигналы, подлежащие обработке на корреляторе, например, поля на выходе световода, лазерные поперечные моды и т.п. В средней фокальной плоскости (x_2, y_2) в момент t_1 проводится запись голограммы H при интерференции полей угловых спектров сигнального ω_A и опорного ω_B пучков

$$\omega_A(x_2, y_2, t_1) = F\{A(x_1, y_1, t_1)\} \text{ и } \omega_B(x_2, y_2, t_1) = F\{B(x_1, y_1, t_1)\}$$

F - оператор Фурье-преобразования.

В задней фокальной плоскости (x_3, y_3) второго объектива в момент t_2 происходит формирование изображения $W(x_3, y_3, t_2)$.

Согласно уравнению голограммы ее пропускание $H(x_2, y_2, t_1)$ пропорционально интенсивности интерференционного поля пучков ω_A и ω_B :

$$H(x_2, y_2, t_1) \sim |\omega_A + \omega_B|^2 = |\omega_A|^2 + |\omega_B|^2 + \omega_A^* \cdot \omega_B + \omega_A \cdot \omega_B^* \quad (1)$$

где $*$ - оператор комплексного сопряжения.

При восстановлении голограммы, например, пучком $A'(x_1, y_1, t_2)$, в общем случае отличающимся по структуре от поля $A(x_1, y_1, t_1)$, в одном из дифракционных порядков голограммы формируется поле, которое на основании теоремы свертки можно в плоскости (x_3, y_3) представить в форме:

$$W(x_3, y_3, t_2) = F\{\omega_A \cdot \omega_A^* \cdot \omega_B\} = A'(x_3, y_3, t_2) * A^*(x_3, y_3, t_1) \otimes B(x_3, y_3, t_1) \quad (2)$$

где * и \otimes – обозначают операции корреляции и свертки.

При детализации корреляционного соотношения (2), из него можно получить ряд следствий, важных в практическом отношении.

3. ПРИМЕНЕНИЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СХЕМЫ

Соотношение (2) носит слишком общий характер. Оно показывает, что для применения в голографических задачах необходимо конкретизировать структуру полей – участников соотношения и, что более важно, целенаправленно изменять их свойства для достижения требуемого результата. Далее приводится ряд примеров, в которых осуществлен подобный подход. Некоторые уже стали традиционными, другие пока еще ожидают внедрения. Приведенная классификация подчеркивает их единый научный корень и, по-видимому, указывает на сопоставимый практический потенциал. Мы ограничиваемся только кратким описанием экспериментальной ситуации для осуществления каждого примера, не останавливаясь подробно на детальном корректном математическом описании.

3.1. ПОЛУЧЕНИЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ КОПИИ ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

3.1.a. Общая схема Фурье-голографии

Эта схема является фундаментальной для получения голографических изображений [2] и соответствует ситуации, когда $B(x_1, y_1, t_1)$ описывает произвольный оптический сигнал, требующий воспроизведения, а $A'(x_1, y_1, t_2) = A(x_1, y_1, t_1) = \delta(0,0)$, где $\delta(0,0)$ обозначает функцию, которая аппроксимирует точечный источник излучения. Такой источник формирует плоскую опорную волну в плоскости записи голограммы. При этих условиях соотношение (2) приобретает вид:

$$W(x_3, y_3, t_2) = \delta(0,0) \otimes B(x_3, y_3, t_1),$$

то есть описывает голографическую копию поля $B(x_1, y_1, t_1)$.

3.1.b. Компенсация протяженности опорного источника

Этому случаю соответствует ситуация, когда выражение $A'(x_1, y_1, t_2) = A(x_1, y_1, t_1)$ описывает произвольное распределение поля. Тогда в (2) соотношение $(A' * A^*) = |A|^2$ представляет собой пространственную автокорреляционную функцию поля A. Она содержит интенсивный центральный δ -подобный максимум. Таким образом, для любого распределения поля $B(x_1, y_1, t_1)$ получаем с определенной точностью его копию:

$$W(x_3, y_3, t_2) = |A|^2 \otimes B \approx \delta(0,0) \otimes B(x_3, y_3, t_1).$$

3.1.v. Криптографическая схема с кодированным опорным пучком

Она является частной реализацией предыдущего случая. При этом полагается, что распределение поля $A'(x_1, y_1, t_2) = A(x_1, y_1, t_1)$ подвергается намеренному усложнению за счет пространственной модуляции амплитудно-фазовым кодирующим транспарантом $M(x_1, y_1)$. Соответственно:

$$W(x_3, y_3, t_2) = |A \cdot M|^2 \otimes B \approx \delta(0,0) \otimes B(x_3, y_3, t_1)$$

Получение копии поля – его дешифровка – возможно только при использовании в опорном пучке одного и того же кодирующего модулятора.

3.2. КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ОБРАБОТКА ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

3.2.a. Распознавание фрагментов изображения

Корреляционная схема позволяет осуществлять анализ сложного оптического сигнала и исследовать его структуру. Главной задачей является идентификация отдельного фрагмента $a_n(x_n, y_n)$ на фоне сложного оптического

изображения $\sum_{n=1}^N a_n$. Ее решение может осуществляться

двумя способами [3] с формально эквивалентной записью соотношения (2). В одном используется распределение полей

$$\text{вида } A(x_1, y_1, t_1) = \sum_{n=1}^N a_n; A'(x_1, y_1, t_2) = a_n; B(x_1, y_1, t_1) = \delta(0,0)$$

Другой соответствует случаю $A(x_1, y_1, t_1) = \sum_{n=1}^N a_n; B(x_1, y_1, t_1) = a_n$

и считываемому пучку $A'(x_1, y_1, t_2) = \delta(0,0)$. В обоих случаях результирующий сигнал описывается соотношением

$$W(x_3, y_3, t_2) = \sum_{m=1}^M (a_m^* * a_n) \otimes \delta(0,0) = \delta(x_n, y_n) + \sum_{m \neq 1}^M (a_m^* * a_n) \otimes \delta(0,0)$$

Он представляет собой яркую световую точку – максимум пространственной автокорреляционной функции искомого фрагмента – расположенную на том же месте полного изображения, где находился сам фрагмент. Остальные слабые создают фоновую засветку.

3.2.b. Коррелятор с ассоциативным откликом [4]

Важной задачей является определение полного

оптического сигнала $\sum_{n=1}^N a_n$ при наличии только части его

фрагментов $\sum_{m=1}^M a_m$ ($m < n$). В обозначениях это соответствует

$$\text{ситуации, когда } A(x_1, y_1, t_1) = B(x_1, y_1, t_1) = \sum_{n=1}^N a_n; A'(x_1, y_1, t_2) = \sum_{m=1}^M a_m.$$

Полученное изображение описывается соотношением

$$W(x_3, y_3, t_2) = \begin{pmatrix} a_1 * a_1 & a_1 * a_2 & \dots & a_1 * a_N \\ a_2 * a_1 & a_2 * a_2 & \dots & a_2 * a_N \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_N * a_1 & a_N * a_2 & \dots & a_N * a_N \end{pmatrix} \otimes \sum_{n=1}^N a_n$$

Диагональные члены матрицы описывают сумму пространственных автокорреляционных функций полей отдельных фрагментов. Они формируют полное изображение сигнала, однако на фоне помех, обусловленных перекрестными членами.

На рис.2 показаны фотографии изображений при ассоциативном отклике корреляционной системы. Для сравнения приводятся фотографии считывающих фрагментов.

3.3. КОРРЕЛЯЦИОННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ

Целый ряд задач требует транспортировки или концентрации лучистой энергии в объеме или плоскости пространства. Для этого формируются пучки с минимальной расходимостью излучения, которая не зависит от возможных изменений исходного поля. Конечным результатом должно быть «изображение» точечного источника $\delta(0,0)$, который формируется независимо от структуры записывающих и считывающих пучков. Применение задачи 3.1.a в этом случае [5] не вполне корректно, поскольку,

если $A'(x_1, y_1, t_2) = A(x_1, y_1, t_1)$ и $B(x_1, y_1, t_1) = \delta(0,0)$,

$$\text{то } W(x_3, y_3, t_2) = |A|^2 \otimes \delta(0,0) = |A|^2 \approx \delta(0,0).$$

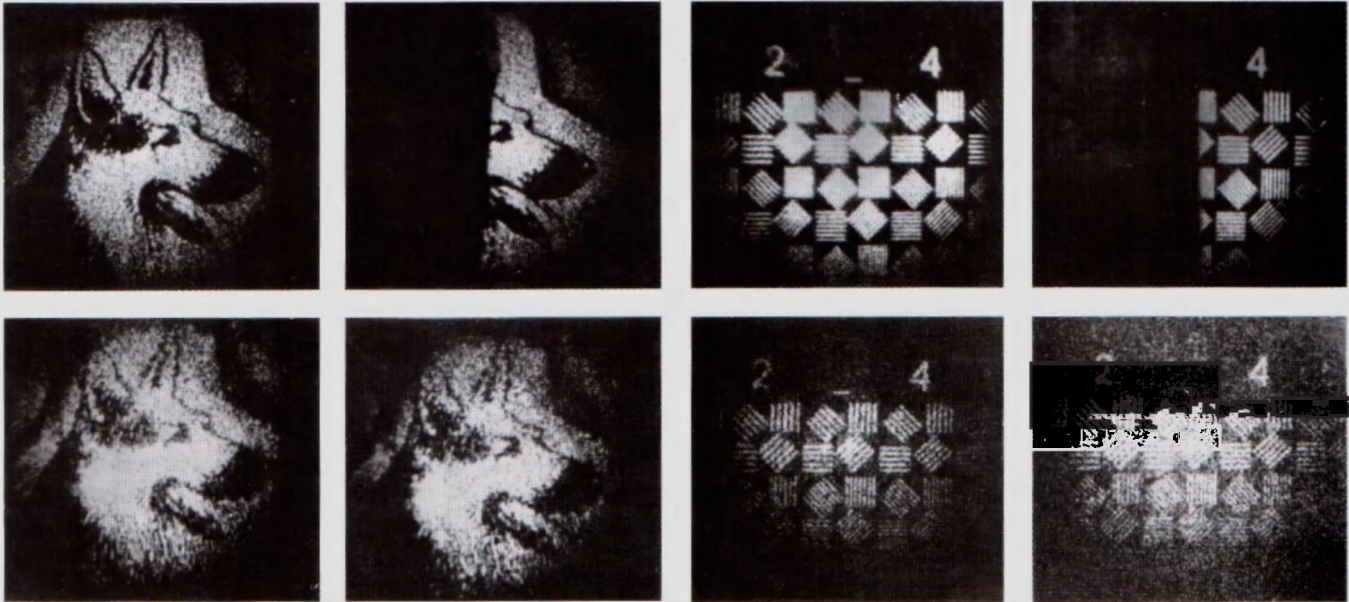


Рис. 2

Распределение полученного поля описывается пространственной автокорреляционной функцией сложного пучка A . Влияние структуры A на конечный результат необходимо в максимальной степени уменьшить.

3.3.a. Стабилизация формы диаграммы направленности лазерного пучка [6]

Если пучки A и A' подвергнуть предварительной пространственной фазовой (для уменьшения потерь энергии) модуляции при помощи диффузно рассеивающего транспаранта $M(x_1, y_1)$, то выходной сигнал корреляционной системы описывается соотношением

$$W(x_3, y_3, t_2) = A' \cdot M \cdot A \cdot M^* \otimes \delta(0, 0) = (A' \cdot A^*) \cdot |M|^2 \otimes \delta(0, 0) = \delta(0, 0)$$

Роль модулятора, таким образом, состоит в том, чтобы подавить влияние пространственной структуры распределения $(A' \cdot A^*)$ в точке формирования пучка. Однако, такое влияние проявляется в энергетике сформированного пучка, поскольку амплитуда сформированного поля определяется значением $A'(0, 0, t_1) \cdot A^*(0, 0, t_2)$.

На рис. 3 представлены фотографии сложных поперечных мод газового лазера, преобразованных по указанной схеме. Приводятся также нормированные на максимум распределения энергий в сформированных пучках.

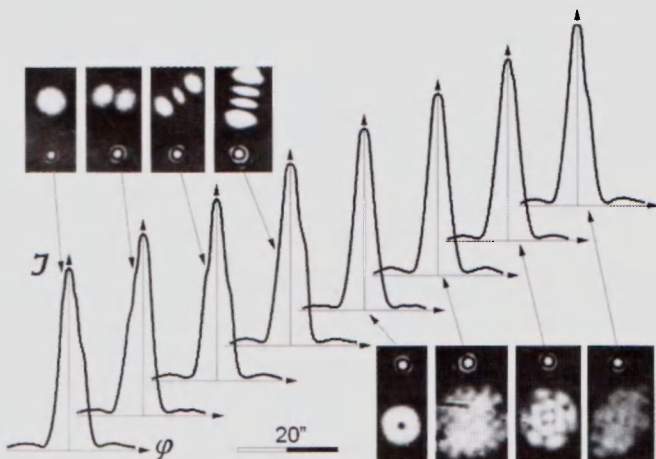


Рис. 3

3.3.б. Коррелятор с дискретным представлением сигнала [7]

Описанная в 3.3.a система с модуляцией опорного пучка может использоваться в схеме корреляционной обработки сложных оптических сигналов. Действительно, в соотношении $W(x_3, y_3, t_2) = (A' \cdot A^*) \cdot |M|^2 \otimes \delta(0, 0)$ сомножитель $|M|^2$ можно рассматривать как своеобразный усилитель сигнала, который перераспределяет энергию сформированного поля в точки максимумов пространственной автокорреляционной функции модулятора. В случае диффузного модулятора это центральная точка корреляционного распределения $(A' \cdot A^*)$. Могут быть выделены и другие точки, например, расположенные периодически в случае периодического модулятора.

На рис. 4 показаны фотографии после оптической корреляционной обработки функций Эрмита-Гаусса, полученные с периодическим усилением сигнала и (для сравнения) без него.

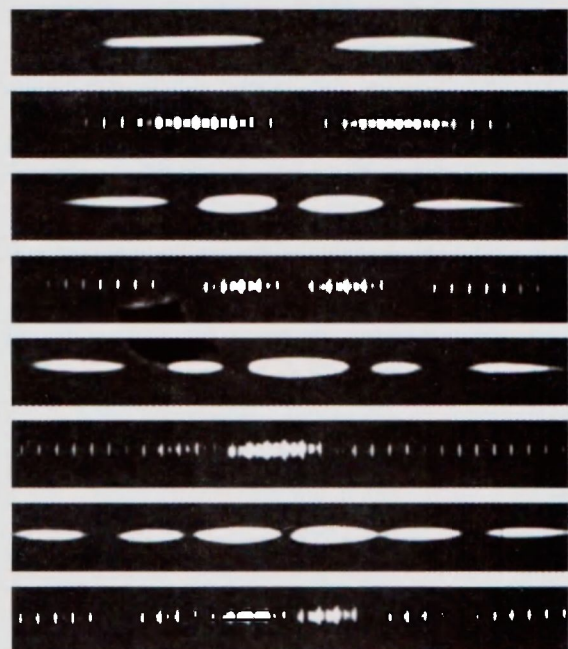


Рис. 4

3.3.в. Формирование сложных диаграмм направленности

Задачи 3.3.а и 3.3.б позволяют поставить и решить общую задачу формирования лазерного пучка со сложной диаграммой направленности. Для этого необходимо совместить функциональное воздействие сомножителей ($A^* \cdot A^*$) и ($M \cdot M^*$). Следует использовать различающиеся модуляторы волнового фронта при записи и воспроизведении голограммы. Структура модуляторов выбирается такой, чтобы корреляционное соотношение $M(x_3, y_3, t_1) \cdot M^*(x_3, y_3, t_2)$ описывалось требуемой функцией. Наиболее простым решением будет случай, когда структура одного модулятора описывает распределение, автокорреляционная функция которого формирует точку, а структура другого повторяет это же распределение в требуемой конфигурации. Тогда произойдет корреляционное распознавание каждого участка в сложном распределении. В результате этого сформируется распределение из автокорреляционных максимумов, т.е. δ -функций, повторяющее требуемую конфигурацию диаграммы направленности.

На рис. 5 показаны структуры модуляторов на основе зонных пластинок Френеля, которые позволяют осуществить описанную идею, а также полученные пучки с соответствующими диаграммами направленности.

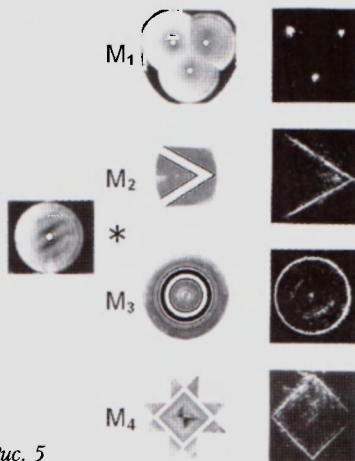


Рис. 5

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе с единых позиций были рассмотрены вопросы применения голографической корреляционной схемы. Показано, что известные к настоящему времени задачи обработки оптических сигналов и формирования лазерных пучков являются частными решениями общего корреляционного соотношения для трех когерентных пучков. Усложнение структуры поля одного или двух из них позволяет выявить дополнительные полезные характеристики поля, сформированном в выходном изображении.

Анализ свойств голографического коррелятора указывает на целесообразность разработки и создания единого многофункционального когерентно-оптического процессора, который способен одновременно решать широкий круг вопросов, связанных с обработкой и преобразованием оптической информации в специальных задачах.

Литература:

1. Кольтер Р., Берксхарт К., Лин Л. Оптическая голография. – М.: "Мир", 1973.- 686 с.
2. Струок Дж. Введение в когерентную оптику и голографию. – М.: "Мир", 1967.- 347 с.
3. Василенко Г.И. Голографическое опознавание образов. – М.: "Сов. радио", 1977.- 327 с.
4. Гнатовський О.В., Золочевська О.В., Шпак М.Т. Кореляційне відновлення голографічних зображень.// Укр. фіз. журнал, 1994.- т.39, № 11,12.- с.1075-1079.
5. Гнатовский А.В., Соскин М.С., Бондаренко М.Д. Голографический метод преобразования когерентных световых полей. ДАН СССР, т.187(3) 1967, с.116-118.
6. Гнатовский А.В., Зубрилин Н.Г., Медведь Н.В. и др. Применение метода статистической модуляции фазы поля для формирования остронаправленных световых пучков.// Укр. физ. журнал. – 1978, т.23, № 3.- с. 525-527.
7. Gnatovsky O.V., Zolochevskaja O.V., Loginov A.P., Yarovoj L.K. The signal discrete representation and processing in holographic correlator. //SPIE, v.3055, 1996.- p.186-192,