

07;12

## Характеристики фотополимерных голографических согласованных фильтров в корреляторе Ван-дер-Люгта

© П.В. Ежов, Т.Н. Смирнова, Е.О. Тихонов

Институт физики НАН Украины,  
252650 Киев, Украина  
E-mail: Ezhov@iop.kiev.ua.

(Поступило в Редакцию 19 октября 1999 г. В окончательной редакции 14 июня 2000 г.)

Приведены результаты исследований параметров голографических согласованных фильтров фазовых и амплитудных транспарантов, в том числе фазовых масок со случайным распределением элементов, в корреляторе Ван-дер-Люгта. Определены условия записи таких фильтров на фазовом самопроявляющемся фотополимере. Отмечено существенное различие условий записи голографических фильтров для амплитудных транспарантов и фазовых масок. Показано, что голографические фильтры фазовых масок с отношением сигнал/шум в диапазоне 20–40 dB и  $\eta$  от 6 до 70%, записанные на фотополимерной композиции, могут эффективно применяться в оптических системах распознавания образов.

### Введение

В настоящее время для решения ряда задач оптического распознавания образов широко применяются корреляторы Ван-дер-Люгта и корреляторы совместного фурье-преобразования (СФП). Они позволяют решать задачи выделения оптическими методами определенных признаков в изображениях или нахождения идентичных изображений из их множества [1,2]. Очевидные положительные черты, присущие СПФ корреляторам, такие как простота перестройки с одного признака сравнения на другой, возможность применения математической обработки совместно с компьютерным расчетом двумерного распределения интенсивности в корреляционной плоскости, определили их преимущественное применение для решения задач, указанных выше. В частности, применительно к СПФ корреляторам, была успешно решена задача определения идентичности изображений по вносимому отличительному признаку [3–6].

Отличительный признак создавался наложением на изображение специальной фазовой маски (ФМ), выступающей в качестве кодирующего элемента. Привлекательным моментом является возможность с помощью ФМ привносить в комплексные амплитуды предметных световых полей трудно воспроизводимые дополнительные комплексные распределения амплитуд [6]. Следует отметить, что проблема распознавания определенных признаков изображений либо самих изображений при условии, что поиск ведется в большом массиве данных, может быть эффективно решена и в классическом корреляторе Ван-дер-Люгта. Проведенные нами исследования записи фурье-голограмм фазовых масок на самопроявляющихся фотополимерах [7] выявили ряд интересных особенностей относительно условий получения предельных значений дифракционной эффективности и отношения сигнал/шум (ОСШ), что стимулировало развитие исследований по применению данных сред в качестве голографических согласованных фильтров.

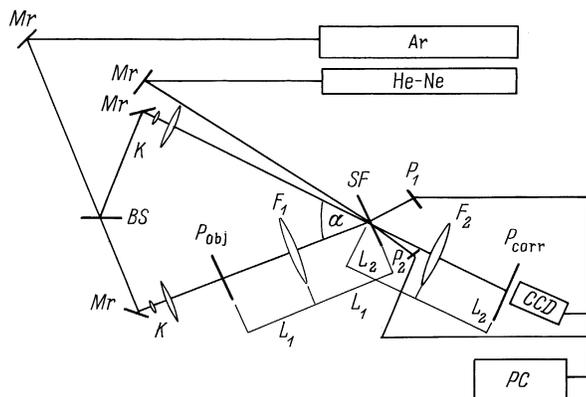
Все сказанное явилось достаточным основанием для проведения более широких исследований параметров корреляционных сигналов как фазовых, так и амплитудных транспарантов в корреляторе Ван-дер-Люгта с использованием фотополимерного носителя в качестве среды для записи согласованных голографических фильтров в реальном времени и "in situ".

Основное внимание в данной работе уделялось изучению корреляционных сигналов и условий записи голографических согласованных фильтров (ГСФ) ФМ с заданными распределениями фазовых элементов в виде фазовых ступенек высотой  $\pi$  (для определенной длины волны) по двум очевидным причинам. Во-первых, в силу специфики ФМ замена одной маски на другую, отличающуюся от исходной расположением фазовых элементов, общее количество которых может достигать  $10^5$  и более, при согласованной пространственной фильтрации не приводит к появлению кросс-корреляционных сигналов. Поэтому полученные результаты могут в дальнейшем использоваться при решении задач защиты и идентификации изображений в корреляторе Ван-дер-Люгта. Кроме того, ФМ обеспечивает высокую однородность пространственного распределения интенсивности в фурье-спектре и, как следствие, возможность записи высокоэффективных ГСФ.

С целью расширения класса изучаемых объектов исследованы условия получения ГСФ и корреляционных функций для транспарантов, чьи пространственные частоты ( $\xi$ ) лежат в пределах  $0-20 \text{ mm}^{-1}$ , а распределение интенсивности в их фурье-спектрах неоднородно.

### Архитектура коррелятора и эксперимент

Пространственные голографические согласованные фильтры записывались излучением  $\text{Ar}^+$  лазера с длиной волны  $\lambda = 476.0 \text{ nm}$  в стандартной схеме Ван-дер-Люгта (рис. 1). Диаметры коллимированных референтного и объектного пучков составляли  $D_r = D_{\text{obj}} = 15 \text{ mm}$ .



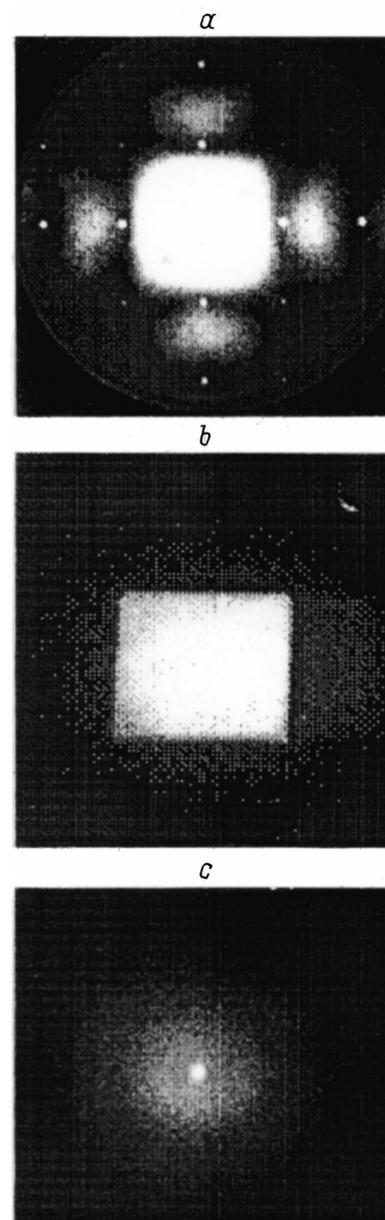
**Рис. 1.** Схема коррелятора Ван-дер-Люгта с системой регистрации:  $Mr$ ,  $Bs$ ,  $K$ ,  $\alpha$  — зеркала, делитель пучка, коллиматоры с пространственной фильтрацией, угол схождения пучков соответственно;  $P_{obj}$ ,  $P_{corr}$  — объектная и корреляционная плоскости;  $F_1$ ,  $F_2$  — первый и второй фурье-объективы;  $L_1$  и  $L_2$  — их фокусные расстояния;  $SF$  — согласованный пространственный фильтр;  $CCD$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $PC$  — ПЗС камера, фотодиоды системы регистрации, персональный компьютер;  $Ar$ ,  $He-Ne$  — лазеры.

Фурье-спектр формировался объективом  $F_1$  с разрешением не хуже  $100 \text{ mm}^{-1}$  и фокусным расстоянием  $L_1 = 220 \text{ mm}$ . В качестве голографической регистрирующей среды применялась фотополимерная композиция (ФПК-488) [8–10]. Спектральный диапазон светочувствительности данного фотополимера  $\lambda = 400\text{--}515 \text{ nm}$ , характерное время записи  $1\text{--}2 \text{ min}$  при плотности мощности излучения  $I = 8 \text{ mW/cm}^2$ . Перед экспозицией исходно-жидкий слой ФПК помещался между стеклянными подложками, толщина слоя задавалась калиброванными тефлоновыми прокладками. Для снижения уровня шумов применялась предполимеризация слоя с использованием некогерентной однородной засветки УФ излучением (до  $1 \text{ min}$ ).

Угол между референтной и объектной волнами для средней пространственной частоты объекта  $\alpha$  составлял  $18^\circ$ , толщина слоя ФПК  $d = 25 \mu\text{m}$ . При данных условиях (параметр Кука–Клейна  $Q_2 > 10$ ) записывались голографические фильтры преимущественно толстые, что обеспечивало их высокую дифракционную эффективность. Дифракционная эффективность  $\eta$  определялась как отношение  $P_d/(P_d + P_r)$ , где  $P_d$  — мощность дифрагированной части тестирующего пучка  $He-Ne$  лазера, а  $P_r$  — мощность части пучка, не испытавшего дифракцию. Дифракционная эффективность контролировалась в процессе записи голографических фильтров системой регистрации, включающей в себя фотодиоды  $P_1$  и  $P_2$ , аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и интерфейс.

Преимуществом использования в корреляторе самопроявляющегося фотополимера по сравнению с известными фотополимерами фирмы Du Pont [11] является отсутствие постэкспозиционной обработки, что упрощает технологию изготовления фильтра.

После формирования ГСФ опорный пучок перекрывается, фотодиоды системы регистрации выводятся из схемы рис. 1 и осуществляется согласованная пространственная фильтрация выбранного транспаранта поданного во входную плоскость  $P_{obj}$  коррелятора. Сигнал в корреляционной плоскости  $P_{corr}$  (рис. 1) регистрировался камерой (в которую входил прибор с зарядовой связью (ПЗС)), работающей в линейном режиме, оцифровывался АЦП и мог быть записан в виде стандартного графического файла. Мерой эффективности голографического согласованного фильтра при распознавании



**Рис. 2.** Распределение интенсивности в фурье- и корреляционных плоскостях для ФМ 1:  $a$  — фурье-спектр ФМ 1,  $b$  — сигнал автокорреляции ФМ 1,  $c$  — зависимость интенсивности от координаты в центральном сечении двумерного распределения сигнала автокорреляции ФМ 1.

образцов принималась стандартная величина — отношение сигнал/шум, которое определяется так:

$$\mu = 10 \ln(I_{\text{autocorr}}/I_n), \quad (1)$$

где  $I_{\text{autocorr}}$  — интенсивность автокорреляционного максимума;  $I_n$  — интенсивность шума, где под шумом в данном случае подразумевается интенсивность компонент сигнала, отличных от автокорреляционных и кросс-корреляционных составляющих.

Максимальное значение ОСШ для функции автокорреляции ФМ, которое с относительной ошибкой, не превышающей 5%, составило 40 дБ.

## Экспериментальные результаты

Учитывая возросший интерес к использованию фазовых масок для защиты изображений [4–6], нами были изучены условия записи ГСФ для ФМ со случайным распределением элементов на ФПК-488. Условия записи ГСФ были выбраны исходя из ранее опубликованных результатов по записи фурье-голограмм на ФПК-488 [7] с уровнем шумов в изображениях, восстановленных с таких голограмм, не превышающем 1%. Типичный результат (фурье-спектр фазовой маски, сигнал распознавания ФМ и центральное сечение двумерного распределения сигнала распознавания) представлен на рис. 2. Отношение сигнал шум  $\mu = 30$  дБ, дифракционная эффективность  $\eta = 21\%$ , отношение интенсивности референтного ( $I_{\text{ref}}$ ) к интенсивности объектного ( $I_{\text{obj}}$ ) пучков составило 20 : 1. Обнаружено, что оптимальные по параметру отношение сигнал/шум, условия записи фурье-голограмм не являются оптимальными по этому параметру при записи ГСФ для ФМ.

Установлено, что при отношении  $I_{\text{ref}} : I_{\text{obj}} = 1 : 1$ , в частотной плоскости дифракционная эффективность  $\eta$  ГСФ при  $\alpha = 18^\circ$  составляет 70%, ОСШ в корреляционной плоскости  $\mu \geq 40$  дБ, хотя отношение сигнал/шум в восстановленном изображении в режиме импульсного отклика составляет  $\mu = -4.77$  дБ. Дальнейшее уменьшение  $I_{\text{ref}}/I_{\text{obj}}$  приводит к возрастанию интенсивности

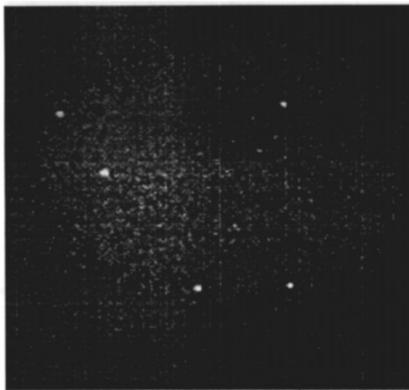


Рис. 3. Кросс-корреляция ФМ 2.

Таблица 1. Характеристики корреляционных сигналов голографических согласованных фильтров фазовых масок

Объекты	Тип объекта	$\xi_{\text{max}}$ объекта, $\text{mm}^{-1}$	$I_{\text{ref}}/I_{\text{obj}}$ , при записи фильтра	$\eta, \%$	$\mu, \text{dB}$	$\mu_0, \text{dB}$
ФМ 1	Фазовый	50	20 : 1	21	30	—
			1 : 1	50	40	—
			1 : 1	70	$\geq 40$	—
ФМ 2	Фазовый	50	1 : 1	20	—	20

шума в корреляционном сигнале. Была сделана попытка измерить ОСШ при предельно малых ( $\eta = 1\%$ ) и предельно больших ( $\eta = 70\%$ ) дифракционных эффективностях ГСФ. Однако в первом случае с данной системой регистрации не удалось зафиксировать шум при уверенной регистрации сигнала корреляции, во втором случае ОСШ превышало 40 дБ, что не позволило корректно определить его величину, так как относительная ошибка для таких измерений превышала 5%. Таким образом, для ГСФ ФМ в диапазоне  $\eta$  от 20 до 50% ОСШ находится в диапазоне 30–40 дБ.

Следует отметить, что при записи толстых фильтров ФМ на ФПК-488 не отмечено влияние усадки слоя и соответствующего изменения угла Брэгга во время записи на интенсивность корреляционных сигналов.

Была проведена оценка ОСШ ГСФ Ван-дер-Люгта по методике, предложенной в работе для голографических фильтров совместного фурье-преобразования [6]. Основанием для этого шага послужило сравнение форм корреляционных сигналов ФМ в корреляторе Ван-дер-Люгта и корреляторе СФП. Центральное сечение двумерного распределения интенсивности в корреляционной плоскости для двух идентичных масок в корреляторе СФП совпадает по форме с кривой автокорреляции, полученной в корреляторе Ван-дер-Люгта.

По определению авторов [6], шумом считается вся кривая, за исключением ее центрального пика (рис. 2, с). Поэтому ОСШ на разных расстояниях, отсчитанных от центрального пика, различно. Используя формулу, приведенную в [6], мы сделали оценку минимального и максимального ОСШ для корреляционного сигнала ФМ

$$\mu = (2N + 1)^2 / (2N + 1 - |n|), \quad (2)$$

где  $N$  общее количество фазовых ступенек;  $n$  — расстояние, выраженное в единицах длины одной фазовой ячейки, отсчитываемое от положения центрального максимума в центральном сечении.

Подставляя количество фазовых ячеек нашей маски  $N = 256$  (одномерный случай), получаем  $\mu_{\text{min}} = 5.14 \cdot 10^2$ ,  $\mu_{\text{max}} = 2.63 \cdot 10^5$ . В случае коррелятора Ван-дер-Люгта достоверно измеренные значения максимального и минимального ОСШ составляют  $10^4$  и  $2 \cdot 10^2$  дБ соответственно, при оценке минимального ОСШ (только для данных оценок) интенсивностью шума

**Таблица 2.** Характеристики корреляционных сигналов голографических согласованных фильтров амплитудных транспарантов и фазовых масок

Объекты	Тип объекта	$\xi_{\max}$ объекта, $\text{mm}^{-1}$	$I_{\text{ref}}/I_{\text{obj}}$ , при записи фильтра	$\eta, \%$	$\mu, \text{dB}$	$I_{\text{autocorr}}/I_{\text{crosscorr}}$
ФМ 1	Фазовый	50	20 : 1	21	30.00	—
Транспарант 2	Амплитудный, набор решеток с различным периодом	25	20 : 1	19	35.32	$5.5 \cdot 10^2$
Транспарант 3	Амплитудный, набор прямоугольных элементов	12	20 : 1	17	27.48	2.15
Транспарант 4	Амплитудный, пейзаж	20	20 : 1	17	24.77	—
Транспарант 5	Амплитудный, упорядоченный набор точечных отверстий	10	20 : 1	6	23.62	$1.4 \cdot 10^2$

считалась вся корреляционная кривая, за исключением центрального максимума. Видно, что для идентичных ФМ данные оценки ОСШ могут быть применены и к фильтрам Ван-дер-Люгта, и в области, где экспериментальные данные получены с меньшей точностью.

Были также проведены эксперименты по регистрации кросс-корреляционных сигналов для ФМ. Для этого

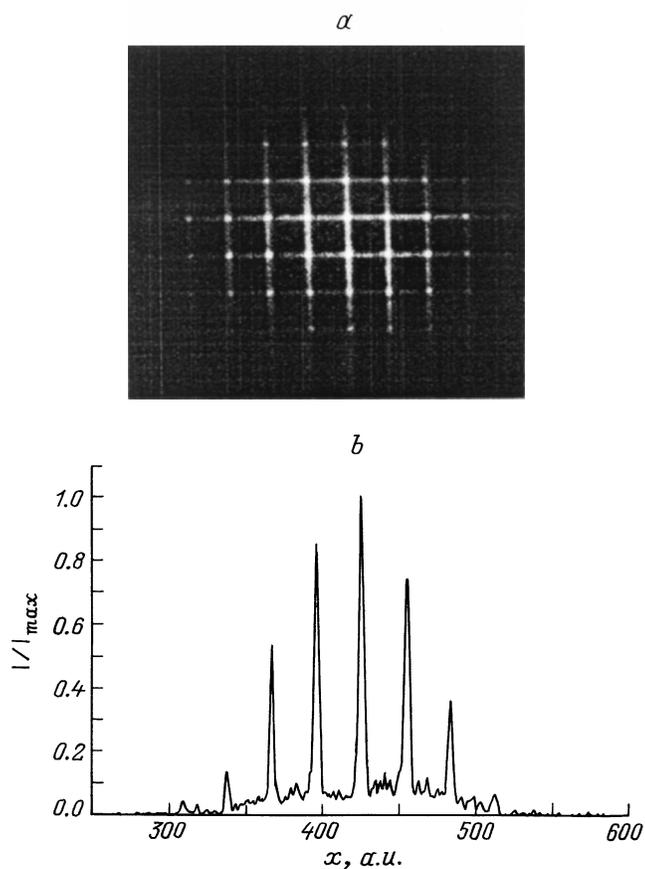
записывалась ГСФ фазовой маски 1, а пространственная согласованная фильтрация проводилась для ФМ 2, которая сформирована из 9 фрагментов исходной маски, переставленных местами. На рис. 3 представлены кросс-корреляционные сигналы ФМ 2, ОСШ составило 20 dB,  $I_{\text{ref}} : I_{\text{obj}} = 1 : 1$ , а в табл. 1 приведено ОСШ ( $\mu_0$ ) для таких сигналов.

Проведенные эксперименты показывают перспективность использования ГСФ для ФМ и ФМ с переставленными фрагментами в качестве кодирующих элементов, где кодом могут служить количество, интенсивность и пространственное расположение корреляционных пиков для коррелятора Ван-дер-Люгта. Указанный подход был реализован в [12] для коррелятора совместного фурье-преобразования.

Обобщая полученные результаты по ГСФ для ФМ и ФМ с переставленными фрагментами (табл. 1), можем сделать вывод, что коррелятор Ван-дер-Люгта с ГСФ, записанными на ФПК-488, при обработке больших объемов информации сравним с коррелятором СФП по скорости обработки данных и достоверности получаемых результатов.

Заметим, что ФМ, как уже отмечалось ранее из-за однородности распределения интенсивности излучения в частотной плоскости, являются идеальными объектами для записи ГСФ.

Для обобщения результатов по пространственной согласованной фильтрации на более широкий класс объектов, в частности на произвольные амплитудные транспаранты, были проведены эксперименты по записи ГСФ для транспарантов, которые характеризуются более узкими полосами пространственных частот и имеющих типичное для фурье-голограмм неоднородное распределение интенсивности в частотной плоскости (табл. 2). Для транспаранта 2 на рис. 4 приведены двумерное распределение интенсивности корреляционного сигнала и центральное сечение двумерного распределения интенсивности как функции интенсивности от координаты. Установлено, что сужение полосы пространственных частот транспарантов приводит к падению эффективности и



**Рис. 4.** Сигнал распознавания для транспаранта 3: *a* — распределение интенсивности в плоскости корреляции, *b* — зависимость интенсивности от координаты в центральном сечении двумерного распределения сигнала автокорреляции.

ухудшению ОСШ записанных ГСФ. Обнаружено также, что сужение полосы пространственных частот транспаранта накладывает ограничение на отношение  $I_{\text{ref}} : I_{\text{obj}}$ . Отношение  $I_{\text{ref}} : I_{\text{obj}} = 20 : 1$  позволяет регистрировать ОСШ корреляционных сигналов для всех указанных транспарантов от 20 dB и выше. В качестве иллюстрации в табл. 2 приведено отношение интенсивности автокорреляционного максимума ( $I_{\text{autocorr}}$ ) к интенсивности первого кросс-корреляционного максимума ( $I_{\text{crosscorr}}$ ) для различных амплитудных транспарантов. Несомненно, что необходим дополнительный анализ формы фурье-спектра объектов как для объяснения столь резких отличий условий записи для ФМ и произвольных транспарантов, так и для анализа отношений ( $I_{\text{autocorr}}/I_{\text{crosscorr}}$ ).

## Заключение

В работе приведены результаты исследований условий записи голографических фильтров Ван-дер-Люгта широкого класса объектов на фотополимерном носителе. Установлено, что отношение интенсивностей опорного и предметного пучков для ГСФ ФМ и ГСФ амплитудных транспарантов при оптимальной записи по уровню шума составляет 1 : 1 и 20 : 1 соответственно. Исследованы параметры корреляционных функций для ГСФ в корреляторе Ван-дер-Люгта. Показано, что при сужении полосы пространственных частот имеют место снижение ОСШ при переходе от ФМ 1 к амплитудным транспарантам для автокорреляции с 40 до 20 dB и падение дифракционной эффективности с 70 до 6%. Для сигнала кросс-корреляции ФМ 2 ОСШ составляет 20 dB. Полученные результаты показывают перспективность применения фотополимерного носителя для кодирования произвольных изображений фазовыми масками.

## Список литературы

- [1] Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. // Оптическая голография. М., 1973. С. 686.
- [2] Применение методов фурье-оптики / Под ред. Г. Старка. М.: Радио и связь, 1988. С. 535.
- [3] Thomas J. Grycevicz. // Opt. Eng. 1999. Vol. 38 (1). P. 114–119.
- [4] Bahram Javidi, Horher J.L. // Opt. Eng. 1994. Vol. 33 (6). P. 1752–1756.
- [5] Bahram Javidi, Guanshen Zhang Jian Li. // Opt. Eng. 1996. Vol. 35 (9). P. 2506–2512.
- [6] Fitio V.M., Muravsky L.I., Stefansky A. // SPIE. 1995. Vol. 2647. P. 224–234.
- [7] Ежов П.В., Смирнова Т.Н., Тихонов Е.А. // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 6. С. 74–77.
- [8] Тихонов Е.А., Смирнова Т.Н., Гольназаров Э.С. // Опт. и спектр. 1989. Т. 67. Вып. 1. С. 175–179.
- [9] Тихонов Е.А., Смирнова Т.Н., Гольназаров Э.С. // Квантовая электрон. Киев: Наукова думка, 1991. № 40. С. 1–25.
- [10] Гольназаров Э.С., Смирнова Т.Н., Тихонов Е.А. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 12. С. 2405–2407.

- [11] Robert W. Branstetter, Nils J. Fonneland. // SPIE. 1991. Vol. 1559. P. 308–320.
- [12] Muravsky L.I., Voronyak T.I., Fitio V.M., Shovgenjuk M.V. // Opt. Eng. 1999. Vol 38 (1). P. 25–32.