

Реализация инвариантных голографических фильтров с линейным фазовым коэффициентом в схеме коррелятора Вандер Люгта

Н.Н.Евтихийев, С.Н.Стариков, Е.Ю.Злоказов, С.А.Сироткин, Р.С.Стариков

Представлены результаты синтеза инвариантных корреляционных фильтров с линейным фазовым коэффициентом, а также экспериментов по распознаванию изображений с использованием этих корреляционных фильтров в схеме когерентного голографического коррелятора.

Ключевые слова: инвариантное различение изображений, оптоэлектронный коррелятор, инвариантный корреляционный фильтр, компьютерно синтезированная голограмма.

1. Введение

Широко известные схемы оптоэлектронных корреляторов в целом ряде случаев имеют существенные преимущества по сравнению с чисто электронными средствами; этим в настоящее время обусловлен интерес к их разработке и применению. Перспективным способом достижения инвариантности корреляции при наличии искажений распознаваемого объекта относительно эталонного (поворот, изменение масштаба и т. п.) является применение инвариантных корреляционных фильтров (КФ) [1].

Реализация КФ в случае оптоэлектронного коррелятора требует решения задачи синтеза дифракционного элемента для формирования комплексного импульсного отклика оптической системы, адекватного фильтру. В этом случае КФ представляется синтезированным дифракционным объектом – статической или формируемой при помощи пространственно-временного модулятора света голограммой. При этом к основным проблемам реализации КФ относятся правильные учёт и согласование ограничений полосы пространственных частот и динамического диапазона реально существующих средств ввода компьютерно синтезированных голограмм. Одним из перспективных типов КФ является составной фильтр с линейным фазовым коэффициентом – LPCC-фильтр (Linear Phase Coefficient Composite filter) [1, 2].

В настоящей работе представлены результаты синтеза LPCC-фильтров и экспериментов по их использованию при корреляционном различении изображений в схеме когерентного голографического коррелятора Вандер Люгта.

2. Составной корреляционный фильтр с линейным фазовым коэффициентом

LPCC-фильтр составляется на основе N эталонных изображений s_0, s_1, \dots, s_{N-1} , выбираемых исходя из требований к инвариантности [2],

Н.Н.Евтихийев, С.Н.Стариков, Е.Ю.Злоказов, С.А.Сироткин, Р.С.Стариков. Московский инженерно-физический институт (государственный университет), Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31; e-mail: rstarikov@mail.ru

Поступила в редакцию 25 мая 2007 г.

$$h_k^*(x, y) = \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left(-i \frac{2\pi}{N} nk\right) s_n(x, y), \quad k = 0, 1, \dots, N-1.$$

Для бинарных контурных изображений LPCC-фильтр обладает высокими характеристиками избирательности благодаря большому отношению сигнал/шум в корреляционном поле. Ранние исследования показали, что для бинарных изображений с плотностью белого около 0.05 можно успешно комбинировать более 20 изображений в одном LPCC-фильтре. По сравнению с другими типами корреляционных фильтров LPCC-фильтр позволяет получить корреляционную функцию, наиболее близкую по своей форме к автокорреляционной. Кроме того, LPCC-фильтр – единственный тип составного фильтра, который не требует инверсии матриц при синтезе и, следовательно, «экономичен» в плане необходимых для его синтеза вычислительных затрат. В отличие от ряда других типов КФ, LPCC-фильтр не может быть сведён к чисто амплитудному либо к чисто фазовому, однако его реализация в виде чисто амплитудного либо чисто фазового дифракционного элемента может быть выполнена способами, использующими идеологию широко известного метода синтеза фильтра Вандер Люгта [3, 4].

3. Синтез голографических фильтров

С использованием имеющегося программного обеспечения [5] был синтезирован LPCC-фильтр, инвариантный к повороту входного объекта в диапазоне $\pm 90^\circ$. В качестве эталонного объекта было использовано бинарное контурное изображение размерности 256×256 пикс. (рис. 1, а). Фильтр был рассчитан на основе 18 изображений эталонного объекта, повернутых с шагом 10° . Распределения амплитуды фильтра и интенсивности корреляции эталонного объекта и фильтра представлены на рис. 1, б, в. Тестовая сцена с изображениями повернутого эталонного объекта в диапазоне $\pm 90^\circ$ с шагом 5° и распределение интенсивности корреляции тестовой сцены и фильтра показаны на рис. 1, г, д.

С помощью имеющегося программного обеспечения [4] для реализации синтезированного LPCC-фильтра в схеме дифракционного коррелятора была рассчитана амплитудная фурье-голограмма. Размерность голограммы 512×512 отсчётов с градациями серого в отсчёте 16 бит

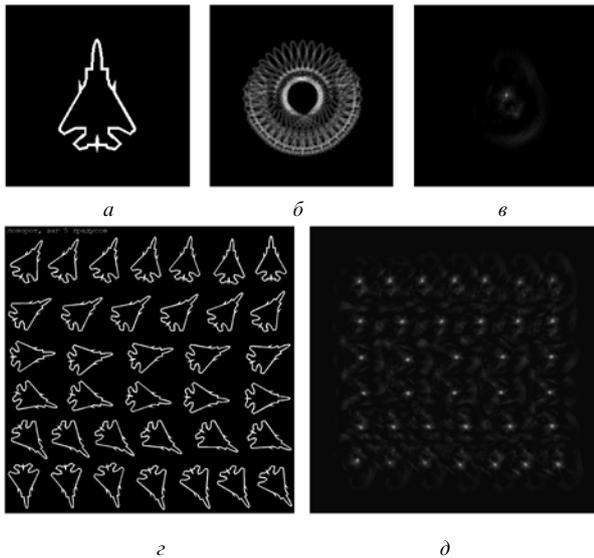


Рис.1. Синтез инвариантного LPCC-фильтра: эталонное изображение (а), амплитуда рассчитанного фильтра (б), амплитуда корреляционной функции фильтра и эталонного изображения (в), сцена с изображениями повернутого эталонного объекта (г), интенсивность корреляционной функции сцены и фильтра (д).

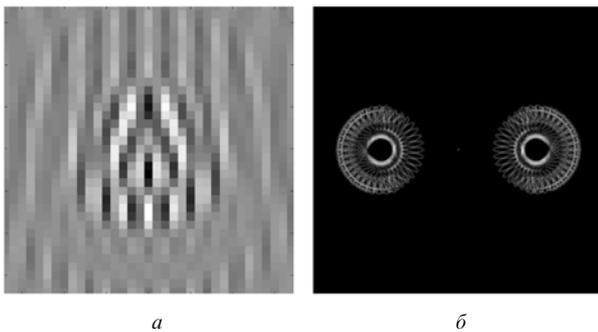


Рис.2. Синтез голограммы: увеличенное изображение центральной части голограммы (а), результат численного восстановления амплитуды импульсного отклика голограммы (б).

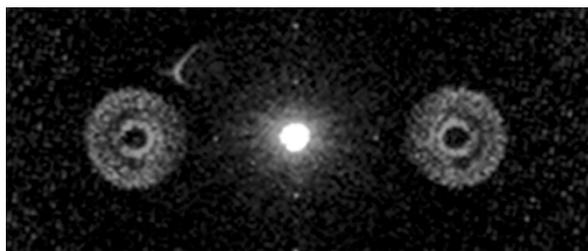


Рис.3. Фото светового поля, восстанавливаемого голограммой.

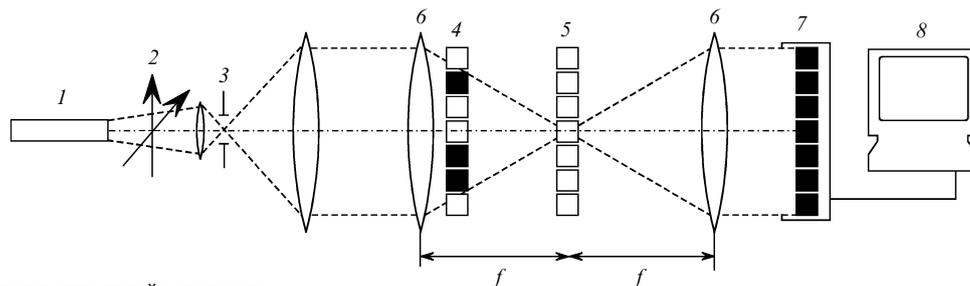


Рис.4. Схема экспериментальной установки: 1 – He–Ne-лазер ($\lambda = 633$ нм и $P = 30$ мВт); 2 – контролирующей интенсивность блок аттенуации на основе поляризаторов; 3 – коллимирующая оптическая система с блоком очистки; 4 – транспарант с входным изображением, закреплённый на поворотной оправе; 5 – голографический инвариантный фильтр; 6 – фурье-линза; 7 – матричный фотодетектор; 8 – персональный компьютер.

(65536 уровней). Увеличенное изображение центральной части голограммы показано на рис.2,а, результат численного восстановления амплитуды корреляционного фильтра представлен на рис.2,б.

Фурье-голограмма была изготовлена с использованием стандартного лазерного фотонаборного аппарата Scitex Dolev 800. Голограмма представляет собой транспарант с бинарным чисто амплитудным пропусканием. Для кодирования уровней пропускания рассчитанных отсчётов голограммы было применено частотно-модулированное стохастическое растривание при максимально доступном разрешении чёрно-белой печати 3048 точек на дюйм. При числе градаций серого 27 (менее 5 бит) размер отсчёта голограммы составил около 80 мкм. Предварительные измерения интенсивности восстановленного светового поля голограммы показали удовлетворительное совпадение геометрии результата восстановления с расчётными результатами. Фото восстановленного голограммой светового поля представлено на рис.3.

4. Эксперименты по корреляционному различению изображений

Для проведения экспериментальных исследований по реализации КФ был собран макет коррелятора Вандер Люгта. Схема макета показана на рис.4. Для ввода входного изображения использовался бинарный транспарант с контрастным отношением чуть более 100:1, который устанавливался на поворачивающейся вокруг оптической оси оправе с микрометрическим отсчетом. В качестве приёмника изображений, формируемых выходным фурье-каскадом коррелятора, использовался 8-мегапиксельный матричный фотодетектор цифровой фотокамеры Canon EOS20D. Получаемые выходные сигналы коррелятора записывались в виде полутоновых изображений с градациями серого цвета 16 бит в raw-формате и поступали в персональный компьютер для дальнейшей обработки.

В ходе эксперимента в корреляционной области выходного поля коррелятора были получены адекватно локализованные корреляционные пики, уверенно сохраняющиеся при повороте входного изображения в пределах $\pm 90^\circ$. Пример сигналов выходной плоскости коррелятора представлен на рис.5. При повороте входного изображения отношение интенсивности корреляционного пика к максимальной интенсивности шума по корреляционному полю менялось и составляло не менее 7.5:1, при среднем 9:1 и максимальном 14:1. При проведении измерений была отмечена возможность существенного улучшения характеристик корреляционных сигналов при технически доступных совершенствовании оптической схемы корреля-

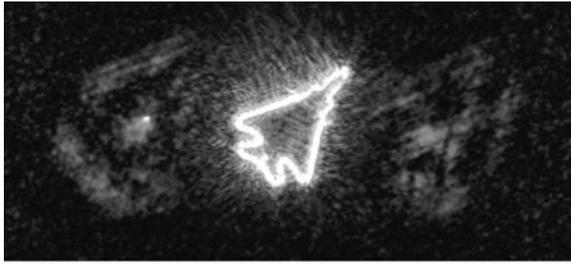


Рис.5. Пример сигналов выходной плоскости коррелятора. Слева направо: область корреляции, область изображения, область свёртки.

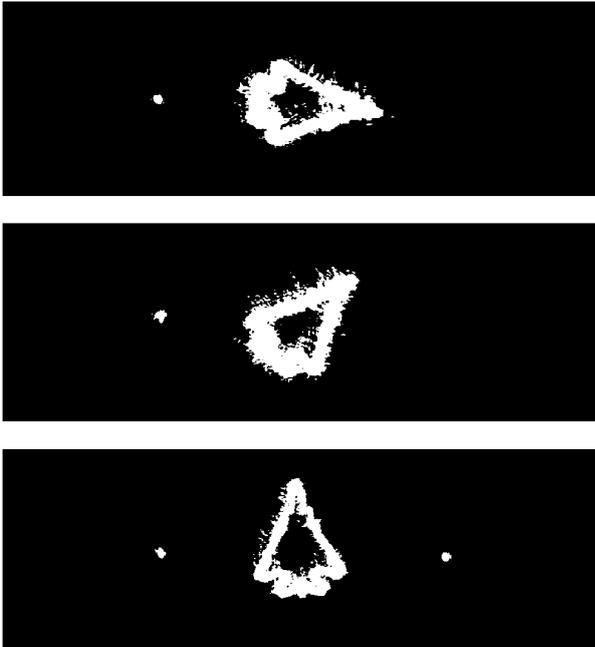


Рис.6. Примеры сигналов коррелятора, подвергнутых операции порога на уровне 0.5 от максимального значения корреляционного пика для углов поворота 0, -45° и -90° (в последнем случае в области свёртки также присутствует пик, так как фильтр содержит симметричные положения -90° и 90°).

латора и увеличении контраста элементов, которые используются для ввода входного изображения и фильтра. Примеры сигналов коррелятора, подвергнутых операции порога на уровне 0.5 от максимального значения корреляционного пика, представлены на рис.6. Зависимость

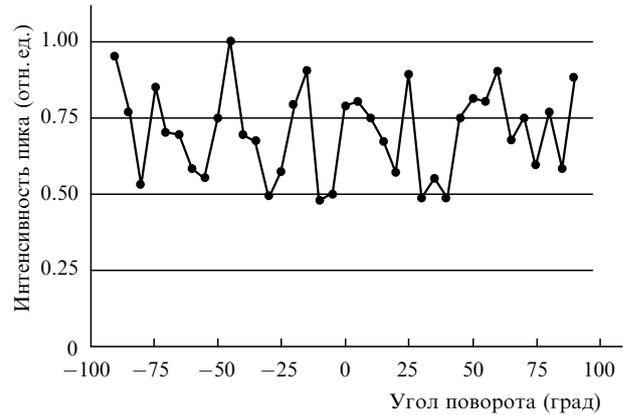


Рис.7. Зависимость нормированной интенсивности корреляционного пика от угла поворота входного изображения.

нормированной величины корреляционного пика от угла поворота входного изображения показана на рис.7.

5. Заключение

Таким образом, приведенные результаты демонстрируют возможность достижения инвариантности корреляции при применении корреляционных фильтров с линейным фазовым коэффициентом в схемах когерентных дифракционных корреляторов. Инвариантные корреляционные фильтры с линейным фазовым коэффициентом могут быть реализованы в виде компьютерно синтезированных амплитудных голограмм, в том числе в случае использования голографических носителей с ограниченным динамическим диапазоном.

Работа выполнена в рамках проекта аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2006–2008 годы)» Минобрнауки РФ, а также при поддержке РФФИ.

1. Vijaya Kumar B.V.K. *Appl. Opt.*, **31**, 4773 (1992).
2. Hassebrook L., Vijaya Kumar B.V.K., Hostetler L. *Opt. Eng.*, **29**, 1033 (1990).
3. Гудмен Дж. *Введение в Фурье-оптику* (М.: Мир, 1970).
4. Markilov A.A., Shapkarina E.A., Solyakin I.V., Starikov S.N. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5106**, 283 (2003).
5. Evtikhiev N.N., Ivanov P.A., Lyapin A.S., Reyzin B.M., Shevchuk A.V., Sirotkin S.A., Starikov R.S., Zaharcev A.V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5851**, 242 (2004).