

## Влияние дополнительной фазовой модуляции амплитудных жидкокристаллических ПВМС на характеристики распознавания изображений в инвариантном оптико-цифровом корреляторе

Д.С. Гончаров<sup>1</sup>, Н.Н. Евтихийев<sup>1</sup>, В.В. Краснов<sup>1</sup>, Н.М. Пономарев<sup>1</sup>, Р.С. Стариков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

### Аннотация

В работе представлены результаты измерения характеристик дополнительной фазовой модуляции серийного амплитудного жидкокристаллического пространственно-временного модулятора света HoloEye LC 2002. Получена зависимость величины вносимого фазового сдвига данного жидкокристаллического пространственно-временного модулятора от поданного на него сигнала, определяющего амплитудное пропускание. Выполнено математическое моделирование работы инвариантного дифракционного оптико-цифрового коррелятора на базе жидкокристаллического пространственно-временного модулятора с фазовым сдвигом, зависящим от амплитуды в соответствии с измеренными ранее данными. Для обеспечения инвариантности корреляционного распознавания использованы два типа корреляционных фильтров – оптимальный компромиссный фильтр с максимальной средней высотой корреляционного пика и фильтр с минимумом шума и энергии корреляции. Предложен метод оптимизации корреляционных фильтров с целью компенсации ошибки распознавания, обусловленной наличием дополнительной фазовой модуляции, позволяющий в ряде случаев не только компенсировать, но и уменьшить ошибку распознавания.

**Ключевые слова:** оптико-цифровой коррелятор, ЖК ПВМС, интерференция, инвариантный корреляционный фильтр.

**Цитирование:** Гончаров, Д.С. Влияние дополнительной фазовой модуляции амплитудных жидкокристаллических ПВМС на характеристики распознавания изображений в инвариантном оптико-цифровом корреляторе / Д.С. Гончаров, Н.Н. Евтихийев, В.В. Краснов, Н.М. Пономарев, Р.С. Стариков // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 2. – С. 200-208. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-2-200-208.

### Введение

Реализация корреляционного метода распознавания изображений на базе схем дифракционных корреляторов привлекательна из-за потенциально чрезвычайно высокой скорости распознавания, обеспечиваемой параллелизмом оптики [1, 2]. Эффективным способом достижения инвариантности корреляционного распознавания к различным изменениям состояния «объектов интереса», таким как поворот, изменение условий освещения и др., является применение инвариантных корреляционных фильтров (КФ) [1, 3–14]. Для представления КФ в оптической системе используются методы компьютерного синтеза дифракционных элементов [1, 2, 15–30]. Существующие технологии обеспечивают возможности создания оптико-цифровых дифракционных инвариантных корреляторов, обладающих быстродействием на уровне тысяч корреляций в секунду для изображений размерности до 1000×1000 пикселей. Быстродействие и разрешение современных жидкокристаллических пространственно-временных модуляторов света (ЖК ПВМС) позволяет использовать их в таких системах в качестве устройств ввода распознаваемых изображений и КФ [21–30]. Для корректной работы рассматриваемых систем необходимо учитывать различные особенности модуляции ЖК ПВМС, определяемые технологией их изготовления.

Особенностью функционирования амплитудных ЖК ПВМС является вносимая ими дополнительная фазовая модуляция светового излучения. На практике

добавочный фазовый сдвиг в каждом пикселе амплитудного ЖК ПВМС определяется устанавливаемым в этом пикселе уровнем передачи амплитуды. Такая дополнительная фазовая модуляция может существенно влиять на работу системы и результаты распознавания. Для эффективного использования амплитудных ЖК ПВМС в когерентных корреляторах необходимо установить зависимость величины фазовой модуляции от уровня сигнала, поданного на амплитудный ЖК ПВМС, а затем произвести оптимизацию корреляционного фильтра с целью учёта полученной зависимости. В данной работе измерен фазовый сдвиг, вносимый амплитудным ЖК ПВМС, приведены результаты математического моделирования работы коррелятора при наличии дополнительной фазовой модуляции, вносимой амплитудным ЖК ПВМС, и предложен метод оптимизации корреляционных фильтров с её учётом.

### 1. Измерение характеристик дополнительной фазовой модуляции амплитудного ЖК ПВМС

В работе использован серийный амплитудный ЖК ПВМС HoloEye LC 2002.

Этот модулятор работает на пропускание, имеет разрешение 800×600 пикселей, размер пиксела – 32 мкм. Предлагаемая методика измерений представлена ниже.

#### 1.1. Описание экспериментальной установки

Измерения производились с помощью двухлучевой интерферометрической системы, схема установки

представлена на рис. 1. Выбранная схема установки типична для подобных измерений, кроме того, она позволяет компактно разместить все элементы оптической схемы. Идея измерений аналогична проведённым ранее измерениям характеристик чисто фазового ПВМС [31]. Установка собрана на виброизолированном оптическом столе. Источником излучения является неодимовый лазер (на схеме – Laser), работающий на второй гармонике ( $\lambda = 532$  нм). Излучение лазера попадает на коллимирующую систему из линз L1 и L2 и микродиафрагмы (Pinhole), выполняющую также пространственную фильтрацию с целью получения пространственно однородного излучения. Затем излучение попадает на экран H с двумя отверстиями, который формирует два одинаковых пучка. Таким образом, формируются два когерентных пучка равной амплитуды. ЖК ПВМС (SLM) модулирует один из пучков. Затем пучки попадают на систему из двух линз L3 и L4. Линза L3 сводит пучки таким образом, что в её фокальной плоскости образуется интерференционная картина. Линза L4 находится в фокальной плоскости линзы L3 и позволяет получить увеличенное изображение интерференционной картины в плоскости фотосенсора камеры (Camera). Камера, подключённая к компьютеру (PC), в непрерывном режиме снимает серии изображений интерференционной картины. Регулируя мощность источника или время экспозиции, можно получить изображение интерференционной картины необходимой интенсивности.

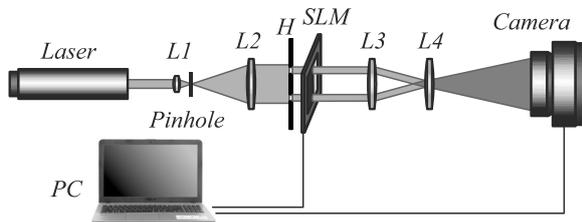


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для измерения фазового сдвига амплитудного ЖК ПВМС

Для минимизации влияния внешних факторов, а также для оптимизации проведения эксперимента было разработано специальное программное обеспечение, позволяющее проводить эксперимент полностью в автоматическом режиме.

### 1.2. Выполнение эксперимента

Эксперимент проходил следующим образом. На модулятор выводились полутоновые изображения (256 градаций серого), примеры которых приведены на рис. 2.

Таким образом, излучение, проходящее через левую половину модулятора, не изменялось в течение эксперимента, а проходящее через правую половину, модулировалось. Было произведено 256 серий снимков для каждого уровня амплитуды сигнала, поданного на модулятор, каждая серия состояла из 16 снимков.

### 1.3. Анализ полученных результатов

В ходе эксперимента было получено по 16 изображений интерференционной картины для каждого

из 256 амплитудных уровней ЖК ПВМС. Из 16 изображений, соответствующих одному амплитудному уровню, было получено одно усредненное изображение. Усреднение производилось с целью минимизации влияния механических колебаний частей системы. Из рассчитанных значений дисперсии координат положения интерференционных полос на 16 изображениях для каждого амплитудного уровня была оценена погрешность измерений, обусловленная главным образом колебаниями элементов установки.

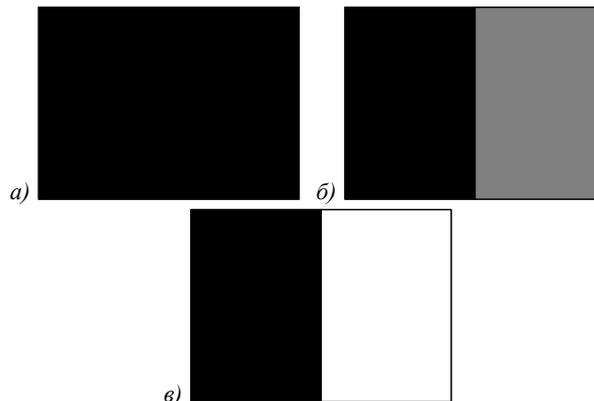


Рис. 2. Примеры изображений, выводимых на модулятор: а) уровень амплитуды 0; б) уровень амплитуды 128; в) уровень амплитуды 255

Далее, при цифровой обработке, каждое из 256 полученных изображений было отфильтровано с помощью низкочастотного фильтра с конечным импульсным откликом. В качестве пространственной частоты среза фильтра была выбрана частота  $f = 0,015 f_H$ , где  $f_H$  – пространственная частота Найквиста. Фильтрация была применена для того, чтобы очистить интерференционные картины от высокочастотных шумов, частота была подобрана экспериментально. К данным шумам следует отнести высокочастотные интерференционные полосы, проявляющиеся в виде «ряби» по всему изображению, а также изображения различных дефектов, таких как пылинки на фотосенсоре.

Фазовый сдвиг, вносимый амплитудным ЖК ПВМС, определяется по смещению интерференционной картины. Фазовый сдвиг определялся методом построчного суммирования. Суть этого метода заключается в переходе от изображений полос к зависимостям средней интенсивности полос от пространственной координаты (усреднение происходит по координате, ось которой параллельна интерференционным полосам). Полученные зависимости позволяют точно выделить максимумы и минимумы интерференционных полос даже в условиях снижения видимости. После получения зависимости средней интенсивности от координаты нетрудно выделить максимумы и минимумы интерференционных полос, находящиеся в центре изображения и представляющие наибольший интерес как самые стабильные.

Для использования метода построчного суммирования необходимо учесть снижение интенсивности изображения при удалении от оптической оси. Для

учёта данного явления необходимо нормировать изображения на распределение интенсивности по сечению пучка. Данное распределение может быть получено двумя способами: непосредственно путем измерения и путем низкочастотной фильтрации изображения полос. В этой работе был выбран второй путь. Фильтрация производилась с помощью низкочастотного фильтра с конечным импульсным откликом с пространственной частотой среза  $f=0,0037f_H$ . Эта частота была также подобрана экспериментально. В результате такой фильтрации на изображении пропадают интерференционные полосы. Оставшееся пятно соответствует распределению интенсивности по сечению пучка. Далее каждое из 256 изображений интерференционных картин нормируется на полученное распределение интенсивности. В результате видимость интерференционных полос значительно увеличивается.

Примеры исходных изображений полос, а также изображений после фильтрации и нормировки приведены на рис. 3. Левый столбец соответствует устанавливаемому уровню пропускания пикселей ПВМС  $A=0$ . Средний столбец соответствует уровню пропускания  $A=128$ . Правый столбец соответствует уровню пропускания  $A=255$ . Нетрудно заметить, что с увеличением уровня пропускания снижается видимость интерференционной картины. Это явление обусловлено флуктуациями фазы за время экспозиции.

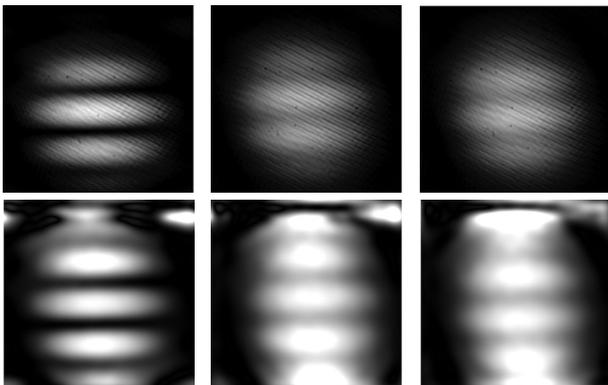


Рис. 3. Примеры изображений интерференционных полос, полученных при различных уровнях пропускания. Верхний ряд – исходные изображения, нижний ряд – изображения после фильтрации и нормировки

Обработанные таким образом изображения использовались для определения относительного изменения положения полос. Результаты представлены на рис. 4.

Максимальный фазовый сдвиг составляет около  $0,6\pi$ . Ошибка измерений составила около  $0,05\pi$ . Использование синхронизации модулятора и камеры позволит увеличить точность эксперимента.

## 2. Математическое моделирование инвариантного распознавания

В инвариантных оптико-цифровых корреляторах изображений для представления эталонной информации используются инвариантные корреляционные фильтры. К настоящему времени предложены и опробованы различные методы синтеза и реализации

инвариантных корреляционных фильтров (КФ), имеющих свои достоинства и недостатки и подходящих для решения различных задач [2–14]. В данной работе используются два различных корреляционных фильтра: оптимальный компромиссный фильтр с максимальной средней высотой корреляционного пика (ОК МСВКП, ОТ МАСН – optimal tradeoff maximum average correlation height) [2, 5, 6, 8, 11, 12] и фильтр с минимумом шума и энергии корреляции (МШЭК, MINACE – minimum noise and correlation energy) [2, 4, 9, 19–21], также предполагается их реализация в схеме коррелятора Вандер Люгта. КФ синтезируется с целью достижения инвариантности распознавания в условиях пространственного поворота «объекта интереса». Для оценки влияния дополнительной фазовой модуляции амплитудного ЖК ПВМС проведено математическое моделирование распознавания при следующих условиях:

- отсутствие дополнительной фазовой модуляции (далее – «идеальный» случай);
- наличие дополнительной фазовой модуляции при вводе распознаваемых изображений (далее – «реальный» случай).

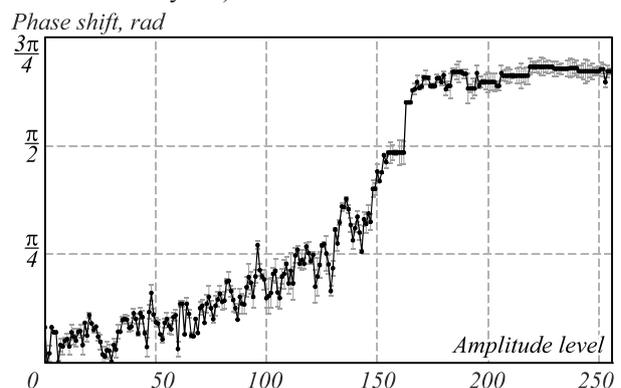


Рис. 4. Зависимость фазового сдвига от уровня пропускания ПВМС, полученная методом построчного суммирования

В качестве «объектов интереса» выбраны изображения танков, представленные на рис. 5. Для разных экспериментов варьировались фон (чёрный, серый, белый и сложный текстурный) и размерность изображений (от  $32 \times 32$  до  $256 \times 256$  пикселей). Фильтр создаётся из набора тренировочных изображений танка Т72, истинными считаются изображения танка Т72, в том числе те, которые не вошли в набор тренировочных, а ложными считаются изображения танков Abrams, Chieftain и Leopard. Примеры изображений приведены на рис. 5.

Корреляционный фильтр ОК МСВКП синтезируется с помощью следующей формулы [2, 5, 6]:

$$H = (\alpha S + \beta D)^{(-1)} m, \quad (1)$$

где  $H$  – Фурье-образ матрицы корреляционного фильтра, матрица  $m$  представляет собой среднее арифметическое Фурье-образов всех тренировочных изображений. Матрица  $D$  является средней спектральной мощностью всех изображений, и матрица  $S$  вычисляется по формуле 2:

$$S = \sum_k^N (F_k - m)^2, \tag{2}$$

где  $F_k$  – Фурье-образ  $k$ -го тренировочного изображения. Коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  являются коэффициентами оптимального соотношения.

Корреляционный фильтр МШЭК синтезируется с помощью формулы 3 [2, 4]:

$$H = T^{-1} X (X^+ T^{-1} X)^{-1} c, \tag{3}$$

где  $H$  – Фурье-образ матрицы корреляционного фильтра,  $X$  представляет собой матрицу, составлен-

ную из всех тренировочных изображений, представленных как её столбцы,  $c$  – единичный вектор. Матрица  $T$  является диагональной, ее элементы вычисляются по формуле (4):

$$T(k, k) = \max(D_1(k, k), \dots, D_N(k, k), vC(k, k)), \tag{4}$$

где  $D_N$  представляет собой матрицу спектра  $n$ -го тренировочного изображения,  $v$  – фактор шума (в данной работе  $v=0$ ) и  $C$  – матрица спектральной плотности шума.



Рис. 5. Примеры изображений распознаваемых объектов: а) T72, б) T72, не вошедшие в тренировочный набор, в) Abrams, г) Chieftain, д) Leopard

В качестве результирующего корреляционного отклика системы используется максимальный элемент матрицы кросс-корреляции между распознаваемым изображением  $I$  и корреляционным фильтром  $H$ , рассчитываемой стандартным образом.

В первую очередь проведено моделирование распознавания для «идеального» случая. Для оценки результатов распознавания получены дискриминационные и вероятностные характеристики. Дискриминационные характеристики представляют собой зависимости нормированного корреляционного отклика от номера изображения, соответствующего углу поворота объекта относительно вертикальной оси, проходящей через центр объекта. Вероятность ошибки распознавания оценивалась по критерию Неймана–Пирсона. На рис. 6 представлена дискриминационная характеристика для «идеального» случая, полученная с помощью КФ ОК МСВКП. Линия Threshold показывает порог распознавания. Вероятность ошибки распознавания в данном случае составляет 1,9%.

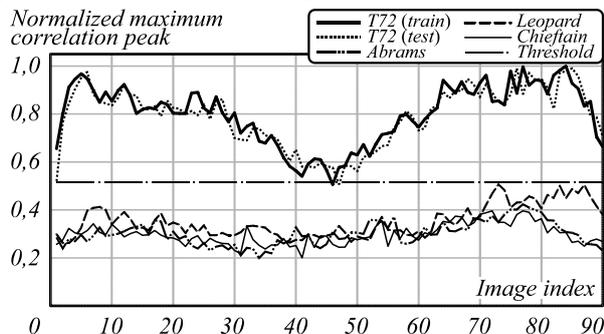


Рис. 6. Дискриминационная характеристика для «идеального» случая

После этого было проведено моделирование для «реального» случая. Для этого была использована полученная зависимость фазового сдвига от уровня пропускания ПВМС, приведённая на рис. 4. В соответствии с этой зависимостью каждое распознаваемое изображение  $I$  представляется комплексным массивом  $I'$  по формуле 5:

$$I'(i, j) = I(i, j) \exp\{j\Phi(I(i, j))\}, \tag{5}$$

где  $\Phi$  – фазовая добавка, определяемая полученной зависимостью. На рис. 7 представлена дискриминационная характеристика для «реального» случая, полученная для того же набора изображений с помощью КФ ОК МСВКП. Вероятность ошибки распознавания в этом случае составляет 9,1%.

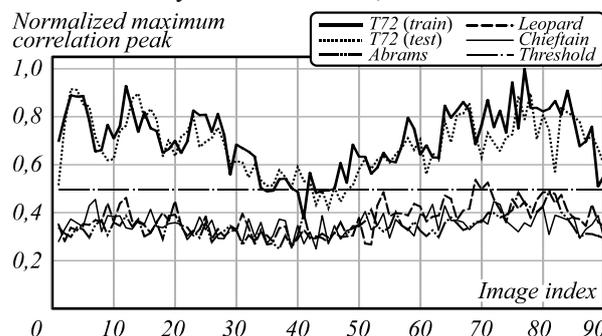


Рис. 7. Дискриминационная характеристика для «реального» случая

Очевидно ухудшение распознавания в «реальном» случае. При наличии дополнительной фазовой модуляции амплитудного ЖК ПВМС вероятность ошибки распознавания увеличивается более чем на порядок. Из этого следует, что в случае практической реализа-

ции оптического коррелятора на основе такого модулятора вероятность ошибки распознавания будет выше ожидаемой.

В целях уменьшения возникающей в «реальном» случае ошибки распознавания необходимо оптимизировать используемый корреляционный фильтр. Увеличение ошибки распознавания связано с тем, что в исходный КФ не заложена информация о фазе распознаваемых изображений. Если вместо исходных тренировочных изображений получить комплексные эталонные изображения с такой же зависимостью фазового сдвига от амплитуды, как и у распознаваемых изображений, то можно значительно снизить ошибку распознавания. Вариант, при котором фильтр синтезируется из комплексных изображений по формуле (5) и распознаваемые изображения имеют такой же фазовый сдвиг, далее будет называться «оптимизированным». Дискриминационная характеристика, полученная для ОК МСВКП фильтра для «оптимизированного» случая, приведена на рис. 8. Вероятность ошибки распознавания в этом случае составляет 0,18 %.

Использование предложенного метода оптимизации позволяет значительно снизить вероятность ошибочного распознавания по сравнению с «реальным» случаем. С целью подтверждения полученных результатов было проведено моделирование для двух типов КФ для различных объектов. Результаты моделирования представлены в табл. 1.

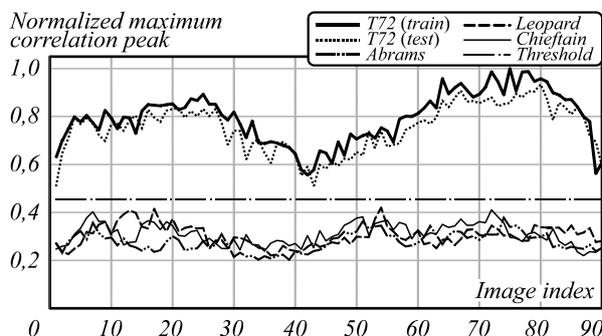


Рис. 8. Дискриминационная характеристика для «оптимизированного» случая

Табл. 1. Результаты математического моделирования – ошибка распознавания для различных КФ и различных наборов изображений

Особенности используемых наборов	Разрешение распознаваемых изображений	Используемый КФ	«Идеальный» случай	«Реальный» случай	«Оптимизированный» случай
Черный фон	32×32	МШЭК	11 %	–	–
Белый фон	32×32	МШЭК	26 %	–	14 %
Черный фон	64×64	МШЭК	0,003 %	–	1,2 %
Серый фон	64×64	МШЭК	1,5 %	–	4,2 %
Белый фон	64×64	МШЭК	0,50 %	22 %	0,023 %
Черный фон	128×128	МШЭК	<0,001 %	13 %	<0,001 %
Сложный фон	128×128	МШЭК	20 %	–	0,006 %
Серый фон	128×128	МШЭК	0,16 %	14 %	0,006 %
Белый фон	128×128	МШЭК	<0,001 %	2,0 %	<0,001 %
Черный фон	256×256	МШЭК	<0,001 %	0,001 %	<0,001 %
Сложный фон	256×256	МШЭК	<0,001 %	0,003 %	<0,001 %
Серый фон	256×256	МШЭК	<0,001 %	0,020 %	<0,001 %
Белый фон	256×256	МШЭК	<0,001 %	<0,001 %	<0,001 %
Черный фон	32×32	ОК МСВКП	19 %	–	27 %
Белый фон	32×32	ОК МСВКП	17 %	–	–
Черный фон	64×64	ОК МСВКП	7,4 %	–	6,4 %
Серый фон	64×64	ОК МСВКП	17 %	29 %	3,8 %
Белый фон	64×64	ОК МСВКП	10 %	–	9,6 %
Черный фон	128×128	ОК МСВКП	0,049 %	30 %	0,030 %
Сложный фон	128×128	ОК МСВКП	19 %	–	1,8 %
Серый фон	128×128	ОК МСВКП	1,1 %	16 %	0,17 %
Белый фон	128×128	ОК МСВКП	1,9 %	9,1 %	0,18 %
Черный фон	256×256	ОК МСВКП	<0,001 %	0,008 %	<0,001 %
Сложный фон	256×256	ОК МСВКП	<0,001 %	0,18 %	<0,001 %
Серый фон	256×256	ОК МСВКП	0,007 %	0,21 %	<0,001 %
Белый фон	256×256	ОК МСВКП	0,057 %	0,28 %	<0,001 %

### Заключение

В данной работе измерена зависимость величины дополнительной фазовой модуляции амплитудного ЖК ПВМС и проведены численные эксперименты по моделированию работы инвариантного коррелятора на основе такого ПВМС. Численные эксперименты по распознаванию проводились в условиях пространственного поворота «объектов интереса», представленных с различным разрешением и помещённых на различные фоны. В подавляющем числе экспериментов (25 из 26) получено, что наличие неучтённой дополнительной модуляции фазы приводит к ухудшению качества распознавания относительно «идеального» случая, в том числе значительному – в некоторых случаях вероятность ошибки распознавания возрастает более чем в 10 раз, или же распознавание отсутствует. Предложен и опробован метод оптимизации инвариантных корреляционных фильтров, снижающий ошибку распознавания, возникающую при наличии дополнительной фазовой модуляции. Показано, что предложенный метод позволяет компенсировать вероятность ошибки распознавания и улучшить качество распознавания изображений относительно «идеального» случая в среднем более чем в 2 раза.

### Литература

1. **Lugt, A.V.** Signal detection by complex spatial filtering / A.V. Lugt // IEEE Transactions on Information Theory. – 1964. – Vol. 10. – P. 139.
2. **Vijaya Kumar, B.V.K.** Correlation pattern recognition / B.V.K. Vijaya Kumar, A. Mahalanobis, R.D. Juday. – Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2005. – 390 p.
3. **Vijaya Kumar, B.V.K.** Recent advances in correlation filter theory and application / B.V.K. Vijaya Kumar, J.A. Fernandez, A. Rodriguez, V.N. Boddeti // Optical Pattern Recognition XXV. – 2014. – Vol. 9094. – 909404.
4. **Ravichandran, G.** Minimum noise and correlation energy optical correlation filter / G. Ravichandran, D. Casasent // Applied Optics. – 1992. – Vol. 31, Issue 11. – P. 1823-1833.
5. **Vijaya Kumar, B.V.K.** Optimal trade-off synthetic discriminant function filters for arbitrary devices \ B.V.K. Vijaya Kumar, D. Carlson, A. Mahalanobis // Optics Letters. – 1994. – Vol. 19. – P. 1556.
6. **Johnson, O.C.** Optimization of OT-MACH filter generation for target recognition / O.C. Johnson, W. Edens, T. Lu, T.-H. Chao // Proceedings of SPIE. – 2009. – Vol. 7340 – 734008.
7. **Evtikhiev, N.N.** Synthesis and research of LPCC invariant correlation filters for pattern recognition / N.N. Evtikhiev, P.A. Ivanov, A.S. Lyapin, B.M. Reyzin, A.V. Shevchuk, S.I. Sirotkin, R.S. Starikov, A.V. Zaharcev // Proceedings of SPIE. – 2005. – Vol. 5851 – P. 242-245.
8. **Lin, T.H.** Optimization of a multi-stage ATR system for small target identification / T.H. Lin, T. Lu, H. Braun, W.K. Edens, Yu. Zhang, T.-H. Chao, C. Assad, T.L. Huntsberger // Proceedings of SPIE. – 2010. – Vol. 7696. – 76961Y.
9. **Evtikhiev, N.N.** Variants of minimum correlation energy filters: comparative study / N.N. Evtikhiev, D.V. Shaulskiy, E.Yu. Zlokazov, R.S. Starikov // Proceedings of SPIE. – 2012. – Vol. 8398 – 83980G.
10. **Fernandez, J.A.** Zero-aliasing correlation filters for object recognition / J.A. Fernandez, V.N. Boddeti, A. Rodriguez, B.V.K. Vijaya Kumar // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2015. – Vol. 37, Issue 8.
11. **Gardezi, A.** Comparison of spatial domain optimal trade-off maximum average correlation height (OT-MACH) filter with scale invariant feature transform (SIFT) using images with poor contrast and large illumination gradient / A. Gardezi, T. Qureshi, A. Alkandri, R.C.D. Young, P.M. Birch, C.R. Chatwin // Proceedings of SPIE. – 2015. – Vol. 9477 – 947706.
12. **Tehsin, S.** Improved maximum average correlation height filter with adaptive log base selection for object recognition / S. Tehsin, S. Rehman, A.B. Awan, Q. Chaudry, M. Abbas, R. Young, A. Asif // Proceedings of SPIE. – 2016. – Vol. 9845. – 984506.
13. **He, E.J.** Masked correlation filters for partially occluded face recognition / E.J. He, J.A. Fernandez, B.V.K. Vijaya Kumar, M. Alkanhal // 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. – 2016. – P. 1293-1297.
14. **Smereka, J.M.** Stacked correlation filters / J.M. Smereka, V.N. Boddeti, B.V.K. Vijaya Kumar. – In: Deep Learning in Biometrics / ed. by M. Vatsa, R. Singh, A. Majumdar. – Chap. 8. – Boca Raton: CRC Press, 2018. – 328 p.
15. **Dallas, W.J.** Computer-generated holograms / W.J. Dallas. – In: The computer in optical research: Methods and applications / ed. by B.R. Friede. – Berlin: Springer, 1980. – p. 297-367.
16. **Evtikhiev, N.N.** Realisation of invariant holographic filters with the linear phase coefficient in a Van der Lugt correlator / N.N. Evtikhiev, S.N. Starikov, E.Yu. Zlokazov, S.I. Sirotkin, R.S. Starikov // Quantum Electronics. – 2008. – Vol. 38, Issue 2. – P. 191-193.
17. **Evtikhiev, N.N.** LPCC invariant correlation filters: Realization in 4-f holographic correlator / N.N. Evtikhiev, S.N. Starikov, S.I. Sirotkin, R.S. Starikov, E.Yu. Zlokazov // Proceedings of SPIE. – 2008. – Vol. 6977 – 69770C.
18. **Evtikhiev, N.N.** Invariant correlation filter with linear phase coefficient holographic realization in 4-F correlator / N.N. Evtikhiev, S.N. Starikov, D.V. Shaulskiy, R.S. Starikov, E.Yu. Zlokazov // Optical Engineering. – 2011. – Vol. 50, Issue 6. – 065803.
19. **Evtikhiev, N.N.** MINACE filter realization as computer generated hologram for 4-f correlator / N.N. Evtikhiev, D.V. Shaulskiy, E.Yu. Zlokazov, R.S. Starikov // Proceedings of SPIE. – 2013. – Vol. 8748 – 874800.
20. **Shaulskiy, D.V.** MINACE filter: Variants of realization in 4-f correlator / D.V. Shaulskiy, N.N. Evtikhiev, R.S. Starikov, S.N. Starikov, E.Yu. Zlokazov // Proceedings of SPIE. – 2014. – Vol. 9094 – 90940K.
21. **Shaulskiy, D.V.** Variants of light modulation for MINACE filter implementation in 4-F correlators / D.V. Shaulskiy, N.N. Evtikhiev, E.Yu. Zlokazov, S.N. Starikov, R.S. Starikov, E.K. Petrova, D.Yu. Molodtsov // Proceedings of SPIE. – 2015. – Vol. 9598. – 95980T.
22. **Chao, T.-H.** Grayscale optical correlator for CAD/CAC applications / T.-H. Chao, T. Lu // Proceedings of SPIE. – 2008. – Vol. 6977. – 697704.
23. **Manzur, T.** Optical correlator based target detection, recognition, classification, and tracking / T. Manzur, J. Zeller, S. Serati // Applied Optics. – 2012. – Vol. 51. – P. 4976.

24. **Evtikhiev, N.N.** Model of an invariant correlator with liquid-crystal spatial light modulators / N.N. Evtikhiev, S.N. Starikov, E.D. Protsenko, E.Yu. Zlokazov, I.V. Solyakin, R.S. Starikov, E.A. Shapkarina, D.V. Shaulskiy // *Quantum Electronics*. – 2012. – Vol. 42, Issue 11. – P. 1039-1041.
25. **Chao, T.-H.** High-speed optical correlator with custom electronics interface design / T.-H. Chao, T. Lu // *Proceedings of SPIE*. – 2013. – Vol. 8748. – 874803.
26. **Chao, T.-H.** High-speed optical processing using digital micromirror device / T.-H. Chao, T. Lu, B.P. Walker, G.F. Reyes // *Proceedings of SPIE*. – 2014. – Vol. 9094. – 909402.
27. **Xu, P.** Planar optical correlators integrated with binary optical lens / P. Xu, C. Hong, G. Cheng, L. Zhou, Z. Sun // *Optics Express*. – 2015. – Vol. 23. – P. 6773-6779.
28. **Monjur, M.S.** Experimental demonstration of the hybrid opto-electronic correlator for target recognition / M.S. Monjur, S. Tseng, M.F. Fouda, S.M. Shahriar // *Applied Optics*. – 2017. – Vol. 56. – P. 2754-2759.
29. **Ikeda, K.** Optical correlation-based cross-domain image retrieval system / K. Ikeda, H. Suzuki, E. Watanabe // *Optics Letters*. – 2017. – Vol. 42. – P. 2603.
30. **Jridi, M.** One lens optical correlation: Application to face recognition / M. Jridi, T. Napoléon, A. Alfalou // *Applied Optics*. – 2018. – Vol. 57. – P. 2087.
31. **Bondareva, A.P.** Measurement of characteristics and phase modulation accuracy increase of LC SLM "HoloEye PLUTO VIS" / A.P. Bondareva, P.A. Cheremkhin, N.N. Evtikhiev, V.V. Krasnov, R.S. Starikov, S.N. Starikov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2014. – Vol. 536, Issue 1. – 012011.

### Сведения об авторах

**Гончаров Дмитрий Сергеевич**, 1995 года рождения. Студент магистратуры НИЯУ МИФИ, лаборант кафедры лазерной физики НИЯУ МИФИ. Область научных интересов: оптическая обработка изображений и сигналов, оптико-цифровые системы, модуляция света, голография, машинное обучение. E-mail: [goncharov.dms@yandex.ru](mailto:goncharov.dms@yandex.ru).

**Евтихий Николай Николаевич**, 1951 года рождения, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой лазерной физики НИЯУ МИФИ, область научных интересов: лазерная физика, оптическая обработка информации. E-mail: [evtikhiev@mail.ru](mailto:evtikhiev@mail.ru).

**Краснов Виталий Вячеславович**, 1987 года рождения, к.ф.-м.н., доцент, отделение лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ, область научных интересов: синтез дифракционных оптических элементов, восстановление волнового фронта, оптическое кодирование, обработка сигналов, шумы фотокамер. E-mail: [vitaly.krasnov@mail.ru](mailto:vitaly.krasnov@mail.ru).

**Пономарев Николай Михайлович**, 1995 года рождения. Студент магистратуры НИЯУ МИФИ, лаборант кафедры лазерной физики НИЯУ МИФИ. Область научных интересов: оптическая обработка изображений и сигналов, оптико-цифровые системы, голография, машинное обучение. E-mail: [ponomarev.nm@ya.ru](mailto:ponomarev.nm@ya.ru).

**Стариков Ростислав Сергеевич**, 1970 года рождения, д.ф.-м.н., профессор кафедры лазерной физики НИЯУ МИФИ, область научных интересов: оптическая обработка изображений и сигналов, оптико-цифровые системы, модуляция света, голография. E-mail: [rstarikov@mail.ru](mailto:rstarikov@mail.ru).

ГРНТИ: 28.23.15: 47.37.35: 29.31.29:29.33.17

Поступила в редакцию 24 сентября 2018 г. Окончательный вариант – 19 марта 2019 г.

## The influence of additional phase modulation of an amplitude liquid crystal STLM on the image recognition characteristics in the invariant optical digital correlator

D.S. Goncharov<sup>1</sup>, N.N. Evtikhiev<sup>1</sup>, V.V. Krasnov<sup>1</sup>, N.M. Ponomarev<sup>1</sup>, R.S. Starikov<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia

### Abstract

We present the results of measurements of additional phase modulation characteristics of a serial amplitude liquid crystal spatial light modulator HoloEye LC 2002. It is found in which way the phase shift of the liquid crystal spatial light modulator depends on the applied signal. The mathematical simulation of the performance of an invariant diffractive optical-digital correlator based on a liquid crystal spatial light modulator with the amplitude-dependent phase shift is carried out using previously measured data. The correlation filters used in the work are an optimal tradeoff maximum average correlation height filter and a minimum noise and correlation energy optical correlation filter. A method for correlation filters optimization was proposed to compensate for the recognition error caused by the presence of the additional phase modulation. In some cases, the optimization allows one not only to compensate for the recognition error, but also to reduce it.

**Keywords:** optical-digital correlator, LC SLM, interference, invariant correlation filter.

**Citation:** Goncharov DS, Evtikhiev NN, Krasnov VV, Ponomarev NM, Starikov RS. The influence of additional phase modulation of an amplitude liquid crystal STLM on the image recognition characteristics in the invariant optical digital correlator. *Computer optics* 2019; 43(2): 200-208. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-2-200-208.

### References

- [1] Lugt AV. Signal detection by complex spatial filtering. *IEEE Transactions on Information Theory* 1964; 10: 139.
- [2] Vijaya Kumar BVK, Mahalanobis A, Juday RD. *Correlation Pattern Recognition*. Cambridge: Cambridge University Press; 2005.
- [3] Vijaya Kumar BVK, Fernandez JA, Rodriguez A, Boddeti VN. Recent advances in correlation filter theory and application. *Optical Pattern Recognition XXV* 2014; 9094: 909404.
- [4] Ravichandran G, Casasent D. Minimum noise and correlation energy optical correlation filter. *Appl Opt* 1992; 31(11): 1823-1833.
- [5] Vijaya Kumar BVK, Carlson D, Mahalanobis A. Optimal trade-off synthetic discriminant function filters for arbitrary devices. *Opt Lett* 1994; 19: 1556.
- [6] Johnson OC, Edens W, Lu T, Chao T-H. Optimization of OT-MACH filter generation for target recognition. *Proc SPIE* 2009; 7340: 734008.
- [7] Evtikhiev NN, Ivanov PA, Lyapin AS, Reyzin BM, Shevchuk AV, Sirotkin SI, Starikov RS, Zaharcev AV. Synthesis and research of LPCC invariant correlation filters for pattern recognition. *Proc SPIE* 2005; 5851: 242-245.
- [8] Lin TH, Lu T, Braun H, Edens WK, Zhang Yu, Chao T-H, Assad C, Huntsberger TL. Optimization of a multi-stage ATR system for small target identification. *Proc SPIE* 2010; 7696: 76961Y.
- [9] Evtikhiev NN, Shaulskiy DV, Zlokazov EYu, Starikov RS. Variants of minimum correlation energy filters: comparative study. *Proc SPIE* 2012; 8398: 83980G.
- [10] Fernandez JA, Boddeti VN, Rodriguez A, Vijaya Kumar BVK. Zero-aliasing correlation filters for object recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 2015; 37(8).
- [11] Gardezi A, Qureshi T, Alkandri A, Young RCD, Birch PM, Chatwin CR. Comparison of spatial domain optimal tradeoff maximum average correlation height (OT-MACH) filter with scale invariant feature transform (SIFT) using images with poor contrast and large illumination gradient. *Proc SPIE* 2015; 9477: 947706.
- [12] Tehsin S, Rehman S, Awan AB, Chaudry Q, Abbas M, Young R, Asif A. Improved maximum average correlation height filter with adaptive log base selection for object recognition. *Proc SPIE* 2016; 9845: 984506.
- [13] He EJ, Fernandez JA, Vijaya Kumar BVK, Alkanhal M. Masked correlation filters for partially occluded face recognition. *2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing* 2016; 1293-1297.
- [14] Smereka JM, Boddeti VN, Vijaya Kumar BVK. Stacked Correlation Filters. In Book: Vatsa M, Singh R, Majumdar A, eds. *Deep Learning in Biometrics*. Ch 8. Boca Raton: CRC Press; 2018.
- [15] Dallas WJ. Computer-generated holograms. In Book: Friede BR, ed. *The computer in optical research: Methods and applications*. Berlin: Springer, 1980: 297-367.
- [16] Evtikhiev NN, Starikov SN, Zlokazov EYu, Sirotkin SI, Starikov RS. Realisation of invariant holographic filters with the linear phase coefficient in a Van der Lugt correlator. *Quantum Electronics* 2008; 38(2): 191-193.
- [17] Evtikhiev NN, Starikov SN, Sirotkin SI, Starikov RS, Zlokazov EYu. LPCC invariant correlation filters: Realization in 4-f holographic correlator. *Proc SPIE* 2008; 6977: 69770C.
- [18] Evtikhiev NN, Starikov SN, Shaulskiy DV, Starikov RS, Zlokazov EYu. Invariant correlation filter with linear phase coefficient holographic realization in 4-F correlator. *Opt Engineer* 2011; 50(6): 065803.
- [19] Evtikhiev NN, Shaulskiy DV, Zlokazov EYu, Starikov RS. MINACE filter realization as computer generated hologram for 4-f correlator. *Proc SPIE* 2013; 8748: 87480O.
- [20] Shaulskiy DV, Evtikhiev NN, Starikov RS, Starikov SN, Zlokazov EYu. EMINACE filter: Variants of realization in 4-f correlator. *Proceedings of SPIE* 2014; 9094: 90940K.
- [21] Shaulskiy DV, Evtikhiev NN, Zlokazov EYu, Starikov SN, Starikov RS. Variants of light modulation for MINACE filter implementation in 4-F correlators. *Proc SPIE* 2015; 9598: 95980T.
- [22] Chao T-H, Lu T. Grayscale optical correlator for CAD/CAC applications. *Proc SPIE* 2008; 6977: 697704.
- [23] Manzur T, Zeller J, Serati S. Optical correlator based target detection, recognition, classification, and tracking. *Appl Opt* 2012; 51: 4976.
- [24] Evtikhiev NN, Starikov SN, Protsenko ED, Zlokazov EYu, Solyakin IV, Starikov RS, Shapkarina EA, Shaulskiy DV. Model of an invariant correlator with liquid-crystal spatial light modulators. *Quantum Electronics* 2012; 42(11): 1039-1041.
- [25] Chao T-H, Lu T. High-speed optical correlator with custom electronics interface design. *Proc SPIE* 2013; 8748: 874803.
- [26] Chao T-H, Lu T, Walker BP, Reyes GF. High-speed optical processing using digital micromirror device. *Proc SPIE* 2014; 9094: 909402.
- [27] Xu P, Hong C, Cheng G, Zhou L, Sun Z. Planar optical correlators integrated with binary optical lens. *Opt Express* 2015; 23: 6773-6779.
- [28] Monjur MS, Tseng S, Fouda MF, Shahriar SM. Experimental demonstration of the hybrid opto-electronic correlator for target recognition. *Appl Opt* 2017; 56: 2754-2759.
- [29] Ikeda K, Suzuki H, Watanabe E. Optical correlation-based cross-domain image retrieval system. *Opt Lett* 2017; 42: 2603.
- [30] Jridi M, Napoléon T, Alfalou A. One lens optical correlation: Application to face recognition. *Appl Opt* 2018; 57: 2087.
- [31] Bondareva AP, Cheremkhin PA, Evtikhiev NN, Krasnov VV, Starikov RS, Starikov SN. Measurement of characteristics and phase modulation accuracy increase of LC SLM "HoloEye PLUTO VIS". *J Physics: Conf Ser* 2014; 536(1): 012011.

*Authors' information*

**Dmitriy Sergeevich Goncharov**, born in 1995. Student of the magistracy of the NRNU MEPhI, laboratory assistant of the Laser Physics department of the NNIU MEPhI. Research interests: optical processing, optical digital systems, light modulation, holography, machine learning. E-mail: [goncharov.dms@yandex.ru](mailto:goncharov.dms@yandex.ru).

**Nikolay Nikolaevich Evtikhiev**, born in 1951, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Laser Physics department of the NRNU MEPhI. Field of scientific interests: laser physics, optical processing. E-mail: [evtikhiev@mail.ru](mailto:evtikhiev@mail.ru).

**Vitaly Vyacheslavovich Krasnov**, born in 1987, Ph.D., Associate Professor, Laser and Plasma Technologies department, NRNU MEPhI. Field of scientific interests: synthesis of diffractive optical elements, wave front reconstruction, optical coding, signal processing, noise camera. E-mail: [vitaly.krasnov@mail.ru](mailto:vitaly.krasnov@mail.ru).

**Nikolai Mikhailovich Ponomarev**, born in 1995. Student of the magistracy of the NRNU MEPhI, laboratory assistant of the Laser Physics department of the NRNU MEPhI. Research interests: optical processing, optical digital systems, holography, machine learning. E-mail: [ponomarev.nm@ya.ru](mailto:ponomarev.nm@ya.ru).

**Rostislav Sergeevich Starikov**, born in 1970, Doctor of Physics and Mathematics, Professor of the Laser Physics department of the NNIU MEPhI, the field of scientific interests: optical processing, optical-digital systems, light modulation, holography. E-mail: [rstarikov@mail.ru](mailto:rstarikov@mail.ru).

---

*Received September 24, 2018. The final version – March 19, 2019.*

---