

## 15. Оптические корреляторы изображений: история и современное состояние

*Р. С. Стариков*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

*Цитирование:* Стариков, Р. С. Оптические корреляторы изображений: история и современное состояние / Р. С. Стариков // HOLOEXPO 2019 : XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — С. 82–90.

### Введение

55 лет назад А. Вандер Люгт предложил голографический способ получения кросскорреляционной функции двух изображений в когерентной оптической системе с фильтрацией в плоскости пространственных частот [1]. Безусловными основаниями предложенного способа явились эксперименты, поставленные Э. Аббе и А. Портером [2, 3] на рубеже XIX-го и XX-го веков и заложившие основы применения методов пространственной фильтрации в оптике. Кроме того, к тому моменту в мировой практике был накоплен значительный опыт в области оптических систем с пространственной фильтрацией и применение таких методов к решению задач обработки сигналов активно обсуждалось [4–6]. В основе способа лежат два положения: способность линзы осуществлять Фурье преобразование светового поля и свойство преобразования Фурье, описываемое теоремой об автокорреляции. Соответствующий оптический Фурье-процессор получил название коррелятор Вандер Люгта или  $4f$ -коррелятор. Некоторое время спустя, был предложен альтернативный метод [7, 8], основанный на голографировании совместного пространственного спектра двух изображений, Фурье преобразование которого содержит кросскорреляционную функцию исходных изображений, соответствующая система получила название коррелятор совместного преобразования или, впоследствии,  $1f$ -коррелятор. Оба типа систем, позднее, были обобщены для случаев некогерентного освещения [9–11]. С момента появления идеи и до наших дней в мире исследованы сотни вариантов реализации оптических корреляторов изображений, более того некоторые системы имели пусть и ограниченное, но практическое применение. Интерес к исследованию и практической реализации оптических (оптоэлектронных, дифракционных, голографических, оптико-цифровых и т. д., используются различные термины) корреляторов, не снижающийся на протяжении пяти с половиной десятилетий, обусловлен надеждой получить высокую скорость корреляционной обработки (то есть фактически высокую скорость счёта) за счёт параллелизма оптических систем. На каждом этапе развития средств и техники реализации оптических устройств эта надежда имела адекватное своему времени обоснование, определявшее и сам облик создававшихся оптических корреляторов и систем на их основе. В данном докладе кратко рассматриваются и обсуждаются в развитии основные аспекты реализации оптических корреляторов в течение нескольких этапов, выделенных по идеологии и уровню развития техники.

## 1. Фундаментальные аспекты реализации оптических корреляторов

Практически сразу после первых экспериментов 60-х годов стали ясны проблемы реализации оптических корреляторов, а именно:

- 1) необходимость в средствах оперативного ввода изображений,
- 2) необходимость оперативного голографирования совместного спектра в случае коррелятора совместного преобразования или
- 3) оперативной реализации фильтра (фактически голограммы Фурье) в схеме Вандер Люгта и
- 4) необходимость оперативной фиксации и обработки сформированной корреляционной функции.

Без преувеличения можно констатировать, что вся дальнейшая история развития оптических корреляторов обусловлена поисками решения перечисленных проблем, то есть созданием адекватных средств модуляции и детектирования двумерных световых сигналов, а также обеспечением совместной работы коррелятора с другими частями информационной системы, в составе которой он используется. В отношении последнего обстоятельства следует определить оптический коррелятор как специализированный процессор, выполняющий однотипную операцию, несмотря на неоднократно предпринимавшиеся попытки расширить функциональность систем на основе корреляторов. Уже в 70-е годы стало ясно, что вычисления в схемах оптических корреляторов изображений выполняются не «со скоростью света», а со скоростью, определяемой временами срабатывания устройств, осуществляющих ввод изображений и фильтров и вывод результирующих распределений системы. В настоящее время, для наиболее корректного сравнения с другими вычислительными средствами, эквивалентная скорость вычислений оптического коррелятора может быть оценена путём учёта времени срабатывания системы и числа вычислительных операций, необходимых для подсчёта быстрого преобразования Фурье в цифровой вычислительной системе и равного  $aM \log_2 M$ , где  $a$  — константа, зависящая от варианта алгоритма и лежащая на практике в пределах от 3 до 20,  $M$  — число отсчётов обрабатываемого сигнала; удобными также представляются оценки пропускной способности устройства. В следующем разделе рассматриваются этапы развития оптических корреляторов — вплоть до наших дней, в качестве литературных источников по работам до 90-х годов включительно использованы компиляции оригинальных работ, изданные обществом SPIE [12, 13].

## 2. Этапы развития оптических корреляторов

### 1960-е: оптические системы

На данном, первом этапе развития не имелось возможности реализовать сколь-нибудь оперативную работу коррелятора, потому что фактически не существовало средств оперативной модуляции света. Представлялись реализуемыми системы на основе фотоплёнки для ввода изображений с голографической записью и, в лучшем случае, с телевизионной регистрацией

выходного сигнала. Однако уже в 1966 году были продемонстрированы революционные результаты Б. Брауна и А. Ломана по численному синтезу голографических фильтров [14], открывшие перспективы применения методов компьютерной голографии на последующие десятилетия, находящие всё большее применение по мере развития средств пространственно-временной модуляции света. В 1969 году Д. Колфилд и В. Мелуни предложили идею составного фильтра для коррелятора Вандер Люгта [15], получившую в дальнейшем весьма разнообразные воплощения. Таким образом, уже на начальном этапе развития систем оптической корреляционной обработки изображений были сформулированы все основные принципы и идеи их реализации.

### **1970-е — 1980-е: оптоэлектронные системы**

В этот период достигнут значительный прогресс в создании оптоэлектронной элементной базы в целом. Существенно улучшились характеристики телевизионных систем, в том числе на основе ФПЗС, а также появились первые возможности цифровой обработки видеоданных. Бурное развитие получили технологии пространственно-временных модуляторов света (ПВМС). С 1978 года коммерчески доступны светоуправляемые ПВМС типа ФП-ЖК (позднее МДП-ЖК), эти устройства стали первыми практичными устройствами, пригодными для оперативного голографического ввода. В середине 70-х годов появляются первые матричные ЖК ПВМС, в середине 80-х такие ЖК ПВМС стали коммерчески широко доступны. Исследуются возможности создания и применения магнитооптических (МО), акустооптических (АО), микрозеркальных (МЗ) ПВМС. Также в этот период активно исследуются оперативные голографические среды, такие как фоторефрактивные кристаллы (ФРК), фотополимеры, термопласт и пр. Такое развитие элементной базы обусловило появление значительного количества экспериментальных реализаций оптических корреляторов, предназначенных для оперативного анализа изображений и учитывающих в своей идеологии особенности применяемого средства модуляции света [12, 13]. Одновременно развивается подход, заключающийся в применении в качестве фильтра в схеме Вандер Люгта толстослойной мультиплексной голограммы и в трактовке такого устройства в качестве ассоциативной памяти. Ко второй половине 70х годов стали очевидны фундаментальные ограничения метода корреляционного распознавания, связанные с деградацией корреляционного пика, обусловленной различными дестабилизирующими факторами, такими как изменение ракурса, освещённости, размера и т. п. распознаваемого объекта. В 1980 году Ч. Хестер и Д. Кейсесент представили метод синтеза составного корреляционного фильтра [16], обеспечивающий инвариантность распознавания к различным дестабилизирующим факторам, подобная идеология быстро сформировала достаточно обширную область исследований, посвящённых синтезу и реализации инвариантных корреляционных фильтров. Вне всякого сомнения, можно утверждать, что именно период 70-х — середины 80-х годов явился «золотым веком» исследований в рассматриваемой

области, замечательным результатом которого явилось появление ряда компактных, портативных, нацеленных на практическое применение реализаций оптоэлектронных систем на базе оптических корреляторов [12, 13, 17, 18].

### **1980-е — 2000-е: оптико-цифровые системы**

Лавинообразное развитие цифровой техники в конце 70-х — первой половине 80-х годов привело к пониманию необходимости интеграции оптоэлектронных и цифровых устройств, как магистрального пути развития [17]. Можно сказать, что уже в конце 80-х годов наиболее передовым классом оптоэлектронных систем стали оптико-цифровые системы. Термин «оптико-цифровой коррелятор» становится широко употребим. Предыдущий накопленный опыт, в том числе практической реализации систем, алгоритмов синтеза инвариантных фильтров, а также быстрый прогресс в области ПВМС и цифровых фотокамер на рубеже 80-х и 90-х годов обосновывали самые оптимистичные прогнозы относительно широкого применения оптических корреляторов в ближайшей перспективе [18]. К середине 90-х годов были достигнуты невиданные ранее характеристики цифровых фотодетекторов и ПВМС, управляемых цифровым сигналом — как по скорости работы, так и по пространственному разрешению, ставшему достаточным для задач цифровой и компьютерной голографии. Однако, парадокс состоит в том, что развитие электроники, в значительной мере определившее развитие оптоэлектронных компонент, одновременно привело к снижению их ценности с точки зрения возможностей применения для обработки информации; резонно заметить: «зачем делать «оптическую надстройку», если все можно сделать той же, уже имеющейся, электроникой?» Поэтому обоснованием потребности в оптоэлектронных корреляторах стал следующий набор свойств: а) выдающиеся характеристики по скорости работы и точности распознавания, б) возможность миниатюризации и в) приемлемая стоимость. Последнее, в частности обусловило рост интереса к корреляторам совместного преобразования, в 90-е годы множество таких систем было продемонстрировано [13] и, кстати, корреляционные методы, основанные на получении совместного спектра, стали отдельным, самостоятельным направлением исследований. В 2000-х годах доступные по цене коммерческие варианты корреляторов совместного преобразования предлагались на рынке. Возможности создания миниатюрных систем разрабатывались с середины 90-х годов, в этом отношении важным фактором явилось улучшение характеристик полупроводниковых и появление компактных твердотельных лазеров. В частности, коррелятор, интегрированный в стандартную карту расширения персональной ЭВМ, был представлен уже в 1995 году [19]; позднее также известны подобные реализации, например в 5-дюймовый слот персональной ЭВМ [20]. Методы синтеза и реализации инвариантных корреляционных фильтров к середине 2000-х годов получили значительное развитие, и всестороннее исследование [21–23]. Несмотря на то, что нельзя говорить об успешной коммерциализации технологий оптических корреляторов, важно отметить, что первая декада XXI века ознаменована появлением ряда рекордных по скоростным характеристикам оптико-цифровых систем на их основе [24–33]. Опробованные на практике, в ряде

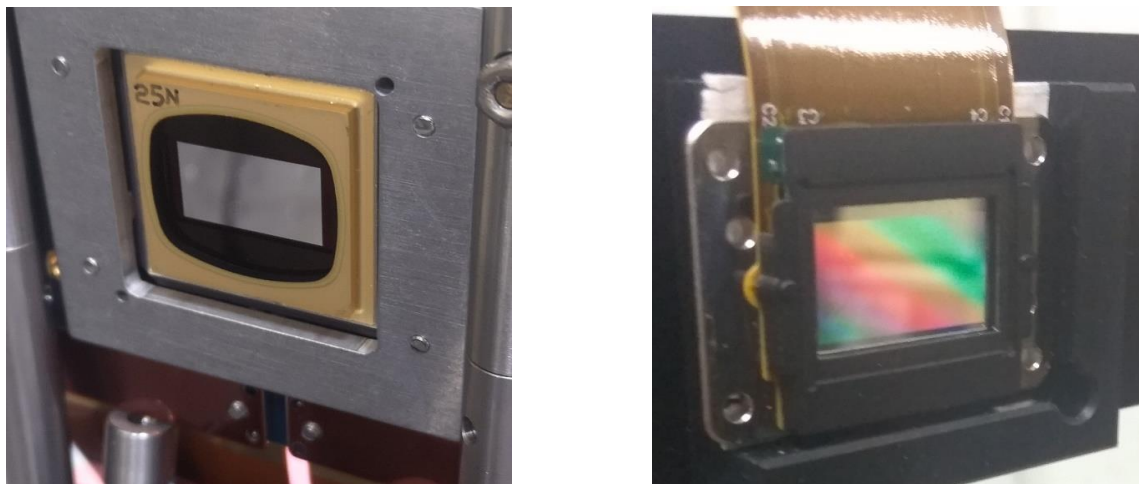


Рис. 1. Примеры современных ПВМС: слева МЗ ПВМС, разрешение  $1920 \times 1080$  пикс, частота смены кадра свыше 20 кГц, справа фазовый ЖК ПВМС, разрешение  $4160 \times 2464$  пикс, глубина модуляции фазы 6п, частота смены кадров 60 Гц

случаев в военных и аэрокосмических приложениях, эти системы характеризуются применением продвинутых методов синтеза корреляционных фильтров и использованием самой передовой элементной базы, что обеспечило сочетание высокой скорости и гибкости распознавания.

#### **2000-е – 2010-е: экстремальные и интеллектуальные системы**

В настоящее время в рассматриваемой области сформировались две важнейшие тенденции исследований [33–42]: 1) наращивание вычислительных характеристик собственно корреляторов за счёт применения всё более и более высокоразрешающих и быстродействующих средств модуляции и 2) применение инвариантного коррелятора в сочетании с другими методами распознавания и классификации — нейросетевыми методами, методами интеллектуального анализа данных, другими методами искусственного интеллекта. Первая тенденция, в большей степени, обусловлена продолжающимся прогрессом в технологиях ПВМС; в настоящее время получили наибольшее развитие и обеспечивают наивысшие характеристики модуляции МЗ и ЖК ПВМС (см. рисунок 1); важно отметить значительное количество новейших экспериментальных исследований, посвящённых техническим аспектам создания корреляторов на основе современных ПВМС. В настоящее время доступны ПВМС с возможностями ввода мегапиксельных изображений на частотах в десятки кГц, доступны и цифровые камеры с соответствующими характеристиками. В перспективе для МЗ ПВМС — возможности ввода мегапиксельных изображений на мегагерцовой частоте. Такие скорости ввода уже сейчас обеспечивают экстремальную по нынешним меркам пропускную способность оптических корреляторов — на уровне десятков гигабит в секунду и выше. Подобные системы в настоящее время могут быть реализованы в миниатюрном, интегральном исполнении, например при замене линз на дифракционные элементы. Сочетание же инвариантного коррелятора с другими методами распознавания и классификации стало возможно благодаря развитию методов искусственного интеллекта и росту вычислительных возможностей

Таблица 1

Декада	Типичные достижимые характеристики	Модуляция	Детектирование	Пред- и Пост-вычисления
1960-е	Демонстрационные эксперименты	Фотоэмульсия, электрооптические ПВМС с адресацией	Фотоэмульсия, Электровакуумные приёмники	Синтез голографического фильтра
1970-е	Телевизионные разрешение и темп работы	Фотоэмульсия, Толстослойная фотоэмульсия, ЖК ПВМС «свет-свет»,	Электровакуумные приёмники изображений, Твердотельные приёмники	Синтез голографического фильтра, Порог для корреляционной
1980-е	0,1 Мпикс в телевизионном темпе	Толстослойная фотоэмульсия, ЖК ПВМС «свет-свет», ЖК, МО, АО, МЗ	изображений (ФПЗС)	Синтез инвариантного фильтра, Синтез голографического фильтра, Обработка совместного спектра. Анализ
1990-е	0,25 Мпикс в телевизионном темпе	ПВМС «эл. сигнал-свет», Оперативные голографические	Цифровые камеры на базе твердотельных приёмников изображений (ФПЗС, КМОП)	Синтез инвариантного фильтра, Синтез голографического фильтра, Обработка совместного спектра, Анализ корреляционного поля
2000-е	1 Мпикс на 1 кГц	Толстослойная фотоэмульсия, ЖК, МЗ ПВМС «эл. сигнал-свет»		
2010-е	> 1 Мпикс на > 10кГц			

средств их реализующих, такой тенденции отвечают также и новейшие работы в области инвариантных корреляционных фильтров [43–45].

### 3. Обсуждение

Основные сведения о развитии технологии оптических корреляторов изображений представлены в таблице 1. Помимо сказанного ранее, необходимо заметить, что на протяжении всего рассматриваемого периода исследования в области создания оптических систем распознавания изображений, не будучи сами коммерциализованы, являлись одним из факторов, формирующих и определяющих прогресс оптоэлектронной элементной базы в целом, а также сыграли значительную роль в развитии методов мультиплексной, компьютерной и цифровой голографии. Говоря о сегодняшнем дне, следует заключить, что технология оптических корреляторов — одна из немногих технологий, открывающих возможность обработки информации с пропускной способностью на уровне десятков гигабит в секунду. Отдельно стоит отметить известные примеры успешного применения методов оптической корреляции при построении специализированных оптических систем различного назначения, однако такие системы заслуживают особого рассмотрения, выходящего за рамки данного краткого обзора.

### Заключение

Таким образом, в настоящее время методы оптической корреляции изображений обеспечивают возможности инвариантного распознавания при достижении пропускной способности на уровне десятков гигабит в секунду; в качестве привлекательного направления исследований в данной области следует выделить создание и исследование когнитивных систем на основе сочетания технологий сверхвысокоскоростных оптико-цифровых инвариантных корреляторов и методов искусственного интеллекта.

### Благодарность

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 17-07-00829 А.

### Список источников

- [1] **Vander Lugt, A.** Signal detection by complex spatial filtering / A. Vander Lugt // IEEE Transactions on Information Theory. — 1964. — Vol. 10. — P. 139.
- [2] **Abbe, E.** Beitrage zur Theorie des Mikroskops und der mikroskopischen Wahrnehmung / E. Abbe // Archiv fur Mikroskopische Anatomie. — 1873.
- [3] **Porter, A. B.** On the diffraction theory in microscope vision / A. B. Porter // Phil. Mag. B. 11. — 1906. — P. 154.
- [4] **Duffieux, P.-M.** L'Intégrale de Fourier et ses Applications à l'Optique / P.-M. Duffieux // Faculté des Sciences Besançon, Chez l'Auteur, France. — 1946.
- [5] **O'Neill, E.** Spatial filtering in optics / E. O'Neill // IRE. Trans. Informat. Theory. — 1956. — № 2. — P. 56.
- [6] **Cutrona, L. J.** Optical data processing and filtering / L. J. Cutrona, E. N. Leith, L. J. Porcello, W. E. Vivian // IRE. Trans. Informat. Theory — 1960. — Vol. II-6. — P. 388.
- [7] **Rau James, E.** Detection of differences in real distributions / E. Rau James // J. Opt. Soc. Am. — 1966. — Vol. 56. — P. 1490.
- [8] **Weaver, C. S.** Technique for optically convolving two functions / C. S. Weaver, J. W. Goodman // Appl. Opt. — 1966. — Vol. 5. — P. 1248.
- [9] **Lohmann, A. W.** Incoherent matched filtering with Fourier holograms / A. W. Lohmann, H. W. Werlich // Appl. Opt. — 1971. — Vol. 10. — P. 670.
- [10] **Bykovsky, Yu. A.** Optical computing by double transformation of spatial coherence of light / Yu. A. Bykovsky, A. A. Markilov, M. F. Smazheliuk, S. N. Starikov // Proc. of SPIE. — 1988. — Vol. 963. — P. 354.
- [11] **Pe'er Avi.** Optical correlation with totally incoherent light / Pe'er Avi, D. Wang, A. W. Lohmann, A. A. Friesem // Opt. Lett. — 1999. — Vol. 24. — P. 1469.
- [12] Selected Papers on Optical Correlators / Editor: Suganda Jutamulia // Proc of SPIE. — 1993. — Vol. MS76. — 726 p. — ISBN: 9780819412935.
- [13] Selected Papers on Optical Pattern Recognition Using Joint Transform Correlation / Editor: Mohammad S. Alam // Proc. of SPIE. — 1999. — Volume MS157. — 658 p. — ISBN: 9780819434708.
- [14] **Brown, G. R.** Complex spatial filtering by binary masks / G. R. Brown, A. W. Lohmann // Appl. Opt. — 1966. — Vol. 6. — P. 967.
- [15] **Caulfield, H. J.** Improved discrimination in optical character recognition / H. J. Caulfield, W. T. Maloney // Appl. Opt. — 1969. — Vol. 8. — P. 2354.
- [16] **Hester, C. F.** Multivariant technique for multiclass pattern recognition / C. F. Hester and D. Casasent // Appl. Opt. — 1980. — Vol. 19. — P. 1758.

- [17] **Casasent, D.** Hybrid Optical/Digital Image Pattern Recognition: A Review / D. Casasent // Proc. of SPIE. — 1985. — Vol. 0528. — P. 64.
- [18] **Gregory D. A.** Optical correlators: optical computing that really works / D. A. Gregory, J. C. Kirsch, and J. A. Loudin // Proc. of SPIE. — 1990. — Vol. 1296. — P. 2.
- [19] **Bains, S.** Miniature optical correlator fits inside a PC / S. Bains // Laser Focus World. — 1995. — Vol. 31 (12). — P. 17.
- [20] **Yamamoto, S.** Compact slot-in-type optical correlator / S. Yamamoto, H. Kuboyama, S. Arai, K. Yamaguchi, M. Fukuda, M. Kato, T. Kawaguchi, M. Inoue // Proc. of SPIE. — 2010. — Vol. 7723. — P. 77230B.
- [21] **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.
- [22] **Vijaya Kumar, B. V. K.** Tutorial survey of composite filter designs for optical correlators / B. V. K. Vijaya Kumar // Appl. Opt. — 1992. — Vol. 31. — P. 4773.
- [23] **Vijaya Kumar, B. V. K.** Selecting a composite correlation filter design: a survey and comparative study / R. A. Kerekes, B. V. K. Vijaya Kumar // Opt. Eng. — 2008. — Vol. 47. — P. 067202.
- [24] **Hartman Richard, L.** Demonstration of the ULTOR target recognition and tracking system / R. L. Hartman, K. B. Farr // Proc. of SPIE. — 2003. — Vol. 5106. — P. 30.
- [25] **Ewing, T.** Optical correlator using four kilohertz analog spatial light modulators / T. Ewing, S. Serati, K. Bauchert // Proc. of SPIE. — 2004. — Vol. 5437. — P. 123.
- [26] **Ni, K.** High accurate volume holographic correlator with 4000 parallel correlation channels / K. Ni, Z. Qu, L. Cao, P. Su, Q. He, G. Jin // Proc. of SPIE. — 2007. — Vol. 6827. — P. 68271J.
- [27] **Diaz, V.** Illumination invariant adaptive joint transform correlator / V. Diaz, V. Kober // Proc. of SPIE. — 2007. — Vol. 6695. — P. 66951B.
- [28] **Bergeron, A.** Lightweight compact optical correlator for spacecraft docking / A. Bergeron, P. Bourqui, B. Harnisch // Proc. of SPIE. — 2007. — Vol. 6739. — P. 67390E.
- [29] **Aran, A.** Log-polar transform-based wavelet-modified maximum average correlation height filter for distortion invariance in a hybrid digital-optical correlator / Aran Amit, N. K. Nishchal, V. K. Beri, A. K. Gupta // Appl. Opt. — 2007. — Vol. 46. — P. 7970.
- [30] **Chao, T.-H.** Grayscale optical correlator for CAD/CAC applications / T.-H. Chao, T. Lu // Proc. of SPIE. — 2008. — Vol. 6977. — P. 697704.
- [31] **Watanabe, E.** Ultra-high-speed compact optical correlation system using holographic disc / E. Watanabe, A. Naito, K. Kodate // Proc. of SPIE. — 2009. — Vol. 7442. — P. 74420X.
- [32] **Birch, P.** Volume holographic MACH correlator / P. Birch, A. Gardezi, R. Young, C. Chatwin // Proc. of SPIE. — 2010. — Vol. 7696. — P. 76961L.
- [33] **Lu, T. T.** Neural network post-processing of grayscale optical correlator / T. T. Lu, C. L. Hughlett, H. Zhou, T.-H. Chao, J. C. Hanan // Proc. of SPIE. — 2005. — Vol. 5908. — P. 590810.
- [34] **Chao, T.-H.** Automatic target recognition (ATR) performance improvement using integrated grayscale optical correlator and neural network / T.-H. Chao, T. Lu // Proc. of SPIE. — 2009. — Vol. 7340. — P. 734003.
- [35] **Lin, T.** Optimization of a multi-stage ATR system for small target identification / T. Lin, T. Lu, H. Braun, W. Edens, Y. Zhang, T.-H. Chao, C. Assad, T. Huntsberger // Proc. of SPIE. — 2010. — Vol. 7696. — P. 76961Y.
- [36] **Manzur, T.** Optical correlator based target detection, recognition, classification, and tracking / T. Manzur, J. Zeller, S. Serati // Appl. Opt. — 2012. — Vol. 51. — P. 4976.
- [37] **Chao, T.-H.** High-speed optical correlator with custom electronics interface design / T.-H. Chao, T. Lu // Proc. of SPIE. — 2013. — Vol. 8748. — P. 874803.



- [38] **Chao, T.-H.** High-speed optical processing using digital micromirror device / T.-H. Chao, T. Lu, B. P. Walker, G. F. Reyes // Proc. of SPIE. — 2014. — Vol. 9094. — P. 909402.
- [39] **Xu, P.** Planar optical correlators integrated with binary optical lens / P. Xu, C. Hong, G. Cheng, L. Zhou, Z. Sun // Opt. Expr. — 2015. — Vol. 23. — P. 6773–6779.
- [40] **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.
- [41] **Ikeda, K.** Optical correlation-based cross-domain image retrieval system / K. Ikeda, H. Suzuki, E. Watanabe // Opt. Lett. — 2017. — Vol. 42. — P. 2603.
- [42] **Jridi, M.** One lens optical correlation: Application to face recognition / M. Jridi, T. Napoléon, A. Alfalou // Appl. Opt. — 2018. — Vol. 57. — P. 2087.
- [43] **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 // Proc. of SPIE. — 2014. — Vol. 9094. — P. 909404.
- [44] **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.
- [45] **Smereka, J. M.** Stacked correlation filters for biometric verification / J. M. Smereka, V. N. Boddeti, B. V. K. Vijaya Kumar, A. Rodriguez // 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. — 2016. — P. 2104.