

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

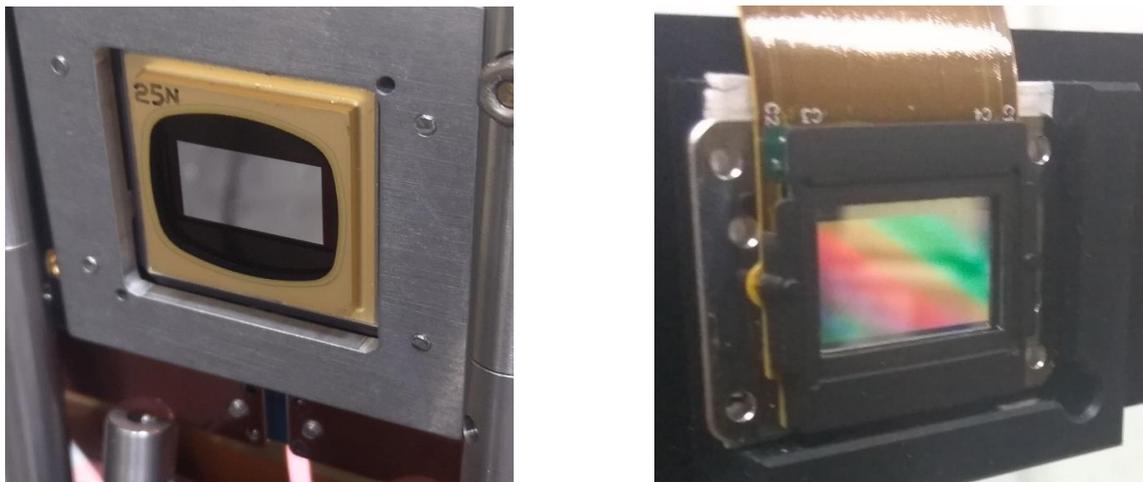


Рис. 1. Примеры современных ПВМС: слева МЗ ПВМС, разрешение 1920×1080 пикс, частота смены кадра свыше 20 кГц, справа фазовый ЖК ПВМС, разрешение 4160×2464 пикс, глубина модуляции фазы 6п, частота смены кадров 60 Гц

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 изображений (ФПЗС)	Синтез голографического фильтра, Порог для корреляционной
1980-е	0,1 Мпикс в телевизионном темпе	Толстослойная фотоэмульсия, ЖК ПВМС «свет-свет», ЖК, МО, АО, МЗ	Цифровые камеры на базе твердотельных приёмников изображений (ФПЗС, КМОП)	Синтез инвариантного фильтра, Синтез голографического фильтра, Обработка совместного спектра. Анализ
1990-е	0,25 Мпикс в телевизионном темпе	ПВМС «эл. сигнал-свет», Оперативные голографические		
2000-е	1 Мпикс на 1 кГц	Толстослойная фотоэмульсия, ЖК, МЗ ПВМС «эл. сигнал-свет»		
2010-е	> 1 Мпикс на > 10кГц			Синтез инвариантного фильтра, Синтез голографического фильтра, Обработка совместного спектра, Анализ корреляционного поля

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.