

# ДИФРАКЦИОННАЯ ОПТИКА, ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

## НЕКОГЕРЕНТНЫЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ КОРРЕЛЯТОР НА ОСНОВЕ МИКРОЗЕРКАЛЬНОГО МОДУЛЯТОРА

В.Г. Родин<sup>1</sup>

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

### Аннотация

Рассмотрена возможность применения в оптическом корреляторе микрозеркального модулятора в качестве устройства вывода голографических фильтров при квазимонохроматическом пространственно-некогерентном входном излучении. Представлена экспериментальная установка оптического коррелятора, собранная по схеме с одним объективом. Проведены эксперименты по распознаванию тестовых объектов при динамическом выводе синтезированных голографических фильтров на модулятор. Полученные результаты позволяют сделать вывод об успешном распознавании объектов в некогерентном корреляторе при использовании микрозеркального модулятора.

**Ключевые слова:** микрозеркальный модулятор, некогерентное излучение, корреляционный анализ, голографический фильтр.

**Цитирование:** Родин, В.Г. Некогерентный голографический коррелятор на основе микрозеркального модулятора / В.Г. Родин // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 3. – С. 347-353. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-3-347-353.

### Введение

Оптические корреляторы – устройства, предназначенные для распознавания объектов по ряду их характеристик, – достаточно широко применяются в различных областях науки и техники. В большинстве корреляторов используется когерентное излучение [1–3], поэтому недостатками таких устройств, как правило, являются наличие фазовых шумов, строгие требования к точности юстировки оптических элементов и др. Для устранения многих из этих недостатков было предложено использовать в корреляторах квазимонохроматическое пространственно-некогерентное излучение [4, 5], что позволило расширить требования к источникам излучения и осуществлять распознавание объектов в реальном масштабе времени. В качестве фильтра-памяти в корреляторах обычно используют Фурье-голограммы, в т.ч. синтезированные на компьютере. Вывод таких голограмм может осуществляться при помощи пространственно-временных модуляторов света (ПВМС) [6]. В большинстве голографических корреляторов используются жидкокристаллические (ЖК) ПВМС [7–14]. Однако существенными недостатками ЖК ПВМС являются наличие флуктуаций фазы [15, 16] не только для фазовых, но даже для амплитудных ЖК ПВМС, относительно низкая контрастность выводимых изображений и не самое высокое быстродействие (порядка сотен герц). Все эти недостатки значительно затрудняют применение таких модуляторов в оптических корреляторах в задачах оперативного контроля в реальном масштабе времени.

В последнее время широко развилась технология создания микрозеркальных или DMD-модуляторов (*Digital Micromirror Device modulators*) [17], которые обладают быстродействием, значительно (на два-три порядка) превышающим быстродействие ЖК ПВМС. Данный вид модуляторов осуществляет амплитудную модуляцию с помощью отражения светового потока от матрицы микрозеркал, поэтому излучение не претер-

певает паразитную фазовую модуляцию. Сейчас такие модуляторы в основном применяются в видеопроекторах, но могут быть использованы и для записи и воспроизведения голограмм [18, 19]. Первые исследования возможностей применения DMD-модулятора в когерентных оптических корреляторах опубликованы в статьях [20, 21] в то время, когда технология DMD только разрабатывалась и не была коммерчески доступной. Характеристики тех модуляторов были гораздо хуже современных: разрешение матрицы – 128×128 пикселей, максимальная частота смены бинарных изображений – 8 кГц, а размер пикселя – 51 мкм – и не позволяли им успешно конкурировать с другими типами модуляторов. Между тем большой интерес представляет применение доступных на сегодняшний день гораздо более совершенных модуляторов в оптических распознающих устройствах.

В работах [22–24] была рассмотрена возможность использования современных DMD-модуляторов в корреляторах, использующих когерентное излучение. В работе [25] сообщалось об экспериментальной реализации некогерентного коррелятора на основе современного DMD-модулятора, в ней были проведены эксперименты по оценке влияния технологических погрешностей микрозеркального модулятора на формирование корреляционных сигналов. Данная работа продолжает эти исследования по распознаванию изображений в таком корреляторе при динамическом изменении параметров распознавания.

### 1. Применение технологии DMD в оптических корреляторах

Цифровое микрозеркальное устройство DMD (*Digital Micromirror Device*) является основным элементом в технологии DLP (*Digital Light Processing*), разработанной компанией Texas Instruments [17] для использования в видеопроекторах. Микрозеркала отражают падающее излучение в двух направлениях под углами

около  $+15^\circ$  и  $-15^\circ$ , одно из направлений соответствует состоянию светлого пикселя, другое – тёмного пикселя. Основными преимуществами этой технологии являются высокое качество изображения при максимальном разрешении  $1920 \times 1080$ , малый размер пикселя матрицы (порядка 13 мкм), быстродействие (возможность смены бинарных изображений с частотой до 32 кГц) и др.

На качество выводимых изображений оказывают влияние технологические погрешности DMD-модуляторов: погрешность угла наклона микрозеркал, погрешность ориентации оси наклона микрозеркал, плоскостность выходного окна модулятора. Для многих областей применения такого типа модулятора важна лишь амплитудная модуляция излучения, и указанные погрешности не оказывают существенного влияния. Однако при использовании DMD-модулятора в качестве устройства вывода голограмм, как было показано в [26], происходит ощутимое ухудшение восстанавливаемого импульсного отклика, что уменьшает число отсчётов выводимых на модулятор голограмм.

В [22] предлагается схема оптического коррелятора, использующая два DMD-модулятора: один – для ввода изображений, другой – для отображения синтезированных голограмм Фурье. Были синтезированы полутонные голограммы [23], однако восстановленные изображения с таких голограмм, выведенных с помощью DMD-модулятора, оказались достаточно низкого качества. Возможным объяснением этого эффекта может служить отсутствие возможности у DMD-модулятора «мгновенно» формировать пиксели с промежуточными значениями амплитуды световой волны. В силу описанных выше причин в настоящее время не существует коммерчески доступных оптических корреляторов на базе таких модуляторов.

С другой стороны, совокупность характеристик DMD-модуляторов и опыт исследований по их применению дают хорошие основания считать, что современные DMD-модуляторы могут быть успешно использованы в качестве устройств оперативного вывода голографических фильтров в установках некогерентных оптических корреляторов. Более того, так как принцип работы DMD-модуляторов основан на отражении света от микрозеркал, в связи с чем излучение не претерпевает паразитную фазовую модуляцию, зависящую от длины волны, есть основания считать, что они могут быть использованы для реализации дисперсионного коррелятора [27], который работает с полностью некогерентным излучением и требует полного отсутствия паразитной фазовой модуляции внутри модулятора (которая неизбежно будет происходить в ЖК ПВМС). Возможность быстрой смены голографических фильтров, выводимых на модулятор, может быть применена в задачах динамического распознавания в реальном масштабе времени.

## 2. Экспериментальные результаты по распознаванию объектов в некогерентном корреляторе на основе DMD-модулятора

В настоящее время существует несколько возможностей реализации некогерентного коррелятора. При

построении большинства как когерентных, так и некогерентных корреляторов используется традиционная «4f-схема». Она же была использована в принципиальной схеме когерентного коррелятора на основе DMD-модулятора [22]. Предложенный в работе [25] коррелятор построен по схеме, использующей только один объектив для формирования корреляционного распределения, это позволяет оперативно подстраивать масштаб распознаваемых изображений. Применение такой схемы особенно целесообразно, так как распознавание в корреляторе осуществляется в пространственно-некогерентном свете. В выходной плоскости коррелятора формируется корреляционный сигнал по интенсивности, а не по амплитуде, как в когерентном корреляторе, что позволяет устранить фазовые искажения, влияющие на качество корреляционного сигнала.

Схема экспериментальной установки, использовавшейся в [25] и в данной работе, представлена на рис. 1.

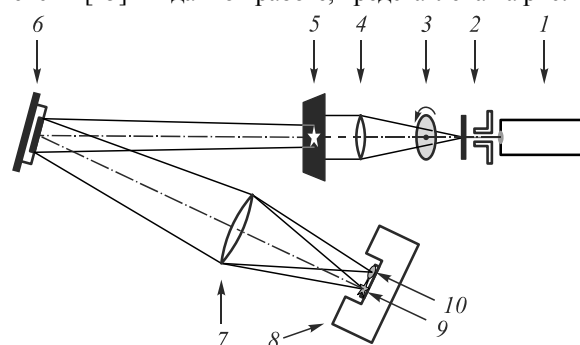


Рис. 1. Схема экспериментальной установки некогерентного голографического коррелятора на основе DMD-модулятора: 1 – лазер; 2 – микрообъектив с диафрагмой; 3 – вращающийся матовый рассеиватель; 4 – коллимирующий объектив; 5 – транспарант с изображением распознаваемого объекта; 6 – DMD-модулятор с выведенным на нём синтезированным голографическим фильтром; 7 – объектив; 8 – регистрирующая камера; 9 – нулевой порядок (изображение объекта); 10 – первый порядок дифракции (область корреляционного сигнала)

Излучение от твердотельного лазера 1 (длина волны 532 нм) проходит через коллимирующую систему (микрообъектив 2, диафрагма и объектив 4 с фокусным расстоянием 210 мм), в которой установлен вращающийся матовый рассеиватель 3 для разрушения пространственной когерентности излучения. Далее излучение проходит через транспарант 5 с изображением тестового объекта для распознавания. Этот блок схемы имитирует самосветящийся объект, излучающий пространственно-некогерентное излучение. Также возможен ввод объекта и при помощи модулятора света. Далее это излучение отражается от DMD-модулятора 6 с выведенным на нем голографическим фильтром, заранее синтезированным на компьютере под необходимый опорный объект. В выходной плоскости коррелятора расположена камера 8, регистрирующая формируемую объективом 7 структуру, включающую нулевой порядок 9 (изображение объекта) и первый порядок дифракции 10 (область корреляционного сигнала).

В экспериментальной установке был использован DMD-модулятор, произведённый компанией Texas Instruments 0.7 XGA 12° DDR (серия DLP7000). В качестве управляющего устройства DMD-модулятора использовалась материнская плата DLP-проектора, сигнал на которую подавался с компьютера. Для регистрации корреляционных сигналов использовалась камера Canon EOS 400D, шумовые характеристики которой приведены в [28].

При проведении экспериментов было использовано программное обеспечение [25], с помощью которого осуществлялось формирование опорного образа объекта, последующее его преобразование в голограмму и ее бинаризация. Эта же программа позволяет осуществлять динамический вывод голографических фильтров на DMD-модулятор и переключаться на ранее синтезированные фильтры, выбирая их из списка. Скорость переключения, определяемая возможностями модулятора, составила около 10 мкс, что позволяет максимально быстро зарегистрировать выходной сигнал и определить, как на него повлияли какие-либо изменения параметров голографического фильтра или опорного объекта.

В качестве тестовых распознаваемых объектов использовались различные изображения, например, изображения, негативы которых приведены на рис. 2.

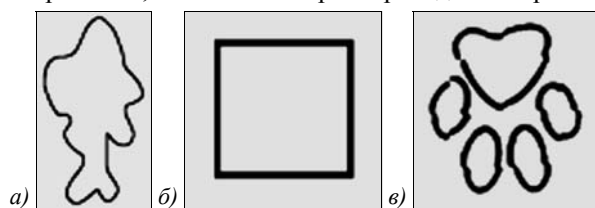


Рис. 2. Примеры использованных изображений тестовых распознаваемых объектов (негативы) на прозрачной в входной плоскости коррелятора: контур рыбы (а); контур квадрата (б), след (в)

На рис. 3 слева приведено зарегистрированное в первом порядке распределение при совпадении опорного и входного объектов (контуров рыбы), а справа – в случае несовпадения объектов. Из приведённых фотографий видно, что при совпадении объектов в области корреляционного сигнала наблюдается достаточно хорошо локализованный пик. При изменении входного объекта данный пик полностью деградирует.

На рис. 4 представлены результаты распознавания в случае, когда входной объект оставался неизменным, а на DMD-модулятор последовательно выводились голограммы-фильтры, синтезированные для различных объектов. При совпадении форм входного и опорного объектов (рис. 2б) наблюдается сигнал распознавания (рис. 4а). При несовпадении масштаба объектов (опорный объект больше входного); ориентации объекта (опорный объект повернут на 45°); формы объекта (опорный объект является контуром рыбы) локализованные корреляционные пики отсутствуют (рис. 4б–г соответственно). Таким образом, подтверждается эффективность работы коррелятора при динамическом изменении параметров распознавания.

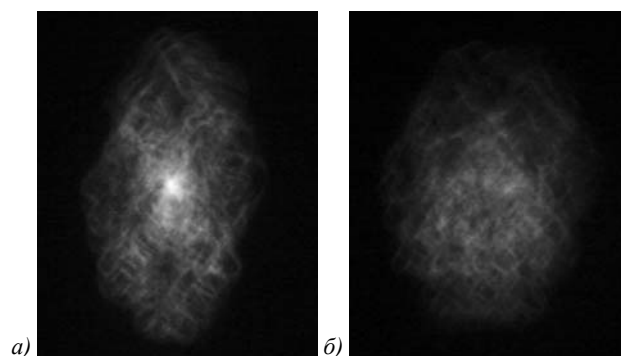


Рис. 3. Вид сигнала автокорреляции объекта с рис. 2а (слева) в сравнении с сигналом взаимной корреляции объектов с рис. 2а и 2б (справа)

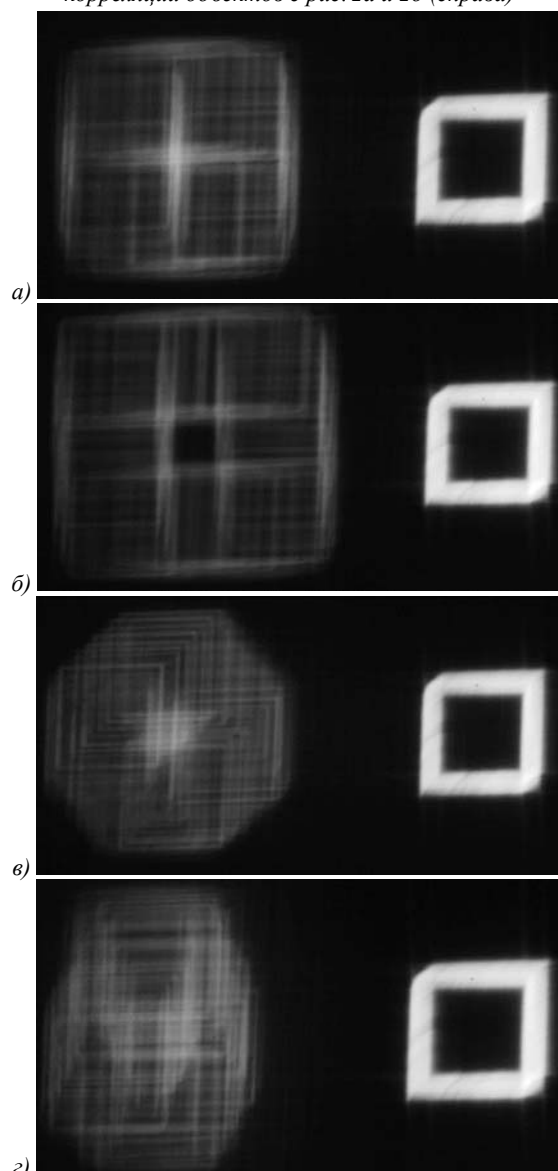


Рис. 4. Корреляционные сигналы (слева) для объекта с рис. 2б: автокорреляция (а); взаимная корреляция при несовпадении масштаба объектов (опорный объект больше входного) (б); взаимная корреляция при несовпадении ориентации объектов (опорный объект повернут на 45°) (в); взаимная корреляция при несовпадении формы объектов (опорный объект является контуром рыбы) (г)

Подобные эксперименты были проведены и для объекта с рис. 2а, их результаты представлены в виде графиков на рис. 5 и 6.



Рис. 5. График зависимости величины корреляционного пика от угла поворота опорного объекта (для объекта с рис. 2а)



Рис. 6. График зависимости величины корреляционного пика от масштаба опорного объекта (для объекта с рис. 2б)

Результаты экспериментов по распознаванию при различных углах ориентации опорного объекта представлены на рис. 5 (масштаб входного объекта при этом соответствует опорному). Из графика зависимости величины пика от угла поворота опорного объекта видно, что абсолютный максимум имеет место при угле поворота, равном 0 градусов, то есть при полном совпадении. Так как синтезируемые в проводимых тестовых экспериментах фильтры не являются инвариантными к повороту или изменению масштаба, отклонение угла приводит к уменьшению сигнала распознавания. На графике видно значительное уменьшение сигнала при изменении ориентации опорного объекта, причем даже поворот на 1 градус приводит к спаду величины пика приблизительно на 15%.

На рис. 6 показан график зависимости величины корреляционного пика от масштаба опорного объекта (ориентация входного объекта при этом соответствует опорному). При совпадении масштабов на графике также виден абсолютный максимум, изменение масштаба на 5% приводит к уменьшению величины пика как минимум на 20%, а при ещё больших увеличениях масштаба значение максимума сигнала корреляции значительно уменьшается. При этом пьедестал корреляционного сигнала становится выше (то есть степень локализованности пика ухудшается, что также является критерием при принятии решения о распознавании объекта).

Эти эксперименты проводились в режиме динамического вывода голографических фильтров на DMD-модулятор. Таким образом, подтверждается эффективность работы коррелятора при динамическом изменении параметров распознавания.

Проведём оценку производительности некогерентного коррелятора при использовании в нём DMD-модулятора. Она определяется временем переключения элементов матрицы модулятора при выводе голографических фильтров, которая составляет около 10 мкс. Таким образом, оказывается возможным формирование  $10^5$  корреляций за секунду.

### Заключение

Несмотря на успешное применение микрозеркальных модуляторов для различных задач, их использование в оптических корреляторах пока не получило широкого распространения. В данной работе была представлена экспериментальная установка оптического коррелятора, собранная по схеме с одним объективом. В корреляторе используется квазимонохроматическое пространственно-некогерентное излучение, синтезированные голографические фильтры выводятся на модулятор. Были проведены эксперименты по распознаванию тестовых объектов при изменении их параметров с динамическим выводом голографических фильтров. Получено, что при совпадении входного и опорного объектов наблюдался хорошо локализованный корреляционный пик, позволяющий сделать вывод об успешной идентификации объектов в корреляторе при использовании DMD-модулятора. Проведена оценка максимальной производительности такого некогерентного коррелятора, которая может достигать значения  $10^5$  корреляций за секунду. Экспериментально исследована разрешающая способность коррелятора, установлено, что поворот сложного распознаваемого объекта даже на  $1^\circ$  приводит к уменьшению корреляционного пика на 15%, изменение масштаба на 5% приводит к уменьшению корреляционного пика как минимум на 20%. Эти результаты будут применены при синтезе голографических фильтров, использование которых в таком корреляторе позволит добиться инвариантности к изменениям масштаба и повороту распознаваемых объектов. Также результаты работы будут использованы при экспериментальной реализации дисперсионного коррелятора, позволяющего осуществлять распознавание объектов по их пространственным и спектральным параметрам в режиме реального времени.

### Благодарности

Автор выражает благодарность инженеру кафедры лазерной физики НИЯУ МИФИ Д.Ю. Молодцову за создание и предоставление для экспериментов программного обеспечения для оперативного вывода синтезированных голографических фильтров на DMD-модулятор.

### Литература

1. **Lugt, A.V.** Signal detection by complex spatial filtering // IEEE Transactions on Information Theory. – 1964. – Vol. 10, Issue 2. – P. 139-145. – DOI: 10.1109/TIT.1964.1053650.

2. **Weaver, C.S.** A technique for optically convolving two functions / C.S. Weaver, J.W. Goodman // *Applied Optics*. – 1966. – Vol. 5, Issue 7. – P. 1248-1249. – DOI: 10.1364/AO.5.001248.
3. **Василенко, Г.И.** Голографические распознающие устройства / Г.И. Василенко, Л.М. Цибулькин. – М.: Радио и связь, 1985. – 312 с.
4. **Lohmann, A.W.** Matched filtering with self-luminous objects // *Applied Optics*. – 1968. – Vol. 7(3). – P. 561\_1-563. – DOI: 10.1364/AO.7.0561\_1.
5. **Потатуркин, О.Н.** Голографический метод обработки изображений в пространственно-некогерентном монохроматическом свете / О.Н. Потатуркин, В.И. Хоцкий. – В кн.: *Оптическая обработка информации* / под ред. С.Б. Гуревича. – Л.: ЛИЯФ, 1979. – С. 61-66.
6. **Juday, R.D.** Correlation with a spatial light modulator having phase and amplitude cross coupling // *Applied Optics*. – 1989. – Vol. 28, Issue 22. – P. 4865-4869. – DOI: 10.1364/AO.28.004865.
7. **Васильев, А.А.** Пространственные модуляторы света / А.А. Васильев, Д. Касасент, И.Н. Компанец, А.В. Парфенов. – М.: Радио и связь, 1987. – 320 с.
8. **Rózański, S.A.** Joint transform correlation using a ferroelectric liquid crystal spatial light modulator / S.A. Rózański, H. Pauwels // *Proceedings of SPIE*. – 2001. – Vol. 4535. – P. 126-131. – DOI: 10.1117/12.438434.
9. **Chao, T.-H.** Compact 512 x 512 grayscale optical correlator / T.-H. Chao, H. Zhou, G. Reyes // *Proceedings of SPIE*. – 2002. – Vol. 4734. – P. 9-12. – DOI: 10.1117/12.458412.
10. **Watanabe, E.** Fast face-recognition optical parallel correlator using high accuracy correlation filter / E. Watanabe, K. Kodate // *Optical Review*. – 2005. – Vol. 12, Issue 6. – P. 460-466. – DOI: 10.1007/s10043-005-0460-9.
11. **Xiao, G.** A novel compact parallel optical correlator / G. Xiao, P. Zhou, X. Li, H. Jia, Z. Fan, S. Yu // *Proceedings of SPIE*. – 2009. – Vol. 7513. – P. 75131V. – DOI: 10.1117/12.837947.
12. **Zeng, X.** Compact optical correlator based on one phase-only spatial light modulator / X. Zeng, J. Bai, C. Hou, G. Yang // *Optics Letters*. – 2011. – Vol. 36, Issue 8. – P. 1383-1385. – DOI: 10.1364/OL.36.001383.
13. **Евтихийев, Н.Н.** Макет инвариантного коррелятора на базе жидкокристаллических пространственно-временных модуляторов света / Н.Н. Евтихийев, С.Н. Стариков, Е.Ю. Злоказов, Е.Д. Проценко, И.В. Солякин, П.С. Стариков, Е.А. Шапкарина, Д.В. Шаульский // *Квантовая электроника*. – 2012. – Т. 42, № 11. – С. 1039-1041.
14. **Tang, M.** Optical correlation recognition based on LCOS / M. Tang, J. Wu // *Proceedings of SPIE*. – 2013. – Vol. 8913. – P. 89130F. – DOI: 10.1117/12.2032960.
15. **Cheremkhin, P.A.** Reduction of phase temporal fluctuations caused by digital voltage addressing in LC SLM "HoloEye PLUTO VIS" for holographic applications / P.A. Cheremkhin, N.N. Evtikhiev, V.V. Krasnov, V.G. Rodin, S.N. Starikov // *Proceedings of SPIE*. – 2014. – Vol. 9006. – P. 900615. – DOI: 10.1117/12.2037569.
16. **Cheremkhin, P.A.** Increasing reconstruction quality of diffractive optical elements displayed with LC SLM / P.A. Cheremkhin, N.N. Evtikhiev, V.V. Krasnov, V.G. Rodin, S.N. Starikov // *Proceedings of SPIE*. – 2014. – Vol. 9386. – P. 93860R. – DOI: 10.1117/12.2079011.
17. **Hornbeck, L.J.** Bistable deformable mirror device / L.J. Hornbeck, W.E. Nelson // *OSA Technical Digest Series*. – 1988. – Vol. 8. – P. 107-110.
18. **Nesbitt, R.S.** Holographic recording using a digital micromirror device / R.S. Nesbitt, S.L. Smith, R.A. Molnar, S.A. Benton // *Proceedings of SPIE*. – 1999. – Vol. 3637. – P. 12-20. – DOI: 10.1117/12.343767.
19. **Kreis, T.** Hologram reconstruction using a digital micromirror device / T. Kreis, P. Aswendt, R. Höfling // *Optics Engineering*. – 2001. – Vol. 40, Issue 6. – P. 926-933. – DOI: 10.1117/1.1367346.
20. **Florence, J.M.** Coherent optical correlator using a deformable mirror device spatial light modulator in the Fourier plane / J.M. Florence, R.O. Gale // *Applied Optics*. – 1988. – Vol. 27, Issue 11. – P. 2091-2093. – DOI: 10.1364/AO.27.002091.
21. **Hudson, T.D.** Real time optical correlator architectures using a deformable mirror spatial light modulator / T.D. Hudson, D.W. Trivett, D.A. Gregory, J.C. Kirsch // *Applied Optics*. – 1989. – Vol. 28, Issue 15. – P. 4853-4860. – DOI: 10.1364/AO.28.004853.
22. **Chao, T.-H.** High-speed optical correlator with custom electronics interface design / T.-H. Chao, T.T. Lu // *Proceedings of SPIE*. – 2013. – Vol. 8748. – P. 874803. – DOI: 10.1117/12.2018262.
23. **Chao, T.-H.** High-speed optical processing using digital micromirror device / T.-H. Chao, T.T. Lu, B. Walker, G. Reyes // *Proceedings of SPIE*. – 2013. – Vol. 9094. – P. 909402. – DOI: 10.1117/12.2054349.
24. **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. – P. 95980T. – DOI: 10.1117/12.2190700.
25. **Molodtsov, D.Yu.** Object recognition in non-coherent optical correlator based on DMD-modulator illumination / D.Yu. Molodtsov, V.G. Rodin // *Proceedings of SPIE*. – 2016. – Vol. 10176. – P. 101761A. – DOI: 10.1117/12.2268159.
26. **Molodtsov, D.Yu.** Impact of DMD-SLMs errors on reconstructed Fourier holograms quality / D.Yu. Molodtsov, P.A. Cheremkhin, V.V. Krasnov, V.G. Rodin // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2016. – Vol. 737. – P. 012074. – DOI: 10.1088/1742-6596/737/1/012074.
27. **Molodtsov, D.Yu.** The possibility of using DMD-SLM for hologram filters displaying in dispersive correlator / D.Yu. Molodtsov, V.G. Rodin, S.N. Starikov // *Physics Procedia*. – 2015. – Vol. 73. – P. 338-342. – DOI: 10.1016/j.phpro.2015.09.155.
28. **Cheremkhin, P.A.** Modified temporal noise measurement method with automatic segmentation of non-uniform target, its accuracy estimation and application to cameras of different types / P.A. Cheremkhin, N.N. Evtikhiev, V.V. Krasnov, V.G. Rodin, S.N. Starikov // *Optical Engineering*. – 2014. – Vol. 53, Issue 10. – P. 102107. – DOI: 10.1117/1.OE.53.10.102107.

#### *Сведения об авторе*

**Родин Владислав Геннадьевич**, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник кафедры лазерной физики, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ). Область научных интересов: информационная оптика, голография, спектральный состав излучения, распознавание образов.

ГРНТИ: 29.31.29.

*Поступила в редакцию 1 ноября 2017 г. Окончательный вариант – 22 декабря 2017 г.*

## A NON-COHERENT HOLOGRAPHIC CORRELATOR BASED ON A DIGITAL A MICROMIRROR DEVICE

V.G. Rodin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

### Abstract

The possibility of application of a digital micromirror device (DMD) as a spatial light modulator for outputting holographic filters in an optical correlator illuminated by quasi-monochromatic spatially incoherent radiation was discussed. The experimental setup of the optical correlator was assembled using a one-lens scheme. Experiments on the recognition of test objects with the synthesized dynamic holographic filters being output onto the DMD were performed. The results obtained allow one to conclude that object recognition can be successfully performed using the proposed scheme of a non-coherent correlator containing a digital micromirror device.

**Keywords:** digital micromirror device (DMD), spatial light modulators, incoherent optical radiation, correlators, holographic optical elements.

**Citation:** Rodin VG. A non-coherent holographic correlator based on a digital micromirror device. *Computer Optics* 2018; 42(3): 347-353. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-3-347-353.

**Acknowledgements:** The author wishes to thank D. Yu. Molodtsov, an engineer of the Laser Physics Department, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), who developed and kindly provided for the experiments the software for outputting holographic filters onto a DMD.

### References

- [1] Lugt AV. Signal detection by complex spatial filtering. *IEEE Trans Inform Theory* 1964; 10(2): 139-145. DOI: 10.1109/TIT.1964.1053650.
- [2] Weaver CS, Goodman JW. A technique for optically convolving two functions. *Appl Opt* 1966; 5(7): 1248-1249. DOI: 10.1364/AO.5.001248.
- [3] Vasilenko GI, Tsubulkin LM. Holographic recognition devices [In Russian]. Moscow: "Radio i svyaz" Publisher; 1985.
- [4] Lohmann AW. Matched filtering with self-luminous objects. *Appl Opt* 1968; 7(3): 561\_1-563. DOI: 10.1364/AO.7.0561\_1.
- [5] Potaturkin OI, Khotskin VI. Holographic method of image processing in space-incoherent monochromatic light [In Russian]. In book: Guravich SB, ed. *Optical Data Processing Leningrad: "LIYaPh" Publisher; 1979: 61-66.*
- [6] Juday RD. Correlation with a spatial light modulator having phase and amplitude cross coupling. *Appl Opt* 1989; 28(22): 4865-4869. DOI: 10.1364/AO.28.004865.
- [7] Vasil'ev AA, Casasent D, Kompanets IN, Parfenov AV. Spatial light modulators [In Russian]. Moscow: "Radio i svyaz" Publisher; 1987.
- [8] Rózański SA, Pauwels H. Joint transform correlation using a ferroelectric liquid crystal spatial light modulator. *Proc SPIE* 2001; 4535: 126-131. DOI: 10.1117/12.438434.
- [9] Chao T-H, Zhou H, Reyes G. Compact 512 x 512 gray-scale optical correlator. *Proc SPIE* 2002; 4734: 9-12. DOI: 10.1117/12.458412.
- [10] Watanabe E, Kodate K. Fast face-recognition optical parallel correlator using high accuracy correlation filter. *Opt Rev* 2005; 12(6): 460-466. DOI: 10.1007/s10043-005-0460-9.
- [11] Xiao G, Zhou P, Li X, Jia H, Fan Z, Yu S. A novel compact parallel optical correlator. *Proc SPIE* 2009; 7513: 75131V. DOI: 10.1117/12.837947.
- [12] Zeng X, Bai J, Hou C, Yang, G. Compact optical correlator based on one phase-only spatial light modulator. *Opt Lett* 2011; 36(8): 1383-1385. DOI: 10.1364/OL.36.001383.
- [13] Evtikhiev NN, Starikov SN, Protzenko 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. DOI: 10.1070/QE2012v042n11ABEH015009.
- [14] Tang M, Wu J. Optical correlation recognition based on LCOS. *Proc SPIE* 2013; 8913: 89130F. DOI: 10.1117/12.2032960.
- [15] Cheremkhin PA, Evtikhiev NN, Krasnov VV, Rodin VG, Starikov SN. Reduction of phase temporal fluctuations caused by digital voltage addressing in LC SLM "HoloEye PLUTO VIS" for holographic applications. *Proc SPIE* 2014; 9006: 900615. DOI: 10.1117/12.2037569.
- [16] Cheremkhin PA, Evtikhiev NN, Krasnov VV, Rodin VG, Starikov SN. Increasing reconstruction quality of diffractive optical elements displayed with LC SLM. *Proc SPIE* 2014; 9386: 93860R. DOI: 10.1117/12.2079011.
- [17] Hornbeck LJ, Nelson WE. Bistable deformable mirror device. *OSA Techn Digest Series* 1988; 8: 107-110.
- [18] Nesbitt RS, Smith SL, Molnar RA, Benton SA. Holographic recording using a digital micromirror device. *Proc SPIE* 1999; 3637: 12-20. DOI: 10.1117/12.343767.
- [19] Kreis T, Aswendt P, Höfling R. Hologram reconstruction using a digital micromirror device. *Opt Eng* 2001; 40(6): 926-933. DOI: 10.1117/1.1367346.
- [20] Florence JM, Gale RO. Coherent optical correlator using a deformable mirror device spatial light modulator in the Fourier plane. *Appl Opt* 1988; 27(11): 2091-2093. DOI: 10.1364/AO.27.002091.
- [21] Hudson TD, Trivett DW, Gregory DA, Kirsch JC. Real time optical correlator architectures using a deformable mirror spatial light modulator. *Appl Opt* 1989; 28(15): 4853-4860. DOI: 10.1364/AO.28.004853.
- [22] Chao T-H, Lu TT. High-speed optical correlator with custom electronics interface design. *Proc SPIE* 2013; 8748: 874803. DOI: 10.1117/12.2018262.
- [23] Chao T-H, Lu TT, Walker B, Reyes G. High-speed optical processing using digital micromirror device. *Proc SPIE* 2013; 9094: 909402. DOI: 10.1117/12.2054349.
- [24] Shaulskiy DV, Evtikhiev NN, Zlokazov EYu, Starikov SN, Starikov RS, Petrova EK, Molodtsov DYU. Variants of light modulation for MINACE filter implementation in 4-F correlators. *Proc SPIE* 2015; 9598: 95980T. DOI: 10.1117/12.2190700.
- [25] Molodtsov DYU, Rodin VG. Object recognition in non-coherent optical correlator based on DMD-modulator

- illumination. Proc SPIE 2016; 10176: 101761A. DOI: 10.1117/12.2268159.
- [26] Molodtsov DYu, Cheremkhin PA, Krasnov VV, Rodin VG. Impact of DMD-SLMs errors on reconstructed Fourier holograms quality. J Phys: Conf Ser 2016; 737: 012074. DOI: 10.1088/1742-6596/737/1/012074.
- [27] Molodtsov DYu, Rodin VG, Starikov SN The possibility of using DMD-SLM for hologram filters displaying in dispersive correlator. Physics Procedia 2015; 73: 338-342. DOI: 10.1016/j.phpro.2015.09.155.
- [28] Cheremkhin PA, Evtikhiev NN, Krasnov VV, Rodin VG, Starikov SN. Modified temporal noise measurement method with automatic segmentation of non-uniform target, its accuracy estimation and application to cameras of different types. Opt Eng 2014; 53(10): 102107. DOI: 10.1117/1.OE.53.10.102107.

---

*Author's information*

**Vladislav Gennadievich Rodin**, PhD, senior scientific researcher of Laser Physics department, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute). Research interests: information optics, holography, optical radiation spectra, pattern recognition.

---

*Received November 1, 2017. The final version – December 22, 2017.*

---