

## Когерентные дифракционные оптические системы с синтезированным комплексным импульсным откликом

*Е. Ю. Злоказов*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрены возможности применения когерентных дифракционных оптических схем на основе компьютерно-синтезированных голограмм для решения различных задач, связанных с формированием модельных изображений, оперативной реализацией заданного комплексного импульсного отклика оптической системы с большой пространственно-частотной базой, а также архивным хранением и высокоскоростной обработкой больших массивов цифровых данных.

*Ключевые слова:* оптическая обработка данных, архивная голографическая память, когерентные дифракционные оптические схемы, компьютерная голография, пространственно-временной модулятор света.

*Цитирование:* Злоказов, Е. Ю. Когерентные дифракционные оптические системы с синтезированным комплексным импульсным откликом / Е. Ю. Злоказов // HOLOEXPO 2021 : XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. — С. 22–28.

### Введение

Использование света для формирования, передачи и детектирования информационных сигналов является привлекательным благодаря высокой собственной частоте колебаний электромагнитных волн оптического диапазона (от 300 ПГц до 3 ППГц), а также возможности свободного и независимого распространения световых сигналов по воздуху, в стекле и в других прозрачных материалах и средах на различных длинах несущих волн, а также в различных направлениях или пространственных модах. Использование лазерных источников даёт возможность эффективного использования пространственных и временных состояний функции комплексной амплитуды светового поля в качестве степеней свободы для формирования сигналов с высокой информационной ёмкостью. Методы Фурье-оптики, информационной оптики и компьютерной голографии дают возможность создания оптических схем формирования и обработки сигналов с численно заданным комплексным импульсным откликом. Применение пространственно-временных модуляторов света вызывает особый интерес благодаря возможности оперативной реализации компьютерно-синтезированных голограмм, в схемах устройств различного назначения. Современные образцы ПВМС обладают до  $10^6$  элементов и скоростью переключения до 1 МГц. Это даёт возможность создания компактных устройств записи данных в системах архивной голографической памяти, а также построения специализированных устройств когерентных дифракционных линейных процессоров, обладающих производительностью до  $10^{13}$ – $10^{15}$  Опер./сек. при потребляемой мощности в преде-

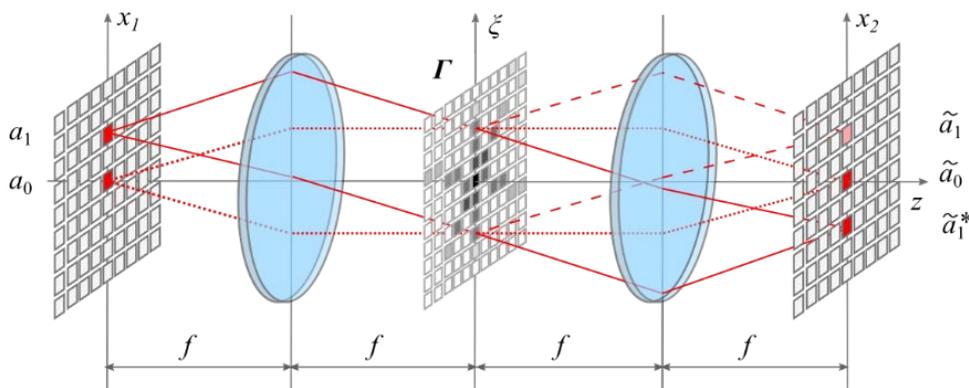


Рис. 1. Оптическая конфигурация 4- $f$

лах 100 Вт. Важной проблемой применения ПВМС, а также большинства материальных носителей является ограниченная модуляционная характеристика, требующая применение методов компьютерной голографии для реализации комплексных функций с большой пространственно-частотной базой. В данной работе представлен обзор основных принципов применения методов компьютерной голографии для таких практических задач, как формирование изображений, синтеза пучков с заданной комплексной амплитудной и формирование комплексного импульсного отклика оптической системы.

### 1. Когерентная дифракционная оптическая система

На примере 4- $f$  схемы, представленной на рис. 1, без потери общности для других конфигураций, рассмотрим основные процессы, используемые в Фурье-оптике и системах оптической обработки информации. Различают два процесса: формирование изображений и пространственная фильтрация сигналов. Если в плоскости  $X_1$  схемы сформировать изображение объекта  $A_1$ , представленного дискретным набором монохромных излучающих элементов  $\{a_n\}$ , то перевёрнутое изображение  $\tilde{A}_1^*$  сформируется в плоскости  $X_2$  в виде набора точек  $\{\tilde{a}_n^*\}$ . Другим способом сформировать изображение объекта  $A_1$  в плоскости  $X_2$  является размещение Фурье-голограммы  $\Gamma_1$  объекта  $A_1$  в пространственно-частотной плоскости  $\xi$ .

При освещении голограммы  $\Gamma_1$  плоским пучком, сформированным точечным источником  $a_0$ , размещённым в плоскости  $X_1$ , изображение объекта  $\tilde{A}_1$  а также перевёрнутое изображение  $\tilde{A}_1^*$  сформируются в плоскости  $X_2$ . Если одновременно сформировать изображение объекта  $A_1$  в плоскости  $X_1$  и реализовать Фурье-голограмму  $\Gamma_2$  некоторого объекта  $A_2$  в плоскости  $\xi$ , то в выходной плоскости появится изображение свёртки  $\langle A_1 * A_2 \rangle$ . Перечисленные процедуры лежат в основе широкого круга применений как 4- $f$  схемы, так и других голографических конфигураций для задач формирования 2-х и 3-х мерных изображений, формирования световых пучков с численно заданным распределением поля в пространстве и многоканальной обработки данных. Основной задачей реализации перечисленных процедур, является реализация голограммного элемента  $\Gamma$  с помощью материального носителя или ПВМС с большим пространственным разрешением. Важной проблемой является ограниченность возможности известных материалов и устройств по полной независимой модуляции и амплитуды и фазы света.

Табл. 1. Методы синтеза модели дифракционной структуры

| Метод  | Тип носителя | Ограничения ПЧБ                         |
|--|--------------|---|
| Биполярной интенсивности (внеосевой голограммы)                        | АМ, ФМ, БАМ  | $N_a \leq N_r/2$                        |
| Макропиксельный метод Ли — Буркхарда                                   | АМ           | $N_a \leq N_r/6$                        |
| Парафазного кодирования  | ФМ           | $N_a \leq N_r/2$                        |
| Квадратурных макропикселей   | БАМ          | $N_a \leq N_r/2$                        |
| Обобщённый метод квадратурных макропикселей                            | АМ/ФМ        | $N_a \leq N_r/4$                        |
| Поиск оптимальной проекции   | любой        | $N_a \leq N_r$ (ФМ)<br>$N_a \leq N_r/2$ |
| Итерационные методы:<br>Герцберга — Сэкстона, прямого перебора и т. д. | любой        | $N_a \leq N_r$ (ФМ)<br>$N_a \leq N_r/2$ |
| Прямая бинаризация   | АМ(2), ФМ(2) | $N_r = N_r^{bin}$                       |
| Макропиксельный бинарный растр   | АМ(2)        | $N_r = N_r^{bin}/2(q - 1)$              |
| Метод бинарных супер-пикселей  | АМ(2)        | $N_r = N_r^{bin}/q$                     |

## 2. Методы компьютерной голографии

Для получения голограммных элементов, реализующих комплексные функции  $A_1$  и  $A_2$  в схеме с рис. 1, используются методы компьютерной голографии. Процесс получения компьютерно-синтезированных голограмм включает в себя три основных этапа: 1) синтез (или рендер) модели объектной волны, 2) синтез модели дифракционной структуры и 3) физическая реализация дифракционной структуры на материальном носителе [1]. Целью первого этапа является поиск функционального представления комплексной модели объектной волны в плоскости голограммы. На этом этапе используется цифровая модель трёхмерного или двухмерного объекта, или двумерное изображение комплексной модели реализуемого отклика в виде набора распределённых в пространстве излучающих точек или полигонов. Далее, путём суммирования моделей элементарных волн, производится синтез функции объектной волны в плоскости голограммы. Для ускорения синтеза используют методы на основе таблиц соответствия и интегральные преобразования скалярной теории дифракции, реализованные с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье.

На втором этапе решается задача синтеза модели дифракционной структуры, формирующей восстановленную волну, функционально связанную с объектной волной. На этом этапе используется тип модуляционной характеристики носителя или устройства, с помощью которого планируется реализация голограммы. В общем случае выделяют несколько видов материальных носителей: чисто-амплитудные (АМ), чисто-фазовые (ФМ), с биполярной амплитудной модуляцией (БАМ), амплитудные с аддитивным фазовым сдвигом (АМ/ФМ), а также бинарные носители: амплитудные АМ(2) и фазовые ФМ(2). В табл. 1 представлены основные методы синтеза модели дифракционной структуры, а также ограничение пространственно-частотной базы реализуемых с помощью этих методов моделей [2]. Три последние строки таблицы посвящены перспективным методам бинарной реализации моделей дифракционных структур [3]. Третий этап заключается в физической реализации модели дифракционной

структуры на материальном носителе методами оптической проекции, литографии или голографической печати, а также путём вывода на экран ПВМС.

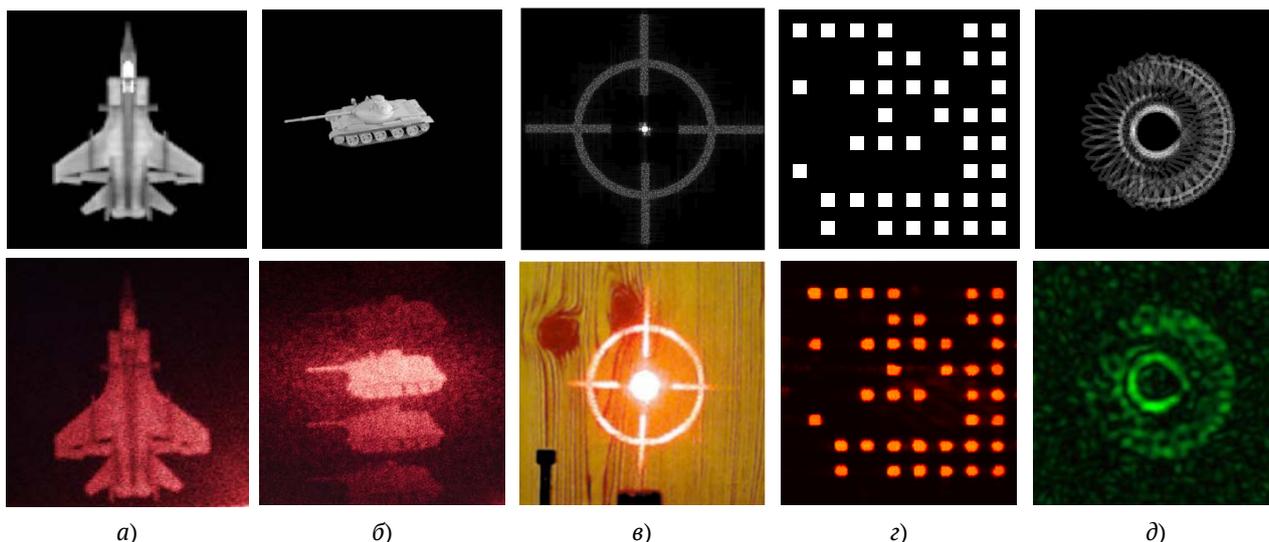
### **3. Формирование изображений с помощью компьютерно-синтезированных голограмм**

Формирование изображений объектов, представленных цифровыми моделями — одна из основных областей применения методов компьютерной голографии. В настоящее время продемонстрировано большое число примеров реализации КСГ для формирования изображения как полно- так и частично параллаксных изображений трёхмерных объектов, представленных численными моделями. К примеру, в работе [4] представлена КСГ из  $225\,000 \times 300\,000$  дискретных элементов размером 400 нм, формирующая полно-параллаксное 3-х мерное изображение. Типичные КСГ подобного типа состоят из не менее  $10^8$  элементов. В случае ПВМС максимальное число пикселей среди доступных устройств  $10^7$ , что ограничивает их применение для формирования изображений трёхмерных сцен с большим количеством излучающих элементов, однако позволяет успешно их применять для формирования изображений двухмерных объектов (рис. 2а и 2б), таких как символы в устройствах дополненной реальности [5] (рис. 2в), кодированные цифровые изображения [6–8] (рис. 2г), а также производить формирование комплексного импульсного отклика когерентных дифракционных корреляторов (рис. 2д).

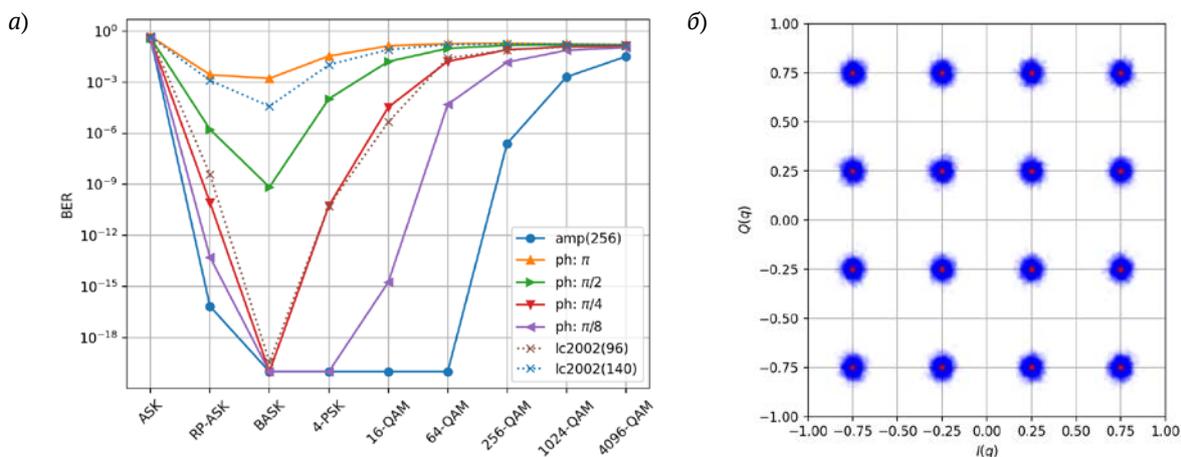
Преимуществами использования КСГ в системах АГП является возможность применения комплексной модуляции или случайных фазовых масок для представления страницы данных в процессе синтеза [6], а также возможность создания компактных устройств мультиплексной записи КСГФ страниц данных на носитель методом оптической проекции [7, 8]. На рис. 3 представлены результаты численного исследования возможности КСГ для реализации комплексно-модулированных страниц данных [9]. Так, в случае АМ реализации дифракционной структуры методом биполярной интенсивности с сохранением 256 уровней градации полутона возможно формирование страницы данных, подвергнутой вплоть до 256-QAM модуляции с величиной BER ниже  $10^{-6}$  (рис. 3а). Однако в случае ФМ реализации или в случае наличия аддитивного фазового сдвига (АМ/ФМ) точность восстановленного изображения значительно снижается. На рис. 3б представлено сигнальное созвездие страницы данных, представленной типом цифровой модуляции 16-QAM, восстановленной с КСГФ реализованной с помощью амплитудного носителя, обладающего аддитивным фазовым сдвигом, аналогичным амплитудному ПВМС LC-2002 [10] с сохранением 96 уровней квантования характеристики.

### **4. Реализация компьютерно-синтезированных голографических фильтров**

Одной из перспективных прикладных задач применения методов компьютерной голографии является реализация комплексных фильтров в когерентных дифракционных корреляторах изображений. На рис. 4 представлен результат исследования влияния метода реализации КСГФ на точность корреляционного распознавания объектов в условиях поворота цели. В качестве фильтра использовался составной инвариантный фильтра LPCC [4].

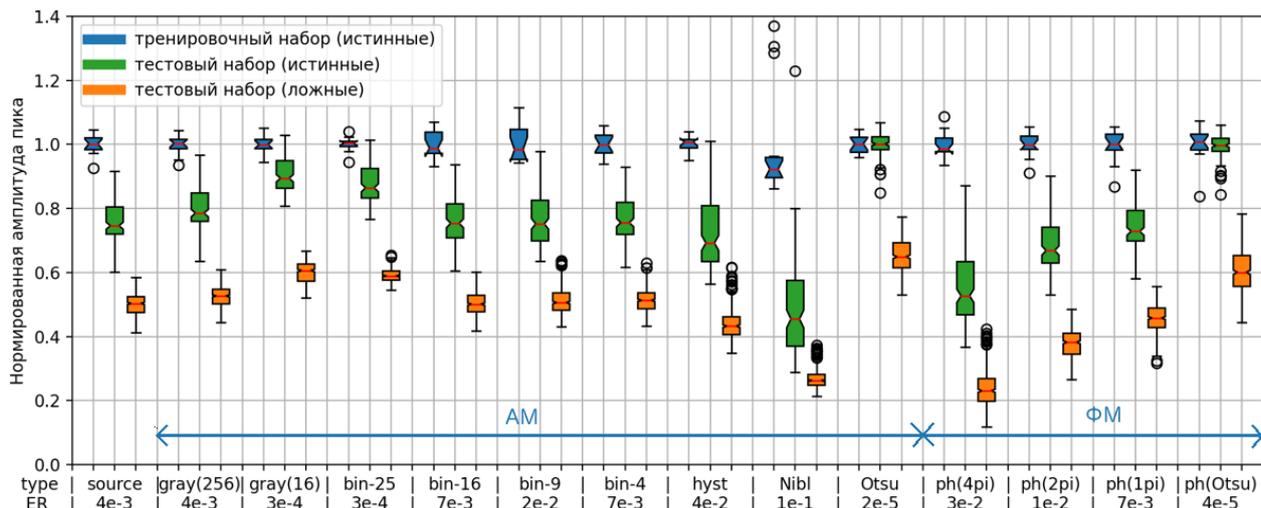


**Рис. 2.** Цифровые модели объектов (верхний ряд) и восстановленные изображения с применением КСГФ (нижний ряд), реализованной с помощью: чисто-фазового ПВМС (а); бинарного амплитудного ПВМС (б); на материальном носителе методом контактного копирования с бинарной мастер матрицы (в); методом проекционной записи в схеме на основе дисплея OLED (г); бинарного амплитудного носителя (д)

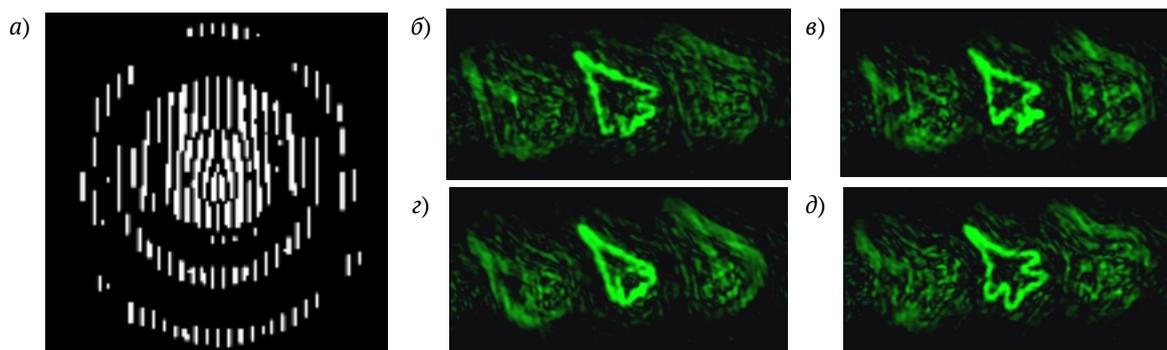


**Рис. 3.** Анализ возможности формирования изображений комплексно-модулированной страницы данных  $1000 \times 2000$  элементов с помощью КСГФ размерностью  $2048 \times 2048$  элементов

Из представленного результата видно, что большинство методов амплитудной реализации, с сохранением менее 4-х уровней градации пропускация позволяют классификацию объектов с вероятностью ошибки не выше 2%. В случае прямой бинарной реализации КСГФ выбор метода бинаризации существенно определяет точность метода. Так в случае локальных методов, гистограмм и Ниблэка, вероятность ошибки составила 4% и 10% соответственно, а в случае глобального метода Оцу — 0,02%, что оказалось ниже, чем у исходного комплексного фильтра. На рис. 5 представлены результаты реализации 4-*f* коррелятора с бинарной амплитудной модуляцией в плоскости голографического фильтра [12].



**Рис. 4.** Варианты реализации инвариантных фильтров в схеме 4-*f* коррелятора в виде голографических фильтров. Представлены диаграммы разброса значений нормированной амплитуды корреляционного пика для различных случаев реализации КСГФ



*a* — изображение центральной части КСГ инвариантного фильтра, представленного на рис. 2д, бинаризованной методом Оцу; *б* — выходной отклик коррелятора на истинный объект, слева от изображения объекта — яркий корреляционный пик; *в–д* — выходные отклики коррелятора на ложные объекты

**Рис. 5.** Выходные сигналы 4-*f* коррелятора с бинарной модуляцией в плоскости голограммного фильтра

В случае фазовой модуляции (рис. 4) при глубине модуляции фазы более чем  $\pi$  радиан, несмотря на высокую дифракционную эффективность, точность оказалась низкой. Однако при бинаризации функции фазового аргумента методом Оцу до дискретных значений 0 и  $\pi$  также наблюдается увеличение точности классификации.

### Заключение

Таким образом, представленные в работе результаты демонстрируют возможности по применению методов компьютерной голографии для построения оптико-цифровых устройств визуализации, обработки и хранения цифровой информации.

### Список источников

[1] **Kyoji Matsushima, K.** Introduction to Computer Holography: Creating Computer-Generated Holograms as the Ultimate 3D Image. — Springer Nature, 2020.

- [2] **Злоказов, Е. Ю.** Методы и алгоритмы компьютерного синтеза голограммных элементов для получения комплексного импульсного отклика оптических систем обработки информации на основе современных пространственных модуляторов света / Е. Ю. Злоказов // Квантовая электроника. — 2020. — Том 50. — № 7. — С. 643–652.
- [3] **Евтихийев, Н. Н.** Высокоскоростная оперативная реализация голографических и дифракционных элементов с применением микрзеркальных пространственно-временных модуляторов света / Н. Н. Евтихийев, Е. Ю. Злоказов, В. В. Краснов и др. // Квантовая электроника. — 2020. — Том 50. — № 7. — С. 667–674.
- [4] **Matsushima, K.** Very Large-Scale Computer-Generated Hologram for 3D Display // Design & Fabrication (ODF'18), Hiroshima, 2018. — 2018. — P. 30S4-02.
- [5] **Zlokazov, E. Yu.** Computer-generated Fourier hologram in optical devices of visual observation / E. Yu. Zlokazov, A. Yu. Betin, S. S. Donchenko et al. // Proceedings of 10th International Symposium on Display Holography ISDH-2015. — 2015. — P. 196–197.
- [6] **Betin, A. Yu.** [Holographic memory optical system based on computer-generated Fourier holograms](#) / A. Yu. Betin, V. I. Bobrinev, S. B. Odinokov, N. N. Evtikhiev, R. S. Starikov, S. N. Starikov, E. Yu. Zlokazov // Applied Optics. — 2013. — Vol. 52. — № 33. — P. 8142–8145.
- [7] **Betin, A. Yu.** [Holographic memory system based on projection recording of computer-generated 1D Fourier holograms](#) / A. Yu. Betin, V. I. Bobrinev, S. S. Donchenko, S. B. Odinokov, N. N. Evtikhiev, R. S. Starikov, S. N. Starikov, E. Yu. Zlokazov // Applied Optics. — 2014. — Vol. 53. — № 28. — P. 6591–6597.
- [8] **Odinokov, S. B.** [Application of optoelectronic micro-displays for holographic binary data recorder based on computer generated Fourier holograms](#) / S. B. Odinokov, E. Yu. Zlokazov, A. Yu. Betin, S. S. Donchenko, R. S. Starikov, N. M. Verenikina // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). — 2016. — Vol. 25. — № 4. — P. 255–261.
- [9] **Zlokazov, E. Yu.** [Transparency function presentation of computer generated Fourier holograms for complex data page restoration](#) / E. Yu. Zlokazov // Japanese Journal of Applied Physics. — 2019. — Vol. 58. — № SKKD04. — P. 1–6.
- [10] **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 и др. // Компьютерная Оптика. — 2019. — Том 43. — № 2. — С. 200–208.
- [11] **Hassebrook, L. G.** [Linear phase coefficient composite filter banks for distortion-invariant optical pattern recognition](#) / L. G. Hassebrook, B. V. Kumar, L. D. Hostetler // Optical Engineering. — 1990. — Vol. 29. — № 9. — P. 1033–1043.
- [12] **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. — № 6. — P. 065803.