

## Оптическое кодирование матричных контейнеров цифровых данных в пространственно-некогерентном свете

*В. В. Краснов, И. П. Рябцев, А. В. Шифрина*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Разработан универсальный матричный контейнер цифровых данных с широкими диапазонами настраиваемых параметров для использования в системах оптической обработки информации. Применение для коррекции ошибок кодов Боуза — Чоудхури — Хоквингема обеспечивает высокую устойчивость нового контейнера к шумам и искажениям. По результатам экспериментов, новый контейнер способен скорректировать до 7 раз большее количество ошибок по сравнению с QR-кодом версии H при 1,5 раза меньшей плотности записи информации. Результаты оптических экспериментов по кодированию бинарных и 4-х градационных контейнеров размером до  $256 \times 256$  элементов в безлинзовой схеме с пространственно-некогерентным освещением демонстрируют безошибочное декодирование информации.

*Ключевые слова:* оптическое кодирование, контейнер цифровых данных, коды коррекции ошибок, пространственно-некогерентное освещение, безлинзовая схема, жидкокристаллический пространственно-временной модулятор света.

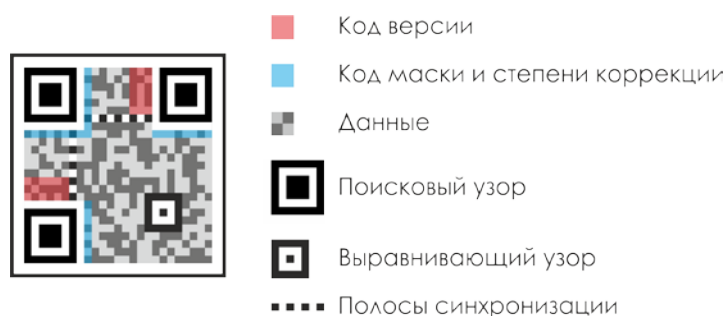
*Цитирование:* Краснов, В. В. Оптическое кодирование матричных контейнеров цифровых данных в пространственно-некогерентном свете / В. В. Краснов, И. П. Рябцев, А. В. Шифрина // НОЛОЕХРО 2021 : XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. — С. 296–305.

### Введение

Для ввода цифровых данных в оптическую систему используются три основных способа: прямое представление, цифровое представление с использованием кодировок и упаковка информации в специализированные контейнеры. Наиболее часто используются первый и третий способ [1–3]. В случае систем оптического кодирования информации такой выбор обусловлен значительным уровнем шумов в системе: информация представляется в виде крупных уединенных изображений либо применяются устойчивые к шумам контейнеры.

Самым простым способом ввода цифровой информации в оптическую систему является прямое представление, которое сводится к использованию уединенных изображений, чаще всего бинарных. Основными недостатками этого способа ввода являются низкая скорость ввода и высокий уровень помех. Низкая скорость обусловлена тем, что в большинстве случаев на изображении помещается лишь небольшой текст. При уплотнении размещения информации, например, за счет уменьшения шрифта или межстрочных интервалов, шумы, возникающие в оптической системе, приводят к низкому качеству зарегистрированного изображения.

Другим распространенным способом ввода цифровой информации в оптическую систему является применения специализированных матричных контейнеров. Наиболее популярным матричным контейнером цифровых данных, используемым в оптических системах, на сегодняшний день является QR-код [4–8]. Главными преимуществами QR-кодов являются



**Рис. 1.** Составные элементы QR-кода

большая информационная емкость и возможность коррекции ошибок при извлечении информации. Помимо закодированной информации QR-коды содержат набор служебных элементов (рис. 1).

Несмотря на свою распространенность QR-коды имеют ряд недостатков при применении их для задач оптического кодирования.

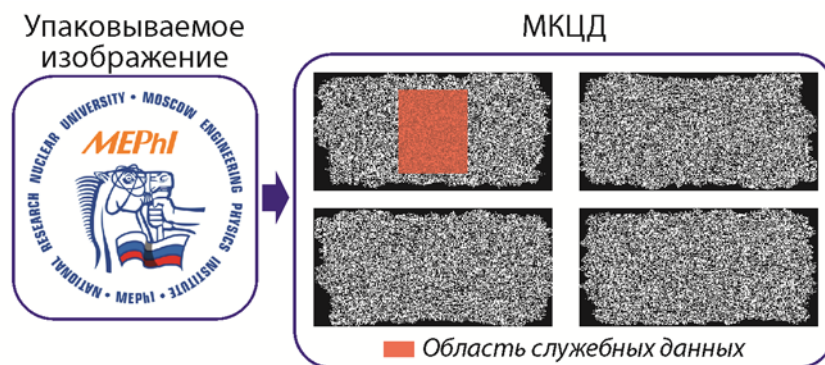
Избыточное для задач оптического кодирования количество служебных элементов приводит с одной стороны к более низкой плотности записи информации, с другой — к невозможности декодирования всего QR-кода в случае повреждения служебного блока. Также к недостаткам относятся ограниченный набор размеров контейнеров (от  $21 \times 21$  отсчетов в версии 1, до  $177 \times 177$  отсчетов в версии 40) и ограниченный набор степеней коррекции ошибок (L — 7%, M — 15%, Q — 25%, H — 30%). Кроме того, наличие хорошо различимых служебных блоков и строго прямых границ является демаскирующим фактором.

## **1. Матричный контейнер цифровых данных на основе кодов с коррекцией ошибок**

Задача создания нового матричного контейнера цифровых данных (МКЦД), специализированного именно для задач систем оптического кодирования, определяется отсутствием готового решения. Методы, используемые сейчас для представления данных в графическом виде, обладают рядом недостатков: или они высокочувствительны к искажениям, возникающим в оптической системе (прямое представление), или обладают неподходящими жёстко заданными характеристиками и избыточными служебными элементами (QR-коды).

Однако принципы, на которых основан самый популярный из используемых в оптическом кодировании контейнер — QR-код, — несомненно полезны. В первую очередь это использование кодов с коррекцией ошибок. Таким образом разрабатывать новый контейнер было решено используя схожие принципы и учитывая проанализированные выше недостатки.

В основе предлагаемого МКЦД так же, как и в случае QR-кодов, лежит использование кодов с коррекцией ошибок. Однако вместо байтовых РС кодов используются бинарные коды Боуза — Чоудхури — Хоквингема (БЧХ коды). Они лучше приспособлены для работы с данными, представленными в бинарном виде, что позволяет без дополнительных затрат коди-



**Рис. 2.** Упаковка графического файла в МКЦД, представляющий собой последовательность из четырёх связанных между собой сообщений

ровать не только текстовые сообщения, но вообще любую информацию, считывая содержащий её файл в битовом представлении. Хотя формально количество ошибок, которые может скорректировать БЧХ код ниже, чем РС код, в графическом представлении в случае БЧХ кодов считаются ошибки в отдельных модулях, а не в блоках по 8 модулей, как для РС кодов. Как будет показано далее, для оптических задач эта разница существенна и компенсирует формально более низкую степень избыточности БЧХ кодов.

Сам по себе МКЦД не накладывает никаких ограничений на формат упаковываемых в него данных. Это могут быть как буквенно-числовые последовательности, так и аудио— или видеофайлы, изображения и т. д. Упаковываемый файл считывается из памяти компьютера как битовая строка, и все последующие операции осуществляются уже с ней. Как следствие, нет и строгих ограничений на размер упаковываемого файла.

Т. к. современный медиа-контент оперирует размерами порядка Гб, в общем случае один файл упаковывается в несколько контейнеров. Чтобы избежать уменьшения области полезных данных из-за дублирования служебной информации, мы разделили служебные и информационные элементы МКЦД и сформировали его как последовательность из нескольких сообщений (изображений). По центру первого сообщения расположен блок служебных данных, все остальные сообщения содержат только кодированные данные.

На рис. 2 приведён пример упаковки полноцветного изображения в МКЦД, представляющий собой последовательность из четырёх связанных между бинарных сообщений. Упаковываемое изображение имело следующие параметры: размер  $128 \times 128$  пикселей, 10 Кб, формат JPG. Каждое из сообщений МКЦД было бинарным и имело размер  $128 \times 256$  модулей.

В общем случае все сообщения МКЦД обладают двумя внешними элементами: это накладываемая поверх сообщения выравнивающая маска и контур произвольной формы. Как и в случае QR-кодов, маска — это паттерн, накладываемый на сообщение для выравнивания его средней яркости и устранения участков, состоящих только из белых или чёрных модулей. Маска накладывается и снимается с использованием логической операции XOR, благодаря чему исходные данные могут быть восстановлены однозначно. Однако в отличие от QR-

кодов, маски, используемые в МКЦД, генерируются случайно, что может служить дополнительной степенью защиты упакованных данных.

Контур произвольной формы создан для сглаживания чётких границ, проступающих в кодированном изображении при использовании МКЦД в некоторых системах оптического кодирования. Контур создаётся случайным образом, доступным для управления параметром является его ширина. Использование контура опционально.

Вся информация о параметрах МКЦД и упакованного в него файла размещается в центре первого сообщения в виде служебного блока. Блок состоит из десяти элементов, каждый из которых содержит информацию об одном из следующих параметров:

- Полный размер сообщения (с учётом выбранной ширины контура произвольной формы при его наличии). Размером может быть указана любая пара целых неотрицательных чисел больше 64 (ограничение на минимальный размер связано с размером служебного блока  $64 \times 52$  модуля). Однако стоит учитывать, что слишком большие сообщения не имеют практического смысла, поскольку существует ограничение в виде разрешения ПВМС, на который планируется выводить сообщения. Размеры по осям  $X$  и  $Y$  независимы.

- Значение длины блока БЧХ кода  $n$ . Как будет показано далее, существует оптимальная длина блока в 511 бит, однако она может быть выбрана и меньше в случае использования МКЦД с малыми размерами сообщений. В общем случае область полезных данных, доступная для записи, не кратная размеру одного блока, и эта разница приводит к потерям в плотности записи (например, для сообщения размером  $70 \times 70$  модулей и длиной блока 511 бит в каждом сообщении будет оставаться незаполненным примерно 6,5% области полезных данных). Чтобы избежать таких потерь, возможен переход к более коротким длинам блока.

- Степень избыточности БЧХ кода. Важно отметить, что данный параметр определяет именно избыточность БЧХ кода, а не самого контейнера. Степень избыточности МКЦД ниже, что объясняется гауссовым характером распределения шумов в сообщении. Также дополнительные ограничения накладывает выбранная длина блока БЧХ кода. Длина блока и степень избыточности задают коэффициенты БЧХ кода, используемого для кодирования упаковываемых данных.

- Формат упаковываемого файла. Поскольку упакованные в контейнер данные, прочитанные побитово, впоследствии надо будет извлечь и восстановить исходный файл, необходимо сохранить и передать информацию о его формате.

- Стартовое значение ядра генератора случайных чисел для создания маски. Как было отмечено ранее, накладываемые на сообщения маски генерируются случайно. Для этого используется генератор случайных чисел. Его ядро, используемое для создания маски для второго сообщения, передаётся в служебном блоке. Для всех последующих сообщений новые значения ядра получаются добавлением к стартовому значению фиксированного числа (например, порядкового номера этого сообщения).

– Количество градаций яркости сообщений. Формального ограничения на количество градаций яркости МКЦД сам по себе не накладывает, на практике же оно будет ограничено ОСШ регистрирующей камеры.

– Ширина контура произвольной формы или же его отсутствие. Задается в процентах от размера области полезных данных сообщения, и определяет ширину контура с одной стороны.

– Количество сообщений. Показывает, сколько последующих сообщений относится к одному передаваемому файлу.

– Степень заполненности последнего сообщения. В общем случае последнее сообщение в последовательности заполнено не полностью (т. к. длина упаковываемого файла не кратна информационной ёмкости одного сообщения) и при извлечении данных необходимо определить, какую часть сообщения они занимают.

Каждый из перечисленных выше параметров либо задаётся пользователем в виде численного значения (размер сообщения, длина блока БЧХ кода и его степень избыточности, количество градаций яркости, ширина контура произвольной формы), задаётся произвольно (стартовое значение ядра генератора случайных чисел) либо определяется на основе упаковываемого файла (формат, количество сообщений, степень заполненности последнего сообщения). После определения, все параметры (кроме степени заполненности) кодируются высокоустойчивым кодом БЧХ{255, 13} (вплоть до 59 ошибок может быть скорректировано в блоке длиной 255 бит, что соответствует степени избыточности 23,1%) Степень заполненности кодируется кодом БЧХ{511, 28} (вплоть до 111 ошибок в блоке 511 бит, степень избыточности 21,7%). Большая длина блока для степени заполненности необходима для сохранения схожей степени избыточности при большей длине входных данных.

Второй коэффициент БЧХ кода (длина его сообщения  $k$ ) определяет максимальный размер в битах данных, которые могут быть кодированы в один блок:  $2^k$ . Если кодируется целое число, то его максимальное значение будет 8192 для БЧХ{255, 13} — это максимальный размер сообщения по одной оси и максимальное же количество сообщений в последовательности, относящихся к одному МКЦД. Для степени заполненности используется БЧХ код с большей длиной блока, т. к. её значение может превышать 13-битовый порог.

На рис. 3 показан пример расположения блока служебной информации в первом сообщении и его разбиение на отдельные элементы.

Каждый контейнер содержит, во-первых, упаковываемые данные, закодированные БЧХ кодами. Данные заполняют пространство сообщения построчно (обходя служебный блок в первом сообщении). И во-вторых белый шум. В общем случае доступная для заполнения полезными данными ёмкость сообщения не кратна выбранному размеру блока БЧХ кода, из-за чего появляется не заполненная область. Во избежание появления демаскирующего элемента данная область заполняется белым шумом. Также схожие области большего размера появляются в последнем сообщении в последовательности, поскольку как правило оно заполняется частично.



Рис. 3. Кодированный служебный блок МКЦД и его составные элементы

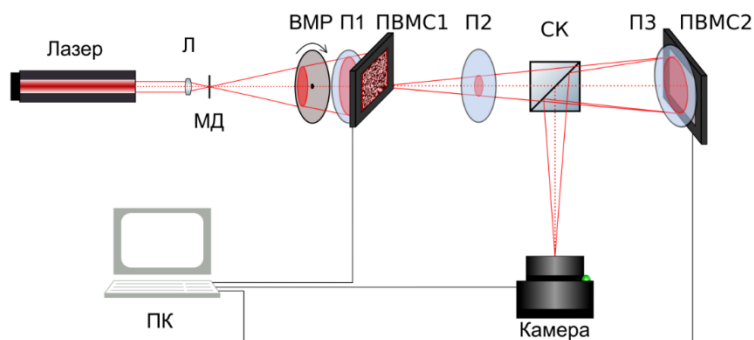


Рис. 4. Зависимость значения экспериментальной степени коррекции ошибок от величины расчетной степени коррекции ошибок

После того, как все упаковываемые данные кодированы, они перемешиваются. Это необходимо для ослабления влияния локализации шумов. Если шумы сконцентрированы в некоторой области сообщения, перемешивание бит выходных данных позволяет распределить ошибки по большему количеству блоков и тем самым значительно уменьшить вероятность того, что в каком-то конкретном блоке количество ошибок превысит возможности коррекции ещё до того, как будет достигнута степень избыточности контейнера в целом.

## 2. Анализ устойчивости к шуму МКЦД и QR-кода

Для анализа устойчивости к шуму использовался шум типа «соль с перцем» хорошо соответствующий спекл-шуму в когерентных оптических системах. Один элемент МКЦД и QR-кода занимал один пиксель изображения. Степень коррекции ошибок МКЦД варьировалась в диапазоне 2–22%, для QR-кода использовались все доступные 4 степени коррекции: версии L, M, Q или H, что соответствует 7, 15, 25 или 30%. Экспериментальное значение степени коррекции определялось по предельной величине шума, при котором контейнер еще успешно считывается. Результаты представлены на рис. 4. Для МКЦД получилась предсказуемо линейная за-



**Рис. 5.** Безлинзовая схема дифракционного кодирования, работающая с пространственно-некогерентным освещением, на базе двух ЖК-ПВМС

висимость экспериментальной степени коррекции от расчетной. Все 4 версии QR-кода обладают крайне низкой экспериментальной степенью коррекции на уровне 0,7% что обусловлено тем что QR-код не создавался для работы в режиме 1 элемент — 1 пиксель, и не имеет защиты служебных блоков, при порче которых считывание становится невозможным.

При сравнении МКЦД и QR-кода, обеспечивающих идентичную экспериментальную степень коррекции ошибок на уровне 0,7%, плотность упаковки информации оказывается на 15% выше у МКЦД.

### **3. Экспериментальная установка безлинзового оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением**

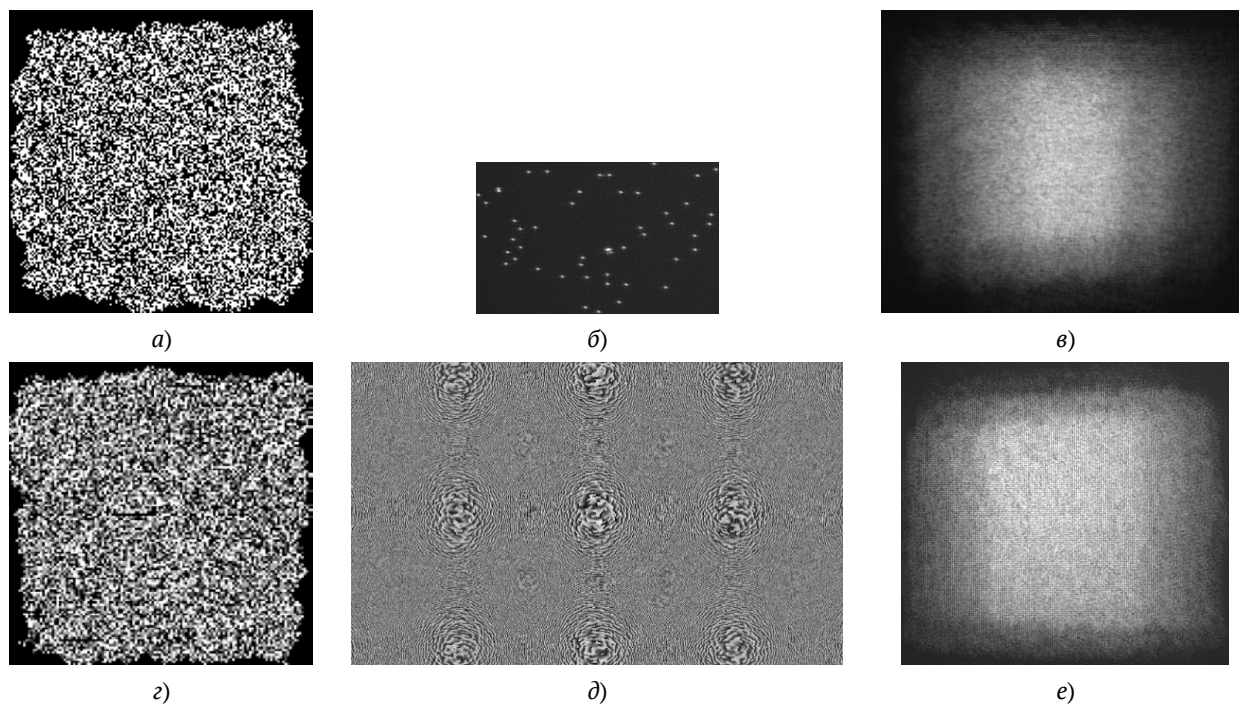
Безлинзовая схема дифракционного оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением на базе двух жидкокристаллических пространственно-временных модуляторов света (ПВМС) приведена на рис. 5.

В качестве источника излучения использовался неодимовый лазер с длиной волны 532 нм. Комбинация линзы (Л) и микродиафрагмы (МД) формирует фильтрованный расходящийся световой пучок. Вращающийся матовый рассеиватель (ВМР) разрушает пространственную когерентность. В качестве ПВМС1 для ввода кодируемых изображений использован амплитудный ЖК-ПВМС HoloEye LC2012, имеющий  $1024 \times 768$  пикселей размером  $36 \times 36$  мкм. В качестве ПВМС2 для отображения кодирующего ДОЭ использован фазовый ЖК-ПВМС HoloEye GAEA-2, имеющий  $4160 \times 2464$  пикселей размером  $3,74 \times 3,74$  мкм. Светоделительный куб (СК) установлен таким образом, что на фотосенсоре камеры формируется свертка изображения ПВМС1 с ФРТ кодирующего ДОЭ. Для регистрации изображений использовалась камера Flare 28MP с разрешением  $7920 \times 6004$  пикселей и быстродействием 30 к/с.

### **4. Экспериментальная апробация матричных контейнеров цифровых данных в системе оптического кодирования**

В качестве кодируемой информации использовался текстовый файл, содержащий 1807 символов. Синтезировались контейнеры с 2-мя и 4-мя градациями яркости размером от  $120 \times 120$





**Рис. 6.** Оптическое кодирование бинарных (а и в) и 4-х градационных (з и е) МКЦД: изображение кодируемого МКЦД (а и з), кодирующий ключ (б) и соответствующий ему ДОЭ (д), кодированное изображение (в и е)

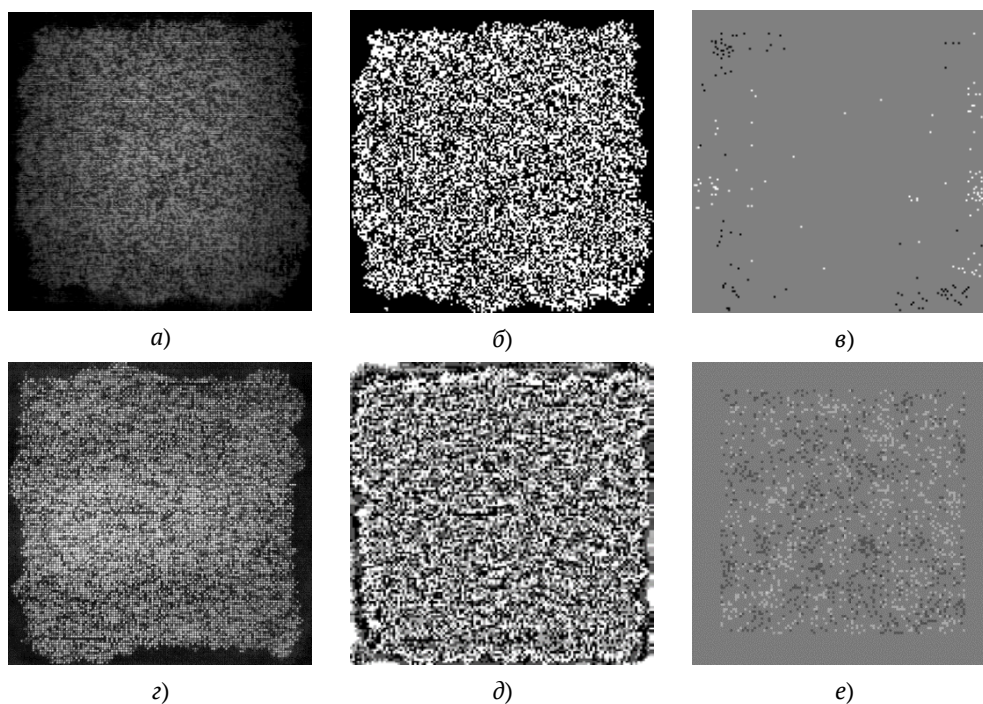
до  $254 \times 254$  элементов и степенью коррекции ошибок от 10% до 20%. Примеры 2-х и 4-х градационных контейнеров приведены на рис. 6а и 6з соответственно. Для кодирования использовались бинарные кодирующие ключи размером  $128 \times 128$  отсчетов, с плотностями 0,001, 0,002 и 0,003. Пример использованного ключа с плотностью ненулевых отсчетов 0,003 и соответствующий ему кодирующий фазовый ДОЭ с  $4000 \times 2464$  отсчетами приведены на рис. 6б и 6д соответственно. Пример зарегистрированных кодированных изображений приведен на рис. 6в и 6е.

Декодирование проводилось методом инверсной фильтрации с регуляризацией по Тихонову [9]. Далее осуществлялось преобразование растров декодированных изображений к исходным с использованием корреляционного критерия для нахождения точных значений параметров преобразования. Затем осуществлялось квантование, после чего полученные изображения сравнивались с исходными и проводился подсчет ошибок по информативной области. Примеры декодированных изображений с 2 и 4 градациями яркости до и после квантования, а также карты распределения ошибок по изображениям приведены на рис. 7.

В случае контейнеров с 2 градациями яркости в зависимости от их размера и плотности использованных ключей, доля ошибочно декодированных элементов варьировалась в диапазоне 0,0004–0,0035, в случае 4 градаций — 0,14–0,18. Столь резкий рост числа ошибок при использовании 4 градаций яркости свидетельствует о недостаточном отношении сигнал/шум системы.

Во всех случаях информация была успешно извлечена из контейнера после декодирования. Несмотря на то что 4-х градационные контейнеры при том же размере вмещают в 2 раза





**Рис. 7.** Примеры декодированных изображений с 2 (а–в) и 4 (z–e) градациями яркости до (а и z) и после (б и д) квантования, а также карты распределения ошибок по изображениям (в и е)

больше информации, учитывая частоты появления ошибок и закладывая необходимую степень коррекции ошибок при синтезе контейнеров, для технических параметров реализованной установки, пропускная способность составляет 9,8 Мбит/с при использовании 2-х градаций яркости и всего 2,5 Мбит/с при использовании 4-х.

### Заключение

Предложен и реализован новый универсальный матричный контейнер цифровых данных (МКЦД), основанный на битовых кодах с коррекцией ошибок и специализированный для задач оптического кодирования. Разработанный контейнер обладает широким диапазоном доступных параметров: размер от 64 до 8192 отсчётов по одной стороне с произвольным соотношением сторон, коррекция ошибок в диапазоне от 1% до 22%, до 8192 контейнеров может быть объединено в последовательность, содержащую один файл. МКЦД не чувствителен к локализации шумов за счёт случайного порядка заполнения и может быть окружён контуром произвольной формы для устранения прямых границ.

По результатам численных экспериментов продемонстрирована до 23 раз большая устойчивость МКЦД к ошибкам в сравнении с QR-кодами. При сходной степени коррекции МКЦД обеспечивает на 15% большую плотность упаковки.

Осуществлена экспериментальная апробация бинарных и многоградационных МКЦД в безлинзовой схеме оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением. Демонстрировано безошибочное считывание информации из декодированных изображений.

### Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант №19-19-00498.

### Список источников

- [1] **Liu, S.** [A review of optical image encryption techniques](#) / S. Liu, C. Guo, J. T. Sheridan // Optics & Laser Technolog. — 2014. — Vol. 57. — P. 327–342.
- [2] **Javidi, B.** [Roadmap on optical security](#) / B. Javidi, A. Carnicer, M. Yamaguchi, T. Nomura, E. Pérez-Cabré, M. S. Millán, N. K. Nishchal, R. Torroba, J. F. Barrera, W. He, X. Peng, A. Stern, Y. Rivenson, A. Alfalou, C. Brosseau, C. Guo, J. T. Sheridan, G. Situ, M. Naruse, T. Matsumoto, I. Juvells, E. Tajahuerce, J. Lancis, W. Chen, X. Chen, P. W. H. Pinkse, A. P. Mosk, A. Markman // Journal of Optics. — 2016. — Vol. 18. — № 8. — P. 083001. — 39 p.
- [3] **Nishchal, N. K.** Optical Cryptosystems / N. K. Nishchal. — IOP Publishing, 2019.
- [4] **Barrera, J. F.** [Optical encryption and QR codes: secure and noise-free information retrieval](#) / J. F. Barrera, A. Mira, R. Torroba // Optics Express. — 2013. — Vol. 21, — № 5. — P. 5373–5378.
- [5] **Trejos, S.** [Optimized and secure technique for multiplexing QR code images of single characters: Application to noiseless messages retrieval](#) / S. Trejos, J. F. Barrera, R. Torroba // Journal of Optics. — 2015. — Vol. 17. — № 8. — P. 85702. — 10 p.
- [6] **Jiao, S.** [QR code based noise-free optical encryption and decryption of a gray scale image](#) / S. Jiao, W. Zou, X. Li // Optics Communications. — 2017. — Vol. 387. — P. 235–240.
- [7] **Qin, Y.** [Binary image encryption in a joint transform correlator scheme by aid of run-length encoding and QR code](#) / Y. Qin, Z. Wang, H. Wang, Q. Gong // Optics & Laser Technology. — 2018. — Vol. 103. — P. 93–98.
- [8] **Qin, Y.** [Optical information encryption based on incoherent superposition with the help of the QR code](#) / Y. Qin, Q. Gong // Optics Communications. — 2014. — Vol. 310. — P. 69–74.
- [9] **Тихонов, А. Н.** Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. — М. : Наука, 1979.