

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-10-13-23

УДК 621.391.64

Использование голографических методов передачи изображений по многомодовому оптическому волокну для повышения пропускной способности волоконно-оптических линий связи

Александр Леонидович Тимофеев^{1✉}, Альберт Ханович Султанов²,
Иван Константинович Мешков³, Азат Ринатович Гизатулин⁴

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

¹a_l_t@inbox.ru <https://orcid.org/0000-0003-2137-803X>

²sultanov.ah@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-2830-3498>

³mik.ivan@bk.ru <https://orcid.org/0000-0003-3479-3072>

⁴azat_poincare@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-0753-0608>

Аннотация

Предмет исследования. Исследовалась возможность передачи цифровой информации в виде голограммы по многомодовому волокну. **Цель работы.** Повышение скорости передачи по многомодовому волокну цифровой информации в виде изображений путём обеспечения более высокой устойчивости к модовой дисперсии. **Метод.** Для передачи цифровой информации по многомодовому волокну передаваемому цифровому блоку ставится в соответствие цифровая голограмма, для построения которой используется представление входного цифрового блока координатами светящейся точки на плоскости. Голограмма такого объекта — зонная пластинка Френеля с координатами центра, определяемыми входным блоком данных. Изображение голограммы передаётся в многомодовом режиме. Для восстановления значения исходного массива на приёмной стороне голограмму, полученную на выходе волокна, необходимо подвергнуть обратному преобразованию. Это можно сделать оптическим способом, создавая интерференционную картину в плоскости фотоприёмной матрицы и определяя координаты наиболее яркой точки. Цифровой способ восстановления исходного блока данных — путём обработки фиксируемого фотоприёмной матрицей изображения принятой голограммы. **Основные результаты.** Показано, что методы передачи изображений по многомодовому волокну могут быть использованы для передачи произвольной цифровой информации. Проблема модовой дисперсии и других видов искажений, возникающих при передаче по волокну, решается путём использования голограммы вместо изображения. **Практическая значимость.** При передаче информации в виде голограммы размером 32×32 за один такт передаётся от 10 до 40 бит. Это означает увеличение скорости передачи информации по многомодовому волокну в 10–40 раз по сравнению с одномодовой передачей.

Ключевые слова: передача изображений, многомодовое волокно, цифровая голография, модовая дисперсия

Благодарность: работа выполнена за счёт гранта Российского научного фонда № 22-29-00041, <https://rscf.ru/project/22-29-00041/>

Ссылка для цитирования: Тимофеев А.Л., Султанов А.Х., Мешков И.К., Гизатулин А.Р. Использование голографических методов передачи изображений по многомодовому оптическому волокну для повышения пропускной способности волоконно-оптических линий связи // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 10. С. 13–23. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-10-13-23>

Коды OCIS: 060.0060, 090.0090, 060.2330.

Use of holographic methods of image transmission over multimode optical fiber to increase the bandwidth of fiber-optic communication lines

ALEKSANDR TIMOFEEV¹✉, ALBERT SULTANOV², IVAN MESHKOV³, AZAT GIZATULIN⁴

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

¹*a_l_t@inbox.ru* <https://orcid.org/0000-0003-2137-803X>

²*sultanov.ah@mail.ru* <https://orcid.org/0000-0002-2830-3498>

³*mik.ivan@bk.ru* <https://orcid.org/0000-0003-3479-3072>

⁴*azat_poincare@mail.ru* <https://orcid.org/0000-0002-0753-0608>

Abstract

Subject of study. The possibility of digital data transmission in the form of a hologram over a multimode fiber was investigated. **The aim of the study is to** improve the transmission rate of digital information in the form of images over the multimode fiber by providing higher resistance to modal dispersion. **Method.** To transmit digital information over the multimode fiber the transmitted digital block is associated with a digital hologram, for the construction of which the representation of the input digital block by the coordinates of a luminous point on the plane is used. The hologram of that kind of object is a Fresnel zone plate with center coordinates determined by the input data block. The hologram image is transmitted in a multimode mode. To restore the value of the original array on the receiving side the hologram obtained at the output of the fiber shall be retransformed. This can be done optically by creating an interference pattern in the plane of the photoreceiving matrix and determining the coordinates of the brightest point. The digital method of restoring the original data block is processing the image of the received hologram fixed by the photodetector matrix. **Main results.** It is shown that the methods of image transmission over the multimode fiber can be used to transmit arbitrary digital information. The problem of the modal dispersion and other types of distortions that occur during transmission over fiber is solved by using the hologram instead of the image. **Practical significance.** When transmitting information in the form of a 32×32 hologram, from 10 to 40 bits are transmitted per cycle. It means that the information transmission rate over multimode fiber increases 10–40 times compared to single-mode transmission.

Keywords: image transmission, multimode fiber, digital holography, modal dispersion

Acknowledgment: the study was supported by the grant of Russian Science Foundation № 22-29-00041, <https://rscf.ru/project/22-29-00041/>

For citation: Timofeev A.L., Sultanov A.H., Meshkov I.K., Gizatulin A.R. Use of holographic methods of image transmission over multimode optical fiber to increase the bandwidth of fiber-optic communication lines [In Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 10. P. 13–23. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-10-13-23>

OCIS codes: 060.0060, 090.0090, 060.2330.

ВВЕДЕНИЕ

Пропускная способность волоконно-оптических линий связи непрерывно растёт. В 2020 году для одномодового волокна при передаче цифровой

информации достигнута скорость 178 Тбит/с [1]. В то же время в оптике передача изображения происходит с несопоставимо более высокой скоростью — полное изображение пере-

носятся в пространстве волновым фронтом за один период световой волны (2×10^{-15} с).

Идея передачи изображения по многомодовому волокну возникла вскоре после появления волоконной оптики [2]. Для такого использования многомодового волновода необходимо придать ему способность контролируемым образом распределять информацию об изображении между отдельными модами на входе волновода, а затем упорядоченно извлекать её на выходе. Многомодовые оптические волокна открывают большие перспективы для увеличения пропускной способности передачи данных, особенно для таких приложений, как оптические системы связи [3], волоконные лазеры [4] и эндоскопическая визуализация [5–9]. Однако фазовые искажения (задержки) при распространении света препятствуют сохранению деталей изображения [10]. Самой большой проблемой для передачи изображения через многомодовое волокно является его модовая дисперсия, поскольку фазовые (временные) задержки приводят к существенному нарушению передаваемого изображения, которое начинается уже на малых расстояниях даже в идеальных прямых волокнах [11].

Целью данной работы является повышение скорости передачи по многомодовому волокну цифровой информации в виде изображений путём обеспечения более высокой устойчивости к модовой дисперсии.

1. МЕТОДЫ ПЕРЕДАЧИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПО МНОГОМОДОВОМУ ВОЛОКНУ

Для многомодовых ступенчатых волокон существует формула приближённого вычисления количества мод [12]

$$M \approx V^2/2, \quad (1)$$

где V — нормированная частота, определяемая как

$$V = 2\pi r_1 NA/\lambda, \quad (2)$$

где NA — числовая апертура волокна, r_1 — радиус сердцевины волокна, λ — длина волны излучения. В [9] описана модель распространения изображения в многомодовом волокне для случая, когда расстояние между изо-

бражаемым объектом и апертурой волокна на несколько порядков превышает λ , а также сделано предположение о приближении слабонаправляющего волокна, когда разность между показателем преломления сердцевины n_1 и оболочки n_2 составляет меньше 1% — такое приближение позволяет перейти к формализму линейно-поляризованных (ЛП) мод. В этом случае можно предположить, что через волокно распространяются только параксиальные лучи, и поле, распространяющееся вдоль волокна, можно описать как

$$E(r, \phi, z) = \begin{cases} \sum_{n,m} a_{nm} \psi_{nm}(r, \phi) \exp(-j\beta_{nm}z), & r \leq r_1 \\ 0, & r > r_1 \end{cases}, \quad (3)$$

где

$$\psi_{nm}(r, \phi) = \frac{J_n(k_{nm}r) \exp(jn\phi)}{N_{nm}^{1/2}}. \quad (4)$$

Моды волокна описываются функциями Бесселя, n и m представляют соответственно азимутальный и радиальный порядок; N_{nm} — нормирующий интеграл; a_{nm} — модовый весовой коэффициент, зависящий от пространственного распределения падающего излучения, β_{nm} — постоянная распространения, разная для каждой моды, вызывающая разность фаз между модами, что является причиной модовой дисперсии. Как было сказано выше, в приближении слабонаправляющего волокна можно рассматривать ЛП моды, полученные комбинацией поперечных электрических (ПЭ), поперечных магнитных (ПМ) и гибридных электрических (ГЭ) мод, имеющих одинаковую постоянную распространения β , — говорят, что моды являются вырожденными. Такие моды удовлетворяют общему дисперсионному соотношению, полученному в результате упрощения характеристического уравнения при $n_1 \approx n_2$:

$$\frac{uJ_m(u)}{J_{m+1}(u)} = -\frac{\omega K_m(\omega)}{K_{m+1}(\omega)}, \quad (5)$$

где $J_m(u)$ и $K_m(\omega)$ — функции Бесселя первого и второго рода порядка m , соответственно,

описывающие поле моды в сердцевине и оболочке, а параметры u и ϖ определены как

$$\begin{aligned} u &= r_1 \sqrt{(k_0 n_1)^2 - \beta^2}, \\ \varpi &= r_1 \sqrt{\beta^2 - (k_0 n_2)^2}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $k_0 = 2\pi/\lambda$ — волновое число. В данном случае вырожденность мод подразумевает сильную связь мод в рамках одной модовой группы (например, мода ЛП₀₁ образована модами ГЭ₁₁ и ПЭ₀₁), однако смещение мод между различными группами (например, между ЛП₀₁ и ЛП₁₁) будет гораздо меньше. Тем не менее, в кварцевых многомодовых волокнах сильная модовая связь будет наблюдаться уже на расстояниях порядка 300 м [13]. Сильная модовая связь означает уменьшение модовой дисперсии, что весьма актуально в рамках рассматриваемой задачи.

В [9] предложен алгоритм вычисления и коррекции модовой дисперсии, основанный на разделении и выравнивании вклада каждой моды. На основании моделирования сделан вывод, что алгоритм работает с волокнами как со ступенчатым, так и с плавным показателем преломления, а также с волокнами любой длины. В [14] рассмотрена задача повышения эффективности ввода спектральной мощности излучения в волокно и предложено кодировать спектр для формирования широкополосного сигнала, что эквивалентно замене мультиплексирования по длине волны на мультиплексирование с кодовым разделением. В [15] проведён анализ предпринятых попыток обойти ограничения, накладываемые модовой дисперсией, и выделено три подхода. Первый — компенсация разности набега фаз различных мод за счёт изменения структуры волновода, второй — выравнивание фазовой скорости за счёт создания особой структуры передаваемого через волновод электромагнитного поля и третий — использования специального кодирования изображения на входе волновода и обратного декодирования на выходе. Отмечается, что эти методы не дали существенного продвижения в решении задачи. В то же время показано, что моды волновода являются собственными функциями преобразования Фурье и предложено передавать через волновод не само изображение, а его фурье-спектр, формируемый линзой. Тот факт, что

фурье-компоненты электромагнитного поля при распространении вдоль волновода в условиях вынужденной параксиальности не могут расходиться в пространстве, приводит к независимости разрешающей способности системы от длины волновода. В итоге в [15] сделан вывод, что переход к пространственному спектру может позволить передавать изображения на неограниченное расстояние, а для выравнивания фазовых скоростей и исключения межмодовых взаимодействий (в случае деформаций волокна) можно добавить специальные дифракционные оптические элементы [16].

Основной недостаток использования визуализирующего оптического элемента, например линзы, состоит в том, что требуется предварительная калибровка оптической системы. База данных калибровочных пар вход/выход, которая сохраняется в цифровом виде, используется для формирования изображения на выходе волокна. Если в оптической системе происходят какие-либо изменения после сбора данных калибровки, то параметры системы быстро ухудшаются. В частности, изгиб волокна является основным ограничивающим фактором для таких систем [17]. В ряде работ предложен другой подход к аппроксимации неизвестной функции передачи многомодового волокна, который состоит в отправке большого количества входных данных (не обязательно ортогональных) по сравнению со степенями свободы системы и сборе выходных данных с целью изучения свойств передачи с помощью нейронной сети глубокого обучения [18–22]. Возможно, наиболее важно то, что дрейф характеристик системы (таких как изгиб) может быть включён в тренировочный набор и приведёт к повышению надёжности работы. В работе [19] продемонстрирована визуализация изображений при температурных и механических колебаниях волокна длиной 1 км с помощью нейронной сети.

Тем не менее, несмотря на многочисленные попытки, предпринятые в этой области, к настоящему времени проблема качественной передачи достаточно сложных изображений по волокну не решена. В то же время остаётся недостаточно исследованной ещё одна возможность использования ограниченного потенциала многомодового волокна как канала передачи (сравнительно небольшое количество параксиальных мод, высокий уровень модовой

дисперсии и других искажений) — возможность повышения скорости передачи по оптоволокну произвольной цифровой информации.

2. ПЕРЕДАЧА ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Один из способов повышения скорости передачи — увеличение количества параллельных каналов с помощью мультиплексирования с пространственным разделением каналов (Spatial Division Multiplexing, SDM) [23]. Этот метод использует поперечную пространственную протяжённость многомодового волокна для создания параллельных каналов передачи данных. Однако приемлемое качество связи с допустимым уровнем ошибок, обусловленных модовой дисперсией и потерями в волокне, получается только на коротких расстояниях. В [24] рассмотрена и подтверждена экспериментально передача сигналов с пространственным мультиплексированием в оптоволокне длиной до 1 км, правда, для этого пришлось использовать маломодовое волокно с 3 пространственными потоками. Это решение вполне может быть использовано для организации оптической распределительной сети в зданиях. В [25, 26] рассмотрены способы уменьшения межмодовой интерференции, которые позволяют увеличить число мод в маломодовом волокне до 10 и более.

Несмотря на успехи в этом направлении, остаётся актуальной задача разработки более эффективных методов использования многомодового волокна для высокоскоростной передачи информации. Рассмотрим технологию передачи изображения по многомодовому волокну для передачи цифровой информации произвольного вида. Очевидным решением является преобразование цифрового массива, подлежащего передаче, в изображение. Однако на этом пути возникают сложности, обусловленные различием критериев, используемых для оценки качества передачи изображения, предназначенного для визуального восприятия, и передачи произвольного цифрового массива для последующей машинной обработки. В первом случае допустимы достаточно большие искажения и оценка качества субъективна, во втором — необходимо побитное совпадение передаваемого и принимаемого массива. В условиях многомодовой передачи в передаваемый сигнал искажения

вносят модовая дисперсия, межмодовая интерференция (возникающая, например, при деформациях волокна), волновод, играющий роль фильтра пространственных частот, расстривание изображения из-за дискретности фурье-спектра и другие источники. Поэтому необходима специальная форма представления цифрового массива в виде изображения.

Для повышения устойчивости передаваемой информации к ошибкам и искажениям, возникающим в процессе передачи, представляет интерес передача по волокну не изображения, соответствующего входному цифровому массиву, а его голограммы, и использование специфического свойства голографии — делимости голограммы, обеспечивающего восстановление исходного изображения по сильно искажённой голограмме. Использование голограммы для повышения помехоустойчивости цифровых каналов связи описано в [27–29], а для атмосферных оптических линий связи — в [30]. Однако в этих случаях информация передаётся по последовательному каналу связи и поэтому используется одномерный массив исходных данных и одномерная голограмма. Для использования голограммы как формы представления изображения голограмма должна быть двумерной и служить кодированным изображением цифрового массива, подлежащего передаче.

Возможности использования голограмм в процессе передачи изображения по многомодовому волокну исследованы в работах [31–36]. В [31] показано, что набор отдельных голограмм, каждая из которых создаёт одно целевое пятно, может быть объединён в сложную суперпозицию для быстрой генерации нескольких точек. В работе [32] описана система, динамически компенсирующая с помощью цифровой голограммы нестабильность наведения луча, внешние возмущения, вносящие аберрации низкого порядка, и флуктуации относительной фазы мод, поддерживаемых волокном. В [33–35] рассмотрена проблема, возникающая в голографических оптических пинцетах, где легко вычисляются фазовые голограммы для одной ловушки и показано, что для множественных ловушек можно получить распределение интенсивности, близкое к суперпозиции интенсивностей отдельных голограмм [36].

Во всех этих случаях голограмма несёт информацию об исходном изображении, зало-

женную в сравнительную яркость точек изображения. Поэтому передаваемая голограмма подвержена влиянию модовой дисперсии, межмодовой интерференции, температурных и механических колебаний волокна в той же степени, что и исходное изображение. Для повышения устойчивости передаваемой информации к ошибкам, вызванным всеми этими факторами, в [29] предложено использовать для представления исходного блока цифровой информации не двоичный, а единичный позиционный код. В этом случае оптическим объектом, для которого строится голограмма, является точечный источник на чёрном фоне, а информация закладывается в координаты точки на поле объекта. Яркость объекта не имеет значения, поэтому для её задания достаточно одного бита (0 или 1). Результатом кодирования является простейшая голограмма — зонная пластинка Френеля, координаты центра которой несут кодируемую информацию, и изображение которой передаётся по волокну. В приёмнике целью декодирования является не восстановление яркости каждой точки переданной голограммы, а вычисление координат центра зон Френеля. Именно это обуславливает высокую устойчивость данного метода ко всем видам искажений передаваемого изображения.

Рассмотрим возможность передачи по многомодовому волокну поблочной цифровой информации, где каждому блоку соответствует изображение зонной пластинки, координаты центра которой заданы передаваемым блоком. Например, 10-разрядный блок данных разделяется на две 5-разрядные координаты яркой точки на чёрном исходном изображении размером 32×32 , имеющем 1024 пиксела. Эти же координаты имеет центр зон Френеля (передаваемой голограммы). Очевидно, что число пикселей голограммы не должно превышать число мод в волокне.

Изображение голограммы передаётся по волокну одним из рассмотренных способов многомодовой передачи и подвергается всем присущим выбранному способу видам искажений.

Для восстановления значения исходного массива на приёмной стороне голограмму, полученную на выходе волокна, необходимо подвергнуть обратному преобразованию. Это можно сделать оптическим способом, создавая интерференционную картину в плоскости

фотоприёмной матрицы и определяя координаты наиболее яркой точки. Операцию восстановления исходного массива можно провести и цифровым способом, обрабатывая фиксируемое фотоприёмной матрицей изображение принятой голограммы. Небольшой размер передаваемой голограммы (не более 1 кбит — массив 32×32 однобитных точек) позволяет сделать это несложными аппаратными ресурсами.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В процессе передачи голограммы по многомодовому волокну она подвергается фазовым искажениям из-за наличия модовой дисперсии, кроме этого возникают искажения вследствие присущей волокну чувствительности к тепловым, акустическим, механическим возмущениям. Все эти причины в итоге приводят к ошибкам в передаваемом цифровом массиве — инверсии однобитных пикселей принимаемой цифровой голограммы. Соответственно наиболее полным критерием качества передачи цифровой информации является побитное сравнение переданного и принятого цифрового массива, оцениваемое зависимостью вероятности ошибки восстановления принятого массива от интенсивности битовых ошибок в канале передачи.

Моделирование передачи цифровой информации по многомодовому волокну проведено в среде MATLAB. Реализованный алгоритм содержит следующие операции:

- преобразование входного блока данных в изображение (виртуальный объект);
- построение голограммы объекта;
- введение в цифровую голограмму случайных ошибок, вызванных модовой дисперсией и другими причинами;
- цифровое восстановление объекта по голограмме;
- преобразование изображения объекта в выходной цифровой блок данных.

Входной блок данных представляет собой 10-разрядное двоичное слово, которое используется для задания координат (X, Y) единственной точки с уровнем «1» на изображении объекта размером 32×32 , все остальные точки которого имеют нулевое значение (рис. 1а). Голограмма объекта — изображение зонной пластинки, на котором центр зон Френеля имеет координаты (X, Y) единичной точки объекта (рис. 1б).

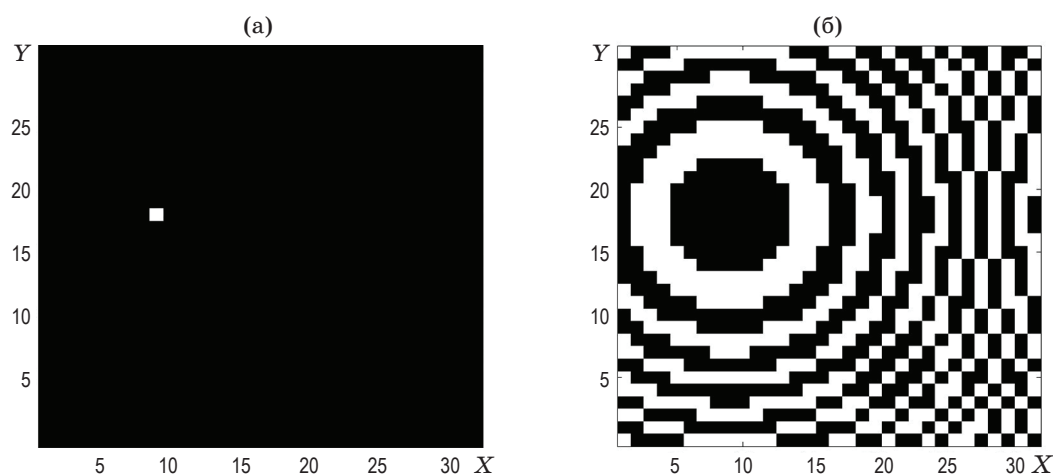


Рис. 1. Изображение и голограмма объекта. Изображение объекта (а), голограмма объекта (б)
Fig. 1. Image and hologram of the object. (a) Image of the object, (б) hologram of the object

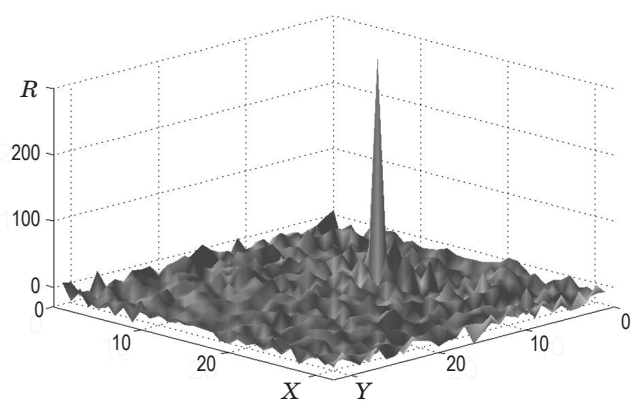


Рис. 2. Функция яркости $R(X, Y)$ восстановленного объекта
Fig. 2. Brightness function $R(X, Y)$ of the restored object

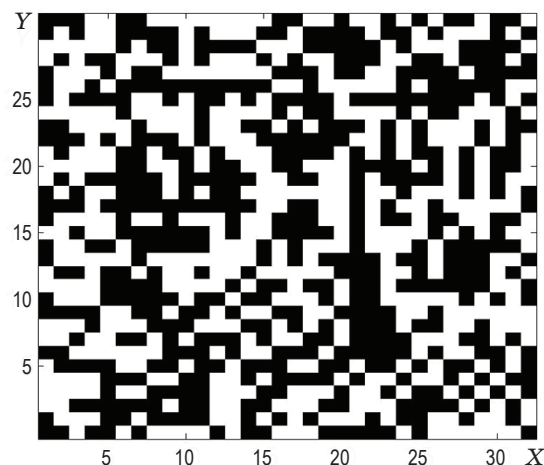


Рис. 3. Искажённая голограмма
Fig. 3. Distorted hologram

Результат восстановления изображения объекта по голограмме (функция яркости в плоскости формирования восстановленного изображения) при отсутствии искажений приведён на рис. 2.

Восстановленное изображение объекта, как видно на рис. 2, содержит фоновый шум, обусловленный конечностью числа элементов цифровой голограммы. Этот эффект проявляется и на самой голограмме (рис. 1б) — аналоговая голограмма состояла бы из концентрических колец. Но наличие шума не препятствует точному определению координат самой яркой точки в восстановленном изображении объекта и позволяет сделать это с большим запасом по помехоустойчивости.

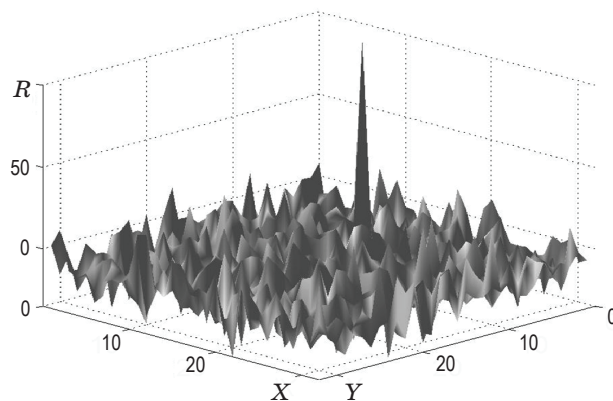


Рис. 4. Функция яркости $R(X, Y)$ объекта, восстановленного по искажённой голограмме
Fig. 4. Brightness function $R(X, Y)$ of the object reconstructed from a distorted hologram

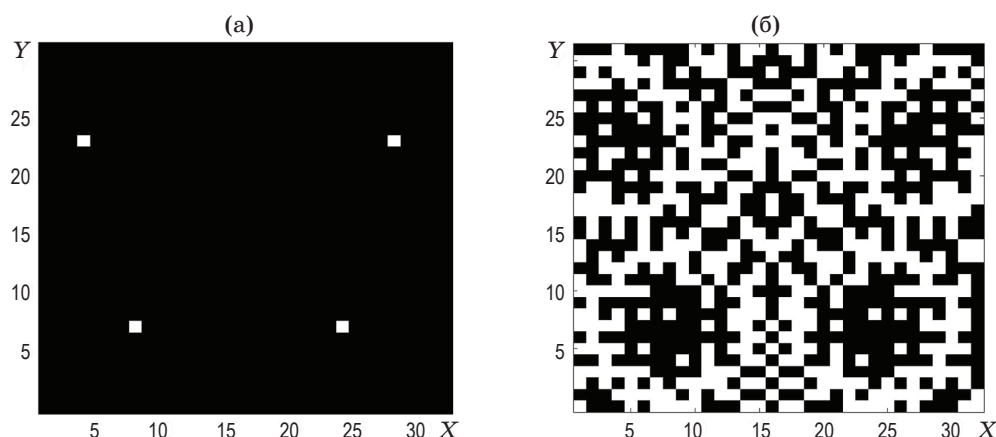


Рис. 5. Изображение объекта и его голограмма. Объект, состоящий из четырёх блоков данных (а), голограмма объекта, состоящего из четырёх блоков данных (б)

Fig. 5. The image of the object and its hologram. (a) An object consisting of four data blocks, (б) a hologram of an object consisting of four data blocks

При моделировании процесса передачи изображения по волокну передаваемая информация искажалась случайными ошибками. Голограмма объекта, содержащая 30% ошибок, приведена на рис. 3.

Результат восстановления изображения объекта по искажённой голограмме приведён на рис. 4.

Как показывает рис. 4, искажение 30% площади голограммы, несмотря на рост уровня шума, не препятствует однозначному определению координат наиболее яркой точки, а значит, не приводит к искажению передаваемой информации.

Проведено исследование зависимости вероятности безошибочного восстановления входного блока данных от степени искажения голограммы. Количество испытаний выбиралось достаточным для получения устойчивой оценки вероятности ошибки. Установлено, что при размере голограммы 32×32 вероятность правильного восстановления составляет 0,9997 при наличии 40% ошибок в голограмме.

Объём передаваемой информации определяется числом разрядов входного блока данных и в рассмотренном варианте составляет 10 бит. Количество информации, передаваемое одним изображением, может быть увеличено путём введения нескольких блоков данных при построении изображения объекта. На рис. 5а приведено изображение четырёх блоков данных, на рис. 5б — их голограмма, а на рис. 6 — результат восстановления.

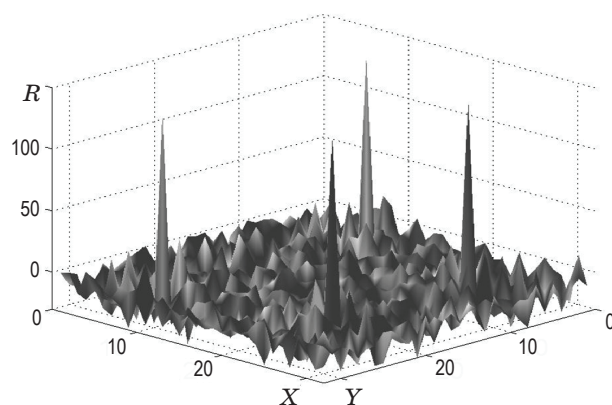


Рис. 6. Функция яркости $R(X, Y)$ четырёх блоков данных изображения объекта

Fig. 6. Brightness function $R(X, Y)$ of four blocks of the object image data

Как видно на рис. 6, передача четырёх блоков данных сопровождается увеличением уровня шума, но запас помехоустойчивости ещё оставляет возможность подавления модовой дисперсии и других искажений.

Таким образом, увеличение объёма информации, содержащейся в одном изображении, приводит к повышению скорости передачи информации. При передаче информации в виде голограммы размером 32×32 при использовании одного блока данных за один такт передаётся 10 бит, а при использовании четырёх блоков — 40 бит. Это означает увеличение скорости передачи информации по многомодовому волокну в 10 и 40 раз по сравнению с обычной

передачей по цифровому каналу. Выбор оптимального сочетания размера голограммы (количества используемых мод), числа передаваемых в одном изображении цифровых блоков и запаса помехоустойчивости, определяющего максимальную дальность передачи, зависит от области применения и поставленной задачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время публикуется много работ в области передачи изображений по многомодовому волокну. Однако разработанные методы не позволяют реализовать передачу сложных изображений с приемлемым качеством. В то же время ограниченные возможности этих методов могут быть успешно использова-

ны для передачи произвольной цифровой информации. В отличие от реальных изображений, требующих высокого пространственного разрешения, цифровую информацию можно передавать в виде небольших изображений размером от 8×8 до 32×32 . Проблема модовой дисперсии и искажений других видов, возникающих при передаче по волокну, решается путём использования вместо изображения объекта его голограммы, которая в силу присущего голографии свойства делимости обладает высокой устойчивостью к воздействию искажений. В результате существенно увеличивается дальность передачи при контролируемом уровне вероятности ошибки переданного сообщения и в 10–40 раз увеличивается скорость передачи информации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Lidia Galdino L., Edwards A., Yi W., Sillekens E., Wakayama Y., Gerard T., Pelouch W.S., Barnes S., Tsuritani T., Killey R.I., Lavery D., Bayvel P. Optical fibre capacity optimisation via continuous bandwidth amplification and geometric shaping // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2020. V. 32. № 17. P. 1021–1024. <https://doi.org/10.1109/LPT.2020.3007591>
2. Григорьева Е.Е., Семенов А.Т. Волноводная передача изображений в когерентном свете (обзор) // *Квантовая электроника*. 1978. Т. 5. № 9. С. 1877–1895.
3. Richardson D.J., Fini J.M., Nelson L.E. Space-division multiplexing in optical fibres // *Nature Photonics*. 2013. V. 7. № 5. P. 354–362. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.94>
4. Wright L.G., Christodoulides D.N., Wise F.W. Controllable spatiotemporal nonlinear effects in multimode fibres // *Nature Photonics*. 2015. V. 9. P. 306–310. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2015.61>
5. Cizmar T., Dholakia K. Exploiting multimode waveguides for pure fiber-based imaging // *Nature Communication*. 2012. V. 3. P. 1027. <https://doi.org/10.1038/ncomms2024>
6. Choi Y., Yoon C., Kim M., Yang T.D., Fang-Yen C., Dasari R.R., Lee K.J., Choi W. Scanner-free and wide-field endoscopic imaging by using a single multimode optical fiber // *Physical Review Letters*. 2012. V. 109. № 20. P. 37–51. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.203901>
7. Turtaev S., Leite I.T., Altwegg-Boussac T., Pakan J.M., Rochefort N.L., Cizmar T. High-fidelity multimode fibre-based endoscopy for deep brain in vivo imaging // *Light: Science and Applications*. 2018. V. 7. № 1. P. 7–92. <https://doi.org/10.1038/s41377-018-0094-x>
8. Resisi S., Popoff S. M., Bromberg Y. Image transmission through a dynamically perturbed multimode fiber by deep learning // *Laser & Photonics Reviews*. 2021. № 10. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.05144>
9. Lucesoli A., Rozzi T. Image transmission by multimode optical fiber for microendoscopy // *Proc. of SPIE-OSA Biomedical Optics*. 2007. SPIE V. 6631. 663117. P. 245–253. <https://doi.org/10.1117/12.728092>
10. Caramazza P., Moran O., Murray-Smith R., Faccio D. Transmission of natural scene images through a mul-

REFERENCES

1. Lidia Galdino L., Edwards A., Yi W., Sillekens E., Wakayama Y., Gerard T., Pelouch W.S., Barnes S., Tsuritani T., Killey R.I., Lavery D., Bayvel P. Optical fibre capacity optimisation via continuous bandwidth amplification and geometric shaping // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2020. V. 32. № 17. P. 1021–1024. <https://doi.org/10.1109/LPT.2020.3007591>
2. Grigoreva E.E., Semenov A.T. Waveguide image transmission in coherent light (review) // *Soviet Journal of Quantum Electronics*. 1978. V. 8. № 9. P. 1063–1081.
3. Richardson D.J., Fini J.M., Nelson L.E. Space-division multiplexing in optical fibres // *Nature Photonics*. 2013. V. 7. № 5. P. 354–362. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.94>
4. Wright L.G., Christodoulides D.N., Wise F.W. Controllable spatiotemporal nonlinear effects in multimode fibres // *Nature Photonics*. 2015. V. 9. P. 306–310. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2015.61>
5. Cizmar T., Dholakia K. Exploiting multimode waveguides for pure fiber-based imaging // *Nature Communication*. 2012. V. 3. P. 1027. <https://doi.org/10.1038/ncomms2024>
6. Choi Y., Yoon C., Kim M., Yang T.D., Fang-Yen C., Dasari R.R., Lee K.J., Choi W. Scanner-free and wide-field endoscopic imaging by using a single multimode optical fiber // *Physical Review Letters*. 2012. V. 109. № 20. P. 37–51. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.203901>
7. Turtaev S., Leite I.T., Altwegg-Boussac T., Pakan J.M., Rochefort N.L., Cizmar T. High-fidelity multimode fibre-based endoscopy for deep brain in vivo imaging // *Light: Science and Applications*. 2018. V. 7. № 1. P. 7–92. <https://doi.org/10.1038/s41377-018-0094-x>
8. Resisi S., Popoff S. M., Bromberg Y. Image transmission through a dynamically perturbed multimode fiber by deep learning // *Laser & Photonics Reviews*. 2021. № 10. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.05144>
9. Lucesoli A., Rozzi T. Image transmission by multimode optical fiber for microendoscopy // *Proc. of SPIE-OSA Biomedical Optics*. 2007. SPIE V. 6631. 663117. P. 245–253. doi: 10.1117/12.728092
10. Caramazza P., Moran O., Murray-Smith R., Faccio D. Transmission of natural scene images through a multi-

- timode fibre // *Nature Communications*. 2019. V. 10. № 2029. P. 373–379. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10057-8>
11. Fertman A., Yelin D. Image transmission through an optical fiber using real-time modal phase restoration // *Journal of the Optical Society of America B*. 2013. V. 30. № 1. P. 149–157. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.30.000149>
 12. Bailey D., Wright E. *Practical fiber optics*. Oxford: Elsevier. IDC Technologies, 2003. 245 p.
 13. Ho K., Kahn J. Mode coupling and its impact on spatially multiplexed systems. *Optical Fiber Telecommunications VIB: Systems and Networks: Sixth Edition*. Oxford: Elsevier, 2013. P. 491–568. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396960-6.00011-0>
 14. Barankov R., Mertz J. High-throughput imaging of self-luminous objects through a single optical fibre // *Nature Communications*. 2014. V. 5. № 5581. P. 73–88. <https://doi.org/10.1038/ncomms6581>
 15. Фещенко В.С., Рогожникова О.А. Оптическая изобразяющая система с волноводом // *Оптика и спектроскопия*. 2004. Т. 97. № 3. С. 498–501.
 16. Бахарев М.А., Котляр В.В., Павельев В.С., Соифер В.А., Хонина С.Н. Эффективное возбуждение пакетов мод идеального градиентного волновода с заданными фазовыми скоростями // *Компьютерная оптика*. 1997. № 17. С. 21–25.
 17. Liu C., Deng L., Liu D., Su L. Modeling of a single multimode fiber imaging system // *arXiv:1607.07905 [physics.optics]*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1607.07905>
 18. Kakkava E., Rahmanib B., Borhanian N., Tegina U., Loterieb D., Konstantinou G., Moser C., Psaltis D. Imaging through multimode fibers using deep learning: The effects of intensity versus holographic recording of the speckle pattern // *Optical Fiber Technology*. 2019. V. 52101985. P. 117–129. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2019.101985>
 19. Borhani N., Kakkava E., Moser C., Psaltis D. Learning to see through multimode fibers // *Optica*. 2019 V. 5. № 8. P. 960–966. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.5.000960>
 20. Fan P., Zhao T., Su L. Deep learning the high variability and randomness inside multimode fibres // *arXiv:1807.09351 [physics.optics]*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1807.09351>
 21. Rahmani B., Loterie D., Konstantinou G., Psaltis D., Moser C. Multimode optical fiber transmission with a deep learning network // *Nature. Light Appl.* 2018. V. 7. № 69. P. 171–182. <https://doi.org/10.1038/s41377-018-0074-1>
 22. Takagi R., Horisaki R., Tanida J. Object recognition through a multi-mode fiber // *Opt Rev.* 2017. № 24. P. 117–120. <https://doi.org/10.1007/s10043-017-0303-5>
 23. Pauwels, J., Van der Sande G., Verschaffelt G. Space division multiplexing in standard multi-mode optical fibers based on speckle pattern classification // *Sci Rep.* 2019. V. 9. P. 17597. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53530-6>
 24. Lei Y., Li J., Fan Y., Yu D., Fu S., Yin F., Dai Y., Xu K. Space-division-multiplexed transmission of 3×3 multiple-input multiple-output wireless signals over conventional graded-index multimode fiber // *Opt. Express*. 2016. № 24. P. 28372–28382. <https://doi.org/10.1364/OE.24.028372>
 25. Mohapatra H., Hosain S. Intermodal dispersion free few-mode (quadruple mode) fiber: A theoretical modeling // *Opt. Commun.* 2013. № 30. P. 267–270. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2013.05.018>
 26. Kubota H., Morioka T. Few-mode optical fiber for mode-division multiplexing // *Opt. Fiber Technol.* 2011. V. 17. P. 490–494. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2011.06.011>
 - mode fibre // *Nature Communications*. 2019. V. 10. № 2029. P. 373 – 379. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10057-8>
 11. Fertman A., Yelin D. Image transmission through an optical fiber using real-time modal phase restoration // *Journal of the Optical Society of America B*. 2013. V. 30. № 1. P. 149–157. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.30.000149>
 12. Bailey D., Wright E. *Practical fiber optics*. Oxford: Elsevier. IDC Technologies, 2003. 245 p.
 13. Ho K., Kahn J. Mode coupling and its impact on spatially multiplexed systems. *Optical Fiber Telecommunications VIB: Systems and Networks: Sixth Edition*. Oxford: Elsevier, 2013. P. 491–568. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396960-6.00011-0>
 14. Barankov R., Mertz J. High-throughput imaging of self-luminous objects through a single optical fibre // *Nature Communications*. 2014. V. 5. № 5581. P. 73–88. <https://doi.org/10.1038/ncomms6581>
 15. Feschenko V.S., Rogojnikova O.A. Optical imaging system with waveguide // *Optics and Spectroscopy*. 2004. V. 97. № 3. P. 498–501.
 16. Baharev M.A., Kotlyar V.V., Pavelyev V.S., Soifer V.A., Honina S.N. Efficient excitation of mode packets in an ideal gradient waveguide with given phase velocities // *Computer optics*. 1997. № 17. P. 21–25.
 17. Liu C., Deng L., Liu D., Su L. Modeling of a single multimode fiber imaging system // *arXiv:1607.07905 [physics.optics]*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1607.07905>
 18. Kakkava E., Rahmanib B., Borhanian N., Tegina U., Loterieb D., Konstantinou G., Moser C., Psaltis D. Imaging through multimode fibers using deep learning: The effects of intensity versus holographic recording of the speckle pattern // *Optical Fiber Technology*. 2019. V. 52101985. P. 117–129. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2019.101985>
 19. Borhani N., Kakkava E., Moser C., Psaltis D. Learning to see through multimode fibers // *Optica*. 2019 V. 5. № 8. P. 960–966. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.5.000960>
 20. Fan P., Zhao T., Su L. Deep learning the high variability and randomness inside multimode fibres // *arXiv:1807.09351 [physics.optics]*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1807.09351>
 21. Rahmani B., Loterie D., Konstantinou G., Psaltis D., Moser C. Multimode optical fiber transmission with a deep learning network // *Nature. Light Appl.* 2018. V. 7. № 69. P. 171–182. <https://doi.org/10.1038/s41377-018-0074-1>
 22. Takagi R., Horisaki R., Tanida J. Object recognition through a multi-mode fiber // *Opt Rev.* 2017. № 24. P. 117–120. <https://doi.org/10.1007/s10043-017-0303-5>
 23. Pauwels, J., Van der Sande G., Verschaffelt G. Space division multiplexing in standard multi-mode optical fibers based on speckle pattern classification // *Sci Rep.* 2019. V. 9. P. 17597. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53530-6>
 24. Lei Y., Li J., Fan Y., Yu D., Fu S., Yin F., Dai Y., Xu K. Space-division-multiplexed transmission of 3×3 multiple-input multiple-output wireless signals over conventional graded-index multimode fiber // *Opt. Express*. 2016. № 24. P. 28372–28382. <https://doi.org/10.1364/OE.24.028372>
 25. Mohapatra H., Hosain S. Intermodal dispersion free few-mode (quadruple mode) fiber: A theoretical modeling // *Opt. Commun.* 2013. № 30. P. 267–270. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2013.05.018>
 26. Kubota H., Morioka T. Few-mode optical fiber for mode-division multiplexing // *Opt. Fiber Technol.* 2011. V. 17. P. 490–494. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2011.06.011>

27. Timofeev A.L., Sultanov A.Kh. Holographic method of error-correcting coding // Proc. SPIE 11146. Optical Technologies for Telecommunications. 2019. V. 111461A. P. 171–182. <https://doi.org/10.1117/12.2526922>
28. Timofeev A.L., Sultanov A.Kh., Filatov P.E. Holographic method for storage of digital information // Proc. SPIE 11516. Optical Technologies for Telecommunications. 2020. V. 1151604. <https://doi.org/10.1117/12.2566329>
29. Тимофеев А.Л., Султанов А.Х. Построение помехоустойчивого кода на базе голографического представления произвольной цифровой информации // Компьютерная оптика. 2020. Т. 44. № 6. С. 978–984. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-739>
30. Тимофеев А.Л., Султанов А.Х., Мешков И.К., Гизатулин А.Р. Увеличение дальности атмосферных оптических линий связи с помощью позиционного кодирования // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 9. С. 75–85. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-09-75-85>
31. Leonardo R.D., Bianchi S. Hologram transmission through multi-mode optical fibers // Opt. Express. 2011. № 19. P. 247–254. <https://doi.org/10.1364/OE.19.000247>
32. Paurisse M., Hanna M., Droun F., Georges P., Belanger C., Brignon A., Huignard J.P. Phase and amplitude control of a multimode fiber beam by use of digital holography // Opt. Express. 2009. № 17. P. 13000–13008. <https://doi.org/10.1364/OE.17.013000>
33. Leonardo R.D., Ianni F., Ruocco G. Computer generation of optimal holograms for optical trap arrays // Opt. Express. 2007. № 15. P. 1913–1922. <https://doi.org/10.1364/OE.15.001913>
34. Grier D.G. A revolution in optical manipulation // Nature. 2003. № 424. P. 810–816. <https://doi.org/10.1038/nature01935>
35. Spalding G.C., Courtial J., Leonardo R.D. Holographic optical tweezers // Structured Light Its Applications. Academic Press. 2008. P. 139–168. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374027-4.00006-2>
36. Reichert M., Haist T., Wagemann E.U., Tiziani H.J. Optical particle trapping with computer-generated holograms written on a liquid-crystal display // Opt. Lett. 1999. № 24. P. 608–610. <https://doi.org/10.1364/OL.24.000608>
27. Timofeev A.L., Sultanov A.Kh. Holographic method of error-correcting coding // Proc. SPIE 11146. Optical Technologies for Telecommunications. 2019. V. 111461A. P. 171–182. <https://doi.org/10.1117/12.2526922>
28. Timofeev A.L., Sultanov A.Kh., Filatov P.E. Holographic method for storage of digital information // Proc. SPIE 11516. Optical Technologies for Telecommunications. 2020. V. 1151604. <https://doi.org/10.1117/12.2566329>
29. Timofeev A.L., Sultanov A.Kh. Building a noiseto-lerant code based on a holographic representation of arbitrary digital information // Computer Optics. 2020. V. 44. № 6. P. 978–984. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-739>
30. Timofeev A.L., Sultanov A.Kh., Meshkov I.K., Gizatulin A.R. Increasing the range of atmospheric optical communication lines using positional coding // Journal of Optical Technology. 2022. V. 89. № 9. P. 555–561. <https://doi.org/10.1364/JOT.89.000555>
31. Leonardo R.D., Bianchi S. Hologram transmission through multi-mode optical fibers // Opt. Express. 2011. № 19. P. 247–254. <https://doi.org/10.1364/OE.19.000247>
32. Paurisse M., Hanna M., Droun F., Georges P., Belanger C., Brignon A., Huignard J.P. Phase and amplitude control of a multimode fiber beam by use of digital holography // Opt. Express. 2009. № 17. P. 13000–13008. <https://doi.org/10.1364/OE.17.013000>
33. Leonardo R.D., Ianni F., Ruocco G. Computer generation of optimal holograms for optical trap arrays // Opt. Express. 2007. № 15. P. 1913–1922. <https://doi.org/10.1364/OE.15.001913>
34. Grier D.G. A revolution in optical manipulation // Nature. 2003. № 424. P. 810–816. <https://doi.org/10.1038/nature01935>
35. Spalding G.C., Courtial J., Leonardo R.D. Holographic optical tweezers // Structured Light Its Applications. Academic Press. 2008. P. 139–168. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374027-4.00006-2>
36. Reichert M., Haist T., Wagemann E.U., Tiziani H.J. Optical particle trapping with computer-generated holograms written on a liquid-crystal display // Opt. Lett. 1999. № 24. P. 608–610. <https://doi.org/10.1364/OL.24.000608>

АВТОРЫ

Александр Леонидович Тимофеев — канд. техн. наук, доцент Уфимского университета науки и технологий, 450008, Уфа, Россия; Scopus ID: 57209741074, <https://orcid.org/0000-0003-2137-803X>, a_l_t@inbox.ru

Альберт Ханович Султанов — доктор техн. наук, профессор Уфимского университета науки и технологий, 450008, Уфа, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-2830-3498>, sultanov.ah@mail.ru

Иван Константинович Мешков — канд. техн. наук, доцент Уфимского университета науки и технологий, 450008, Уфа, Россия; Scopus ID: 24725298700, <https://orcid.org/0000-0003-3479-3072>, mik.ivan@bk.ru

Азат Ринатович Гизатулин — канд. техн. наук, доцент Уфимского университета науки и технологий, 450008, Уфа, Россия; Scopus ID: 56193982000, <https://orcid.org/0000-0002-0753-0608>, azat_poincare@mail.ru

AUTHORS

Alexandr L. Timofeev — PhD, Associate Professor, Ufa University of Science and Technology, 450008, Ufa, Russia; Scopus ID: 57209741074, <https://orcid.org/0000-0003-2137-803X>, a_l_t@inbox.ru

Albert H. Sultanov — Dr. Sc., Professor, Ufa University of Science and Technology, 450008, Ufa, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-2830-3498>, sultanov.ah@mail.ru

Ivan K. Meshkov — PhD, Associate Professor, Ufa University of Science and Technology, 450008, Ufa, Russia; Scopus ID: 24725298700, <https://orcid.org/0000-0003-3479-3072>, mik.ivan@bk.ru

Azat R. Gizatulin — PhD, Associate Professor, Ufa University of Science and Technology, 450008, Ufa, Russia; Scopus ID: 56193982000, <https://orcid.org/0000-0002-0753-0608>, azat_poincare@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13.03.2023
Одобрена после рецензирования 31.05.2023
Принята к печати 18.08.2023

The article was submitted to the editorial office 13.03.2023
Approved after review 31.05.2023
Accepted for publication 18.08.2023