

Использование многомодового волокна для повышения скорости передачи информации

А.Л. Тимофеев¹, А.Х. Султанов¹, И.К. Мешков¹, А.Р. Гизатулин¹, В.Х. Багманов¹

¹ Уфимский университет науки и технологий, 450076, Россия, г. Уфа, ул. 3. Валиди, д. 32

Аннотация

Рассмотрены возможности использования пространственного разделения каналов в многомодовом волокне. При передаче информации в многомодовом режиме возникает большое число ошибок, обусловленных модовой дисперсией, межмодовой интерференцией и другими источниками. Показано, что передача по волокну вместо изображения, соответствующего исходному цифровому массиву, его голограммы, позволяет использовать специфическое свойство голографии – делимости голограммы и обеспечить восстановление исходного изображения по сильно искаженной голограмме или ее фрагменту. Виртуальным оптическим объектом, для которого строится голограмма, является точечный источник на черном фоне, а информация закладывается в координаты источника излучения. Результатом кодирования является простейшая голограмма – зонная пластинка Френеля, координаты центра которой несут кодируемую информацию. В приемнике 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. Приведено описание моделирования, результаты которого показывают, что при переходе от одномодового режима использования оптоволокна как цифрового канала связи к режиму многомодовой передачи изображений с числом мод $N=4096$ возможно повышение скорости передачи в 128 раз при модовой дисперсии, искажающей до 20 % принимаемого изображения.

Ключевые слова: многомодовая передача, модовая дисперсия, голографическое кодирование

Цитирование: Тимофеев, А.Л. Использование многомодового волокна для повышения скорости передачи информации / А.Л. Тимофеев, А.Х. Султанов, И.К. Мешков, А.Р. Гизатулин, В.Х. Багманов // Компьютерная оптика. – 2024. – Т. 48, № 5. – С. 681-688. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1445.

Citation: Timofeev AL, Sultanov AK, Meshkov IK, Gizatulin AR, Bagmanov VK. Using a multimode fiber to improve data transfer rates. Computer Optics 2024; 48(5): 681-688. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1445.

Введение

Одним из способов дальнейшего повышения пропускной способности волоконно-оптических систем передачи является увеличение количества каналов с помощью мультиплексирования с пространственным разделением каналов (Space Division Multiplexing, SDM) [1–6]. Этот метод использует поперечную пространственную протяженность многомодового волокна для создания параллельных каналов передачи данных. В [7] отмечено, что параллелизм в пространстве – единственный способ значительно масштабировать производительность системы в долгосрочной перспективе, и сделан прогноз о создании к 2037 г. петабитных систем, использующих тысячи параллельных пространственных путей.

В [8] рассмотрена и подтверждена экспериментально передача сигналов с пространственным мультиплексированием в оптоволокне длиной до 1 км. В [9] описан эксперимент по передаче данных в трехмодовом режиме по маломодовым волокнам с внешним диаметром волокна 125 мкм длиной 55 км. Но

для многомодовых волокон в настоящее время исследования в области параллельной передачи в основном сосредоточены на задаче передачи изображений. Многомодовые волокна открывают большие перспективы для таких приложений, как, например, эндоскопическая визуализация [10–16].

Возможность передачи изображения в многомодовом режиме начала рассматриваться вскоре после появления волоконной оптики. Для ее реализации необходимо обеспечить возможность контролируемым образом распределять информацию между отдельными модами на входе волокна, а затем упорядоченно извлекать ее на выходе. Типичное волокно с диаметром сердцевины 100 мкм может нести до 10000 мод и в принципе передавать изображение примерно с таким же количеством пикселей. В работе [17] описаны эксперименты по передаче изображений по волокну с числом мод около 9000 на расстоянии 10 м. Оптическая схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Изображение, формируемое пространственным модулятором света SLM, через делитель PBS и объектив вводится в волокно. Выход-

ной сигнал волокна формируется объективом и подается на CMOS-камеру.

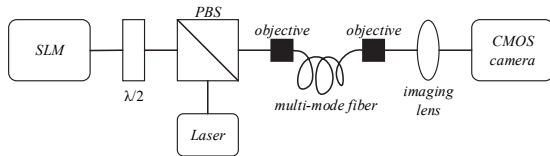


Рис. 1. Оптическая схема установки

По результатам экспериментов авторы делают вывод о возможности эффективного использования передачи видеоизображений и данных по многомодовому оптоволокну не только для эндоскопической визуализации, но и для передачи данных по длинным волокнам для систем связи.

Рассмотрим изображение во входном сечении (при $Z=0$) оптического волокна, описываемого некоторой функцией в цилиндрической системе координат (ρ, φ, z) . Передача изображения по оптическому волокну основывается на возможности представления (аппроксимации) изображения в виде разложения по ортогональной системе функций $\psi_{uv}(\rho, \varphi)$, соответствующих радиальному распределению мод (с радиальным индексом u и азимутальным индексом v), распространяющихся по волокну:

$$\psi(\rho, \varphi) = \sum_{u,v \in \Omega} C_{uv} \psi_v(\rho, \varphi), \quad (1)$$

где Ω – некоторое множество модовых индексов, достаточных для аппроксимации функции $\psi(\rho, \varphi)$ с определенной точностью. В выходном сечении, соответствующем координате Z , будет наблюдаться поле изображений $\psi(\rho, \varphi, Z)$, которое можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \psi(\rho, \varphi, Z) &= \\ &= \exp(i\beta_{00}Z) \sum_{u,v} C_{uv} \psi_v(\rho, \varphi) \exp(i(\beta_{uv} - \beta_{00})Z), \end{aligned} \quad (2)$$

где β_{uv} – постоянная распространения моды (u, v) . Если существует сечение, называемое синфазным $Z=l$, для которого выполняется соотношение:

$$\exp(i(\beta_{uv} - \beta_{00})l) = 1, \quad (3)$$

то, как следует из (1) и (2), будет выполняться равенство $\psi(\rho, \varphi, l) = \psi(\rho, \varphi)$.

Таким образом, изображение самовоспроизводится в сечении $Z=l$, равно как и во множестве сечений, кратных $l: Z=ls (s=1, 2, 3, \dots)$, т.к. условие синфазности (3) соответствует аргументу экспоненты, кратному 2π .

Передача изображения в волноводной среде путем разложения по модам рассмотрена в работе [18]. В ней проведен расчет дифракционного оптического элемента, осуществляющего эффективное формирование пучка, сечение которого описывается собственной функцией оператора распространения света в среде с параболическим профилем, и сделан вывод,

что такой подход может быть востребован при решении задач оптических телекоммуникаций.

Рассмотрим процесс передачи изображений по градиентному волокну с параболическим профилем показателя преломления. В этом случае

$$n^2(\rho) = n_0^2(1 - \tau^2\rho^2),$$

где $\tau^2 = 2\Delta/r_0^2$; $\Delta = (n_0^2 - n_1^2)/2n_0^2 \approx (n_0 - n_1)/n_0$, параметры $n_0 = n(0)$ и $n_1 = n(r_0)$ интерпретируются как показатели преломления сердцевинки и оболочки, r_0 – радиус сердцевинки.

Для градиентного волокна собственными модами являются моды Гаусса–Лагерра, имеющие радиальное распределение

$$\psi_{uv}(\rho, \varphi) = \left(\frac{\rho\sqrt{2}}{\sigma} \right)^{|l|} L_u^{|l|} \left(\frac{2\rho^2}{\sigma^2} \right) \exp\left(-\frac{\rho^2}{\sigma^2}\right) \exp(i\nu\varphi),$$

где $L_u^{|l|}$ – обобщенный полином Лагерра, $\sigma = \sqrt{2/kn_0\tau}$ – эффективный радиус первой моды.

Постоянная распространения мод определяется выражением:

$$\beta_{uv} = kn_0 \sqrt{1 - \frac{2\tau}{kn_0}(2u + v + 1)}, \quad (4)$$

где k – волновое число в вакууме.

Разложив постоянную распространения (4) в ряд Тейлора, получим:

$$\beta_{uv} - \beta_{00} = -\tau(M - 1) - \frac{\tau^2(M^2 - 1)}{2kn_0} - \frac{\tau^3(M^3 - 1)}{2(kn_0)^2}, \quad (5)$$

где введено обозначение $M = 2u + v + 1$.

В первом приближении

$$\beta_{uv} - \beta_{00} = -\tau(M - 1). \quad (6)$$

Из условия (3) получим расстояние для первого синфазного сечения:

$$l_1 = 2\pi/\tau.$$

При заданном значении радиального индекса u азимутальный индекс может принимать значения в интервале $[-u, u]$, откуда следует, что общее число мод U при заданном индексе u равно

$$U = 2(u + 1)^2 \approx 2u^2,$$

а также, что максимальное значение модуля индекса v равно $|v|_{max} = v_v = u_u$, где u_u – максимальное значение индекса u . Таким образом, получим

$$2u + v + 1 \leq 2u + v = 3u_u \approx 3\sqrt{U/2}. \quad (7)$$

Относительная погрешность аппроксимации постоянной β_{uv} рядом Тейлора (5) определяется величиной $2\tau M/kn_0$, которая должна быть меньше некоторого числа ε . С учетом соотношений (7), получим

$$\frac{2\tau}{kn_0} 3\sqrt{\frac{U}{2}} \leq \varepsilon.$$

Отсюда получим оценку для общего числа мод, участвующих в формировании изображения:

$$U \leq \frac{\pi^2 \varepsilon^2}{9\Delta} \left(\frac{r_0}{\lambda}\right)^2 \approx \varepsilon \left(\frac{r_0}{\lambda}\right)^2 \frac{1}{\Delta}, \quad (8)$$

где $\lambda = 2\pi/kn_0$.

Величину ε можно оценить из условия малости набега фазы на расстоянии Z при аппроксимации (6). Приняв в качестве критерия малости набега фазы величину $\pi/2$, получим

$$\frac{\varepsilon^2}{8} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} Z < \frac{\pi}{2},$$

откуда следует оценка:

$$\varepsilon^2 \leq 2\lambda / Z. \quad (9)$$

Объединяя (8) и (9), найдем ограничение на общее число мод при использовании аппроксимации (6)

$$U \leq \frac{2\lambda}{Z} \left(\frac{r_0}{\lambda}\right)^2 \frac{1}{\Delta}.$$

Во втором приближении

$$\beta_{uv} - \beta_{00} = -\tau(M-1) - \frac{\tau^2(M^2-1)}{2kn_0}. \quad (10)$$

Расстояние до первого синфазного сечения будет равно:

$$l_2 = 2/\tau \left[1 + \frac{\tau(M+1)}{2kn_0} \right].$$

В этом случае расстояние до первого синфазного сечения оказывается зависимым от модовых индексов и будет постоянным, если потребовать выполнения соотношения

$$2u + v + 2 = p = \text{const}, \quad (11)$$

где $p = 2, 3, \dots$.

Таким образом, общее число мод U , участвующих в формировании изображения, оказывается ограниченным условием (11).

Из условия малости набега фазы при использовании аппроксимации (10) следует ограничение на число передаваемых мод:

$$U \leq 2,76 \left(\frac{\lambda}{Z}\right)^{2/3} \left(\frac{r_0}{\lambda}\right)^2 \frac{1}{\Delta}.$$

Основной проблемой для передачи изображения через многомодовое волокно является его модовая дисперсия, поскольку фазовые искажения приводят к существенному нарушению передаваемого изобра-

жения [19]. Полное априорное знание входного изображения и деталей волокна может позволить численно промоделировать оптическое распространение, реконструировать матрицу передачи, а затем расшифровать выходные данные, но на практике это не реализуемо из-за необходимости привлечения очень больших вычислительных ресурсов.

Коррекция модовой дисперсии возможна путем разделения и выравнивания вклада каждой моды. Такой подход может применяться при работе с волокнами любой длины, как со ступенчатым, так и с градиентным показателем преломления. Другой подход, описанный в [20], основан на формировании передаваемого сигнала путем кодирования спектра.

Во всех предлагаемых методах требуется предварительная калибровка оптической системы. Но если в оптической системе происходят какие-либо изменения после калибровки, то происходит ухудшение качества передачи. В частности, изгиб волокна является основным ограничивающим фактором для таких систем [21]. В работах [22–26] рассмотрено использование нейронной сети глубокого обучения для аппроксимации функции передачи многомодового волокна с использованием большого количества входных данных. В этом случае дрейф характеристик системы (например, вследствие изгиба волокна) может быть включен в тренировочный набор. В работе [23] продемонстрирована визуализация изображений с помощью нейронной сети при использовании 4500 мод в условиях температурных и механических колебаний волокна.

Таким образом, в достаточно большом количестве работ описаны обладающие разной эффективностью способы передачи изображений по многомодовому волокну. Общей особенностью этих способов является то, что они ориентированы на передачу изображения, предназначенного для визуального восприятия, когда допустимы достаточно большие искажения и оценка качества субъективна. Подобное использование многомодового волокна для передачи цифровой информации представляется проблематичным, хотя существует возможность другого подхода к этой задаче.

Целью данной работы является исследование возможности использования многомодового волокна для передачи произвольной цифровой информации путем ее представления в виде, устойчивом к модовой дисперсии и другим искажениям.

1. Постановка задачи

Рассмотрим задачу передачи по многомодовому волокну цифровой информации произвольного вида. Очевидным решением является преобразование цифрового массива, подлежащего передаче, в изображение. Однако на этом пути возникают сложности, обусловленные необходимостью безошибочной передачи с побитным совпадением 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, растривание изображения из-за дискретности фурье-спектра и другие источники. Поэтому необходима специальная форма представления цифрового массива в виде изображения.

С этой точки зрения 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 искаженной голограмме или ее фрагменту.

Возможности использования голограмм в процессе передачи изображения по многомодовому волокну рассмотрены, например, в [27–29]: описаны экспериментальные результаты по голографической передаче изображения по волокну диаметром 200 мкм, длиной 18,5 см в режиме использования 17000 мод (данные приведены в дополнительном материале к статье). В этой и других работах по этой тематике голограмма несет информацию об исходном изображении, заложенную 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. Благодаря свойству делимости, голограмма обеспечивает более высокую устойчивость к модовым искажениям, чем исходное изображение, но этого недостаточно для передачи цифровой информации. В то же время возможен другой подход для представления исходного блока цифровой информации в виде голограммы.

2. Метод позиционного голографического кодирования

Влияние присущих многомодовой передаче искажений существенно снижается, если носителем информации сделать не яркость пикселей, а их взаимное расположение. В этом случае оптическим объектом, для которого строится голограмма, является точечный источник на черном фоне, а информация закладывается в координаты точки на поле объекта [30]. Степень яркости объекта не имеет значения, поэтому для ее задания достаточно одного бита (0 или 1). Результатом кодирования является простейшая голограмма – зонная пластинка Френеля, координаты центра которой несут кодируемую информацию и изображение которой передается по волокну. В приемнике целью декодирования является не восстановление яркости каждой точки переданной голограммы, а вычисление координат центра зон Френеля. Такой подход обеспечивает гораздо более высокую устойчивость передаваемой информации ко всем видам искажений.

Рассмотрим параллельную передачу цифровой информации, где каждому передаваемому n -разрядному блоку данных соответствует изображение зонной пластинки размером $N=2^n$ пикселей, координаты центра которой заданы входным блоком. Для формирования передаваемого изображения n -разрядный двоичный блок разделяется на две координаты, которые задают положение единственной яркой точки на черном исходном изображении размером N пикселей. Для этого изображения строится цифровая голограмма, представляющая собой зонную пластинку. Каждому из N возможных значений входного блока соответствует свое изображение зонной пластинки, отличающееся координатами центра зон Френеля. В этом состоит позиционный принцип данного метода кодирования. Так как количество возможных значений входного блока ограничено, можно не вычислять цифровую голограмму для каждого блока данных, а хранить в памяти цифровые изображения зонных пластинок со всеми возможными положениями центра зон Френеля. Очевидно, что число пикселей голограммы (зонной пластинки) не должно превышать число мод в волокне. При этом объем передаваемой информации определяется числом бит в координатах центра зон Френеля. Например, голограмма размером 64×64 пикселя несет 12 бит информации, голограмма размером 8×8 несет 6 бит.

Изображение голограммы передается по волокну одним из рассмотренных способов многомодовой передачи и подвергается всем присущим выбранному способу видам искажений. Решающим параметром метода многомодовой передачи является число передаваемых мод. В соответствии с этим числом выбирается количество пикселей голограммы, а следовательно, и число бит блока данных, передаваемых каждой голограммой. Метод позиционного голографического кодирования не предъявляет требований к длине волокна и числу передаваемых мод. Он может быть использован для передачи цифровой информации в любом волокне, имеющем 16 и более мод.

Для восстановления значения исходного блока на приемной стороне голограмму, полученную на выходе волокна, необходимо подвергнуть обратному преобразованию. Это можно сделать оптическим способом, создавая восстановленное изображение в плоскости фотоприемной матрицы и определяя координаты наиболее яркой точки. Операцию восстановления исходного массива также можно провести цифровым способом, обрабатывая фиксируемое фотоприемной матрицей изображение принятой голограммы. Небольшой размер передаваемой голограммы (не более нескольких кбит) позволяет сделать это несложными аппаратными ресурсами.

Представление исходной цифровой информации в виде координаты центра одномерной пластинки («линейки») Френеля для повышения помехоустойчивости канала связи было использовано в [31–33], а

для атмосферных оптических линий связи – в [34]. В [35] проведен анализ помехоустойчивости двумерной голограммы при передаче информации в многомодовом волокне.

3. Результаты моделирования

Оценка устойчивости многомодовой передачи к модовой дисперсии и другим видам искажений проведена путем моделирования в среде MATLAB процесса искажения и восстановления передаваемой информации при наличии случайных ошибок.

Алгоритм моделирования:

1. Кодирование:

- исходный n -разрядный блок данных делится на два значения: $x(i)$, $i = 1 \dots 2^{(n/2)}$ и $y(j)$, $j = 1 \dots 2^{(n/2)}$;
- формируется белая точка исходного изображения $O(x, y) = 1$;
- вычисляются значения волнового фронта в точках голограммы $H(i, j)$, которые определяются фазой приходящей волны ϕ . Значение волны от элемента $O(x, y)$ в точке голограммы $H(i, j)$ равно

$$H(i, j) = O(x, y) \sin \phi(i, j),$$

где $\phi(i, j)$ – фаза волны.

Расстояние $l(i, j)$ между точками $O(x, y)$ и $H(i, j)$ равно

$$l(i, j) = \sqrt{L^2 + d^2(i - j)^2},$$

тогда $\phi(i, j)$ – это дробная часть отношения $l(i, j)$ к длине волны:

$$\phi(i, j) = \{l(i, j) / \lambda\};$$

- значение голограммы $H(i, j)$ округляется до одного бита.
- #### 2. Моделирование искажений:
- искажение голограммы, вызванное модовой дисперсией, моделируется путем инвертирования заданного количества однобитных значений голограммы $H(i, j)$ со случайными координатами, выбранными с помощью встроенной в MATLAB функции `randperm`.
- #### 3. Декодирование:

- вычисляется восстановленное изображение $O_r(x, y)$ по формуле

$$O_r(i, j) = \sum_{i=1}^{\sqrt{N}} \sum_{j=1}^{\sqrt{N}} H(i, j) \sin \phi(i, j);$$

- находится максимум функции $O_r(i, j)$, его координаты (i, j) являются выходным значением.

На рис. 2а приведено изображение в позиционном коде 12-разрядного входного блока при $x = 14$, $y = 19$, а на рис. 2б – соответствующая голограмма.

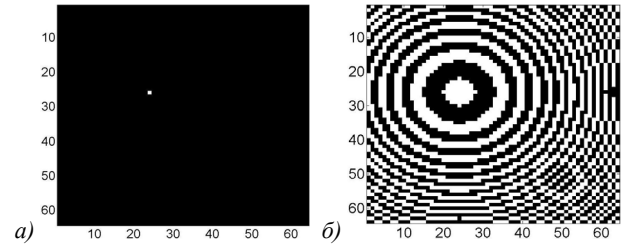


Рис. 2. (а) Изображение входного блока, (б) голограмма

На рис. 2 показана функция яркости изображения, восстановленного по голограмме. В нем присутствует небольшой уровень шума кодирования, обусловленного дискретностью голограммы, но он не препятствует определению координат наиболее яркой точки.

Для визуальной оценки устойчивости передаваемого изображения к модовой дисперсии более удобным является не двумерное, а линейное представление, полученное путем построчной развертки восстановленного изображения. На рис. 4 приведена линейная развертка функции яркости, изображенной на рис. 3.

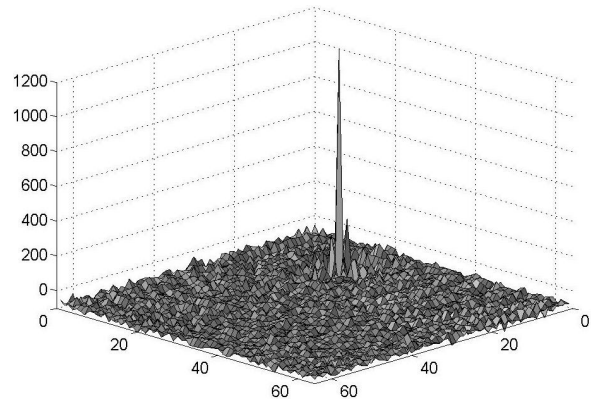


Рис. 3. Результат восстановления голограммы

Рис. 3 и 4 показывают, что восстановленное по голограмме изображение входного блока данных обладает большим запасом помехоустойчивости. На рис. 5а приведена голограмма, отличающаяся от рис. 2б наличием 40% ошибок, а на рис. 5б – результат ее восстановления. Как видно на рис. 5б, внесение 40% ошибок не препятствует однозначному определению номера позиции – координат точки с максимальной яркостью и, соответственно, восстановлению передаваемой информации.

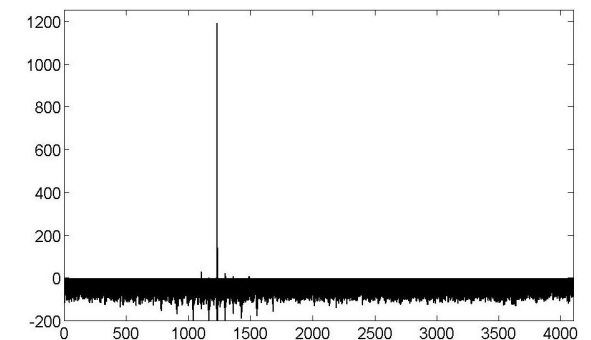


Рис. 4. Линейная развертка результата восстановления голограммы

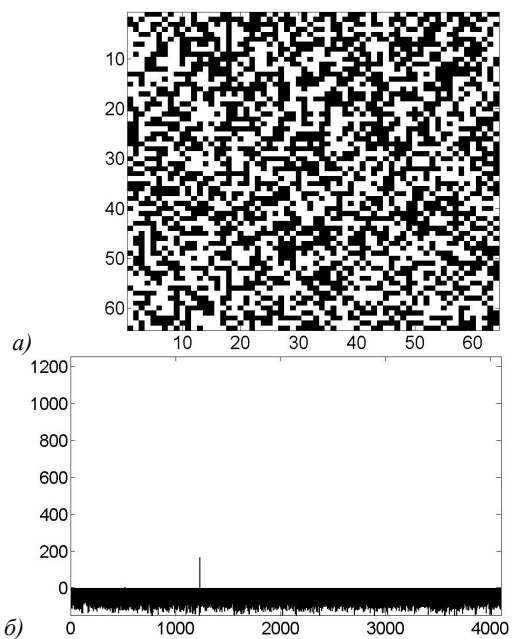


Рис. 5. (а) Голограмма, содержащая 40 % ошибок, (б) результат восстановления

Такой запас устойчивости к модовой дисперсии позволяет увеличить объем передаваемой в одном кадре информации путем усложнения исходного изображения, создавая в нем, например, 16 точечных источников. При этом возможны два способа формирования передаваемой голограммы:

- построение композитной картины, состоящей из 16 независимых голограмм размером $16 \times 16 = 256$ пикселей, каждая из которых является зонной пластинкой Френеля, координаты центра которой несут 8 бит информации;
- разбиение поля исходного изображения на 16 секторов размером $16 \times 16 = 256$ пикселей, каждый из которых содержит один точечный источник, и построение единой голограммы объекта, состоящего из 16 точечных источников.

Количество информации, передаваемой в обоих случаях, одно и то же – $8 \times 16 = 128$ бит, но есть разница в устойчивости к искажениям. В первом случае, если ошибки по передаваемому изображению распределяются неравномерно и в одном из 16 фрагментов их окажется более 30%, этот фрагмент, а значит, и содержащиеся в нем 8 бит информации будут потеряны безвозвратно. Во втором случае такое распределение ошибок не приведет к потере информации благодаря свойству делимости голограммы. Поэтому рассмотрим использование единой голограммы. На рис. 6а приведен результат восстановления при отсутствии искажений, на рис. 6б – при искажении 20% пикселей голограммы.

Из рис. 6б видно, что координаты наиболее яркой точки внутри каждого из 16 секторов, т.е. значения каждого из 16 переданных байтов определяются безошибочно.

Таким образом, результаты проведенного моделирования показывают, что при переходе от одномо-

вого режима использования оптоволокна как цифрового канала связи к режиму многомодовой передачи изображений с числом мод $N = 4096$ возможно повышение скорости передачи в 128 раз при модовой дисперсии, искажающей до 20% принимаемого изображения. Организация многомодовой передачи с таким числом мод является сложной задачей, но эксперименты, описанные в [23] (4500 мод) и [26] (17000 мод), доказывают, что она имеет решение.

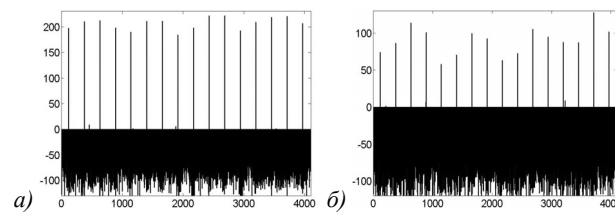


Рис. 6. Результат восстановления: (а) при отсутствии искажений, (б) при 20% ошибок

Если требуется обеспечить передачу информации по волокну такой длины, при которой возможен только маломодовый режим, метод позиционного голографического кодирования может быть эффективен и в этом случае. Минимально число мод и, соответственно, число пикселей голограммы, при котором рассматриваемое кодирование имеет смысл, – 16. Но заметное проявление устойчивости к модовой дисперсии проявляется, начиная с 50–60 мод в волокне.

Голограмма 6-разрядного входного блока с $N = 64$ приведена на рис. 7а, результат ее восстановления – на рис. 7б.

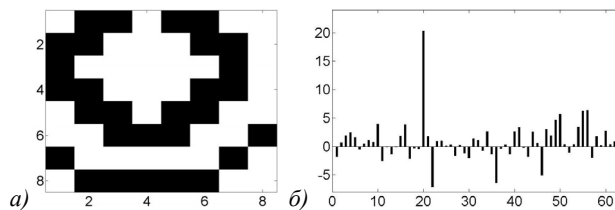


Рис. 7. Голограмма (а) и результат восстановления (б) при числе мод $N = 64$

На рис. 8а приведена голограмма, содержащая 15% ошибок, на рис. 8б – результат ее восстановления.

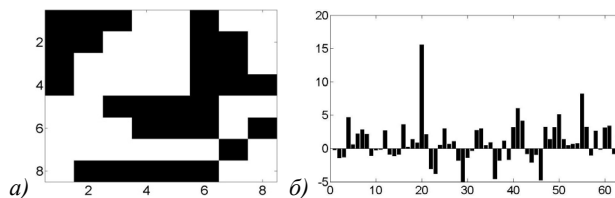


Рис. 8. Голограмма (а) и результат восстановления (б) при числе мод $N = 64$ и 15% ошибок

На рис. 9 показана зависимость числа мод, которое необходимо использовать для декодирования передаваемых данных с вероятностью ошибки не более 10^{-3} , от степени искажения голограммы в процессе передачи.

На рис. 10 приведена зависимость выигрыша в скорости передачи по многомодовому волокну по сравнению с одномодовым от числа используемых мод.

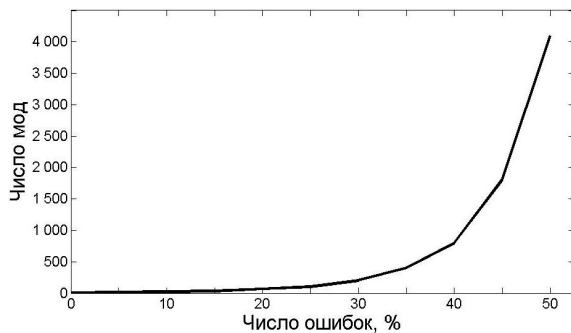


Рис. 9. Зависимость числа необходимых мод от количества искажений

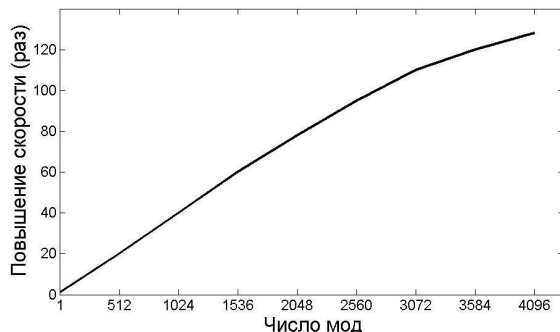


Рис. 10. Зависимость выигрыша в скорости от количества мод

Заключение

В работе рассмотрена возможность повышения скорости передачи по многомодовому волокну цифровой информации и показано, что переход к голографической форме представления передаваемой информации обеспечивает высокую устойчивость к модовой дисперсии, межмодовой интерференции и другим источникам искажений. Получаемый запас помехоустойчивости позволяет увеличить сложность исходных изображений для кодирования большего объема информации и тем самым увеличить скорость передачи информации. Достижимый выигрыш зависит от количества мод в волокне, длины волокна, уровня модовой дисперсии и выбранных параметров кодирования. Разработка аппаратных средств голографического кодирования/декодирования является предметом дальнейших исследований.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00080, <https://rscf.ru/project/24-29-00080/>.

References

[1] 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; 9: 17597. DOI: 10.1038/s41598-019-53530-6.
 [2] Li G, Bai N, Zhao N, Xia C. Space-division multiplexing: the next frontier in optical communication. *Adv. Opt. Photonics* 2014; 6: 413–487.
 [3] Richardson D, Fini J, Nelson LE. Space-division multiplexing in optical fibres. *Nat. Photonics* 2013; 7: 354.

[4] Lei Y, et al. Space-division-multiplexed transmission of 3×3 multiple-input multiple-output wireless signals over conventional graded-index multimode fiber. *Opt. Express* 2016; 24: 28372–28382.
 [5] Matsuo S, et al. High-spatial-multiplicity multicore fibers for future dense space-division-multiplexing systems. *J. Light. Technol.* 2016; 34: 1464–1475.
 [6] Puttnam BJ, Rademacher G, Luís RS. Space-division multiplexing for optical fiber communications, *Optica* 2021; 8: 1186-1203.
 [7] Winzer PJ, Neilson DT, Chraplyvy AR. Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years. *Opt Express* 2018; 26(18): 24190-24239.
 [8] 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: 28372-28382. DOI: 10.1364/OE.24.028372.
 [9] Rademacher G, et al. High capacity transmission with few-mode fibers. *J Lightw Technol* 2019; 37(2): 425-432.
 [10] Turtaev S, Leite IT, Altwegg-Boussac T, Pakan JM, Rochefort NL, Cizmar T. High-fidelity multimode fibre-based endoscopy for deep brain in vivo imaging. *Light Sci Appl* 2018; 7(1): 92. DOI: 10.1038/s41377-018-0094-x.
 [11] Resisi S, Popoff SM, Bromberg Y. Image transmission through a dynamically perturbed multimode fiber by deep learning. *Laser Photon Rev* 2021; 15(10): 2000553. DOI: 10.1002/lpor.202000553.
 [12] Hu S, Lin W, Liu H, et al. Reconstruction performance for image transmission through multimode fibers. *Optoelectron Lett* 2023; 19: 235-241. DOI: 10.1007/s11801-023-2186-y.
 [13] Song B, Jin C, Wu J, Lin W, Liu B, Huang W, Chen S. Deep learning image transmission through a multimode fiber based on a small training dataset, *Opt. Express* 2022; 30: 5657-5672.
 [14] Yong Z, Gong Z, Wei Y, Wang Z, Hao J, Zhang Ji. Image transmission through a multimode fiber based on transfer learning. *Optical Fiber Technology* 2023; 79: 103362. 10.1016/j.yofte.2023.103362.
 [15] Psaltis D, Image Transmission Through Multimode Fibers, *Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (online) (Optica Publishing Group, 2018)* 2018; paper W4J.1.
 [16] Zhu C, Chan EA, Wang Y. Image reconstruction through a multimode fiber with a simple neural network architecture. *Sci Rep* 2021; 11: 896. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79646-8>.
 [17] Caramazza P, Moran O, Murray-Smith R, Faccio D. Transmission of natural scene images through a multimode fibre. *Nat Commun* 2019; 10: 2029. DOI: 10.1038/s41467-019-10057-8.
 [18] Pavelyev VS. Application of remarkable properties of eigensubspaces of light propagation operator in a lenslike medium for solving the problems of computer optics [In Russian]. *Computer Optics* 2002; 24: 58-61.
 [19] Fertman A, Yelin D. Image transmission through an optical fiber using real-time modal phase restoration. *J Opt Soc Am B* 2013; 30(1): 149-157. DOI: 10.1364/JOSAB.30.000149.
 [20] Barankov R, Mertz J. High-throughput imaging of self-luminous objects through a single optical fibre. *Nat Commun* 2014; 5: 5581. DOI: 10.1038/ncomms6581.
 [21] Liu C, Deng L, Liu D, Su L. Modeling of a single multimode fiber imaging system. *arXiv Preprint*. 2016. Source: <<https://arxiv.org/abs/1607.07905>>. DOI: 10.48550/arXiv.1607.07905.

- [22] Kakkava E, Rahmanib B, Borhania N, Tegina U, Loterieb D, Konstantinou G, Moserb C, Psaltis D. Imaging through multi-mode fibers using deep learning: The effects of intensity versus holographic recording of the speckle pattern. *Opt Fiber Technol* 2019; 52: 101985. DOI: 10.1016/j.yofte.2019.101985.
- [23] Borhani N, Kakkava E, Moser C, Psaltis D. Learning to see through multimode fibers. *Optica* 2019; 5(8): 960-966. DOI: 10.1364/OPTICA.5.000960.
- [24] Fan P, Zhao T, Su L. Deep learning the high variability and randomness inside multimode fibres. arXiv Preprint. 2018. Source: <<https://arxiv.org/abs/1807.09351>>. DOI: 10.48550/arXiv.1807.09351.
- [25] Rahmani B, Loterie D, Konstantinou G, Psaltis D, Moser C. Multimode optical fiber transmission with a deep learning network. *Nature. Light Appl* 2018; 7: 69. DOI: 10.1038/s41377-018-0074-1.
- [26] Takagi R, Horisaki R, Tanida J. Object recognition through a multi-mode fiber. *Opt Rev* 2017; 24: 117-120. DOI: 10.1007/s10043-017-0303-5.
- [27] Leite IT, Turtaev S, Flaes DEB, Cizmar T. Observing distant objects with a multimode fiber-based holographic endoscope. *APL Photonics* 2021; 6(3): 036112. DOI: 10.1063/5.0038367.
- [28] Du Y, Turtaev S, Leite IT, Lorenz A, Kobelke J, Wondraczek K, Čížmár T. Hybrid multimode – multicore fibre based holographic endoscope for deep-tissue neuro-photonics[J]. *Light: Advanced Manufacturing* 2022; 3: 29. doi: 10.37188/lam.2022.029.
- [29] Leonardo RD, Bianchi S. Hologram transmission through multi-mode optical fibers, *Opt. Express* 2011; 19: 247-254.
- [30] Timofeev AL, Sultanov AKh, Meshkov IK, Gizatulin AR. Usage of holography for parallel transmission of information. *Proc SPIE* 2023; 12743: 1274305. DOI: 10.1117/12.2678423.
- [31] Timofeev AL, Sultanov AKh. Holographic method of error-correcting coding. *Proc SPIE* 2019; 11146: 111461A. DOI: 10.1117/12.2526922.
- [32] Timofeev AL, Sultanov AKh, Filatov PE. Holographic method for storage of digital information. *Proc SPIE* 2020; 11516: 1151604. DOI: 10.1117/12.2566329.
- [33] Timofeev AL, Sultanov AKh. Building a noise-tolerant code based on a holographic representation of arbitrary digital information. *Computer Optics* 2020; 44(6): 978-984. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-739.
- [34] Timofeev AL, Sultanov AK, Meshkov IK, Gizatulin AR. Position coding as a means of increasing the range of optical communications links [In Russian]. *Opticheskii Zhurnal* 2022; 89(9): 75-85. DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-09-75-85.
- [35] Timofeev AL, Sultanov AK, Meshkov IK, Gizatulin AR. 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; 90(10): 13-23. DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-10-13-23.

Сведения об авторах

Тимофеев Александр Леонидович, 1955 года рождения, кандидат технических наук, доцент, в 1977 году окончил Уфимский авиационный институт (ныне – Уфимский университет науки и технологий – УУНиТ) по специальности «Информационно-измерительная техника», работает доцентом на кафедре электронной инженерии УУНиТ. Область научных интересов: помехоустойчивое кодирование, связь, обработка изображений. E-mail: a_l_t@inbox.ru

Султанов Альберт Ханович, 1950 года рождения, доктор технических наук, профессор, в 1973 году окончил Новосибирский электротехнический институт связи (ныне – Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики) по специальности «Многоканальная электросвязь», работает профессором на кафедре телекоммуникационных систем УУНиТ. Область научных интересов: полупроводниковая и антенная техника, оптика, связь, обработка изображений. E-mail: tk@ugatu.ac.ru

Мешков Иван Константинович, 1985 года рождения, кандидат технических наук, доцент, в 2007 году окончил Уфимский государственный авиационный технический университет по специальности «Радиосвязь, радиовещание и телевидение», работает доцентом на кафедре телекоммуникационных систем УУНиТ. Область научных интересов: обработка сигналов, спутниковые данные, обработка цифровых сигналов. E-mail: mik.ivan@bk.ru

Гизатулин Азат Ринатович, 1992 года рождения, кандидат технических наук, в 2016 году окончил Уфимский государственный авиационный технический университет по направлению подготовки магистров «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», работает доцентом на кафедре телекоммуникационных систем УУНиТ. Область научных интересов: волоконная оптика, телекоммуникационные системы. E-mail: azat_poincare@mail.ru

Багманов Валерий Хусайнович, 1951 года рождения, доктор технических наук, профессор, окончил физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, работает профессором кафедры телекоммуникационных систем УУНиТ. Область научных интересов: моделирование и обработка сложных сигналов в телекоммуникационных системах. E-mail: bagmanov.v@rambler.ru

ГРНТИ: 49.03.03

Поступила в редакцию 12 марта 2024 г. Окончательный вариант – 24 апреля 2024 г.

Using a multimode fiber to improve data transfer rates

A.L. Timofeev¹, A.K. Sultanov¹, I.K. Meshkov¹, A.R. Gizatulin¹, V.K. Bagmanov¹
¹Ufa State Aviation Technical University, 450008, Russia, Ufa, K. Marks Street 12

Abstract

The possibilities of using spatial separation of channels in a multimode fiber are considered. When information is transmitted through a multimode fiber, a large number of errors arise due to mode dispersion, mode-to-mode interference and other sources. It is shown that if the fiber data transmission utilizes not an image corresponding to the original digital array but an image hologram, it is possible to use a specific property of holography - the divisibility of a hologram, thus ensuring the restoration of the original image from a highly distorted hologram or its fragment. The virtual optical object for which a hologram is constructed is a point source on a black background, and information is included in the coordinates of the radiation source. The result of encoding is the simplest hologram - a Fresnel zone plate, with the coordinates of the plate center carrying the encoded information. At the receiver, the purpose of decoding is not to restore the brightness of each point of the transmitted hologram, but to calculate the coordinates of the center of the Fresnel zones. This is what makes this method highly resistant to all types of distortion. A description of the numerical simulation is given, the results of which show that when moving from using a single-mode optical fiber for digital data communication to a multimode fiber for image transmission with the number of modes $N=4096$, a 128-fold increase in the transmission speed can be achieved, with mode dispersion distorting up to 20% of the received image.

Keywords: multimode transmission, modal dispersion, holographic coding.

Citation: Timofeev AL, Sultanov AK, Meshkov IK, Gizatulin AR, Bagmanov VK. Using a multimode fiber to improve data transfer rates. *Computer Optics* 2024; 48(5): 681-688. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1445.

Acknowledgements: The work was funded by the Russian Science Foundation under grant No. 24-29-00080.

Authors' information

Aleksandr Leonidovich Timofeev (b.1955) Candidate of Technical Science, Assistant Professor, graduated from Ufa Aviation Institute in 1977, majoring in Information and Measuring Technology, works as Associate Professor of Electronic Engineering department at the Ufa University of Science and Technology. Research interests: noise-immune coding, communication, image processing. E-mail: a_l_t@inbox.ru

Albert Khanovich Sultanov (b. 1950) Doctor in Technical Sciences, Professor, graduated from the Novosibirsk Electrotechnical Institute of Communications in 1973, majoring in Multichannel Telecommunications, works as Professor of Telecommunication Systems department at the Ufa University of Science and Technology. Research interests: semiconductor and antenna technology, optics, communications, image processing. E-mail: tk@ugatu.ac.ru

Ivan Konstantinovich Meshkov (b. 1985), Candidate of Technical Science, Assistant Professor, received Eng. Deg. in 2007 in Radiocommunication, Radiobroadcasting and Television from Ufa State Aviation Technical University. He works as Assistant Professor at the Telecommunication Systems department at the Ufa University of Science and Technology. His research interests include signal processing, satellite data processing, digital signal processing. E-mail: mik.ivan@bk.ru

Azat Rinatovich Gizatulin (b. 1992), Candidate of Technical Science, received master degree in Infocommunication Technologies and Communications from Ufa State Aviation Technical University. He works as Assistant Professor at the Telecommunication Systems department at the Ufa University of Science and Technology. His research interests include fiber optics, telecommunication systems. E-mail: azat_poincare@mail.ru

Valeriy Khusainovich Bagmanov (b. 1951), graduated from Physics faculty of Lomonosov Moscow State University. Doctor in Technical Sciences. His current position is professor at Telecommunication Systems department of the Ufa University of Science and Technology. His area of expertise includes modeling and processing of signals with complex forms in communication systems. E-mail: bagmanov.v@rambler.ru

Code of State Categories Scientific and Technical Information (in Russian – GRNTI): 49.03.03
Received March 12, 2024. The final version – April 24, 2024.
