DOI: https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.9.8

УДК: 621.376.9:004.932

Метод оптимизации считывания информации, переданной по каналу оптической связи, на основе технологии оптических вихрей

В.Л. Вакс[1,2], Ю.В. Галкина[3], О.А. Морозов[3], А.В. Семенова[1,2], М.М. Сорохтин[3]

[1]Институт Физики Микроструктур РАН,
Россия, Нижний Новгород

[2]Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Россия, Санкт-Петербург

[3]Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Россия, Нижний Новгород

Статья поступила в редакцию 12 августа 2026 г.

Аннотация. В работе предложен вычислительно эффективный алгоритм обработки и декодирования сигналов, передаваемых по открытой оптической линии связи, на основе модуляции проекции орбитального момента импульса фотонов (т.н. технологии оптических вихрей). Алгоритм декодирования заключается в корреляционной обработке зарегистрированного изображения, имеющего характерную многолепестковую структуру. Вычислительная эффективность достигается за счет формирования одномерных массивов данных из исходного изображения, на основе которых производится вычисление линейной корреляции между формируемыми данными и эталонными сигналами. На основе компьютерного имитационного моделирования получены зависимости вероятности битовой ошибки декодирования от отношения сигнал-шум при воздействии на исходное изображение аддитивного релеевского и мультипликативного шумов для оптического аналога фазовой модуляции радиосигнала.

Ключевые слова: оптическая связь, модуляция лазерного излучения, оптические вихри, обработка изображений, декодирование данных, вероятность битовой ошибки.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского Научного Фонда 21-72-30020 П https://rscf.ru/project/21-72-30020/

Автор для переписки: Семенова Анна Владимировна, semenovaav@ipmras.ru

Введение

В настоящее время различные системы оптической связи, использующие как беспроводные оптические каналы, так и волоконно-оптические каналы, активно применяются для высокоскоростной передачи аналоговых и цифровых сигналов. Бурное развитие систем оптической связи обусловлено различными факторами: с одной стороны, существенно возрастающими требованиями к объему передаваемой информации и скорости информационного обмена, проблемами ограничения ресурса (емкости) систем связи радиодиапазона, с другой стороны, – достижениями в научно-техническом прогрессе в области интегральной оптоэлектроники, волоконно-оптических усилителей, высокоскоростных оптических модуляторов, полупроводниковых лазеров и фотоприемников, устройств электронного и оптического мультиплексирования и коммутации сигналов [1]. Кроме того, оптические системы связи обеспечивают высокую надежность защиты передачи данных от несанкционированного доступа.

Поскольку оптическое излучение имеет электромагнитную природу, теоретически для передачи информации в оптической линии связи возможно применение модуляции параметров электромагнитных волн аналогично системам связи радиодиапазона. Однако в силу специфики оптического (обычно ближнего инфракрасного) диапазона и характеристик приемников оптического излучения используются в основном методы прямой амплитудной модуляции (изменения интенсивности) светового потока, либо методы, основанные на изменении показателя преломления некоторых оптических материалов,

например ниобата лития, под действием внешнего электромагнитного поля, с последующим преобразованием к амплитудной модуляции за счет интерференции с опорным пучком. Существенно реже используются методы модуляции оптического излучения за счет изменения поляризации. В качестве приемников модулированного оптического сигнала наиболее часто используются высокоскоростные твердотельные GaAs и InGaAs pin-фотодиоды.

Благодаря широкому спектральному диапазону, возможностям высокоскоростной модуляции и детектирования оптического сигнала и мультиплексирования данных, пропускная способность оптических линий связи уже в настоящее время достигает значений нескольких сотен гигабайт в секунду. При этом имеется потенциал значительно увеличить пропускную способность канала передачи данных за счет внедрения современных достижений фундаментальной и прикладных наук. В частности, такую возможность дает внедрение элементов квантовой коммуникации – технологии оптических вихрей или вихревых оптических пучков.

Вихревыми называют пучки электромагнитных волн, обладающие ненулевой проекцией орбитального момента импульса на некоторую ось – так называемым «топологическим зарядом» [2]. В настоящее время технология оптических вихрей используются в системах беспроводной оптической связи [3–7], передаче данных в космосе [8], электронной микроскопии, астрофизике [2] и др. Можно выделить два основных направления применения оптических вихрей для передачи данных: для мультиплексирования канала связи и непосредственно для кодирования информации. В последнем случае для передачи информации может использоваться пространственный модулятор света, а для считывания – регистрация распределения поля на принимающем экране, так как топологический заряд вихря определяется распределением соответствующей характеристики электромагнитной волны (чаще всего – фазы поля) в пространстве [5–7, 9]. К слабым местам такого подхода относится высокая вычислительная трудоемкость распознавания изображений, особенно с учетом искажений, обусловленных, например, рассеянием пучка в атмосфере [5–7, 10].

Целью данной работы являются предварительные исследования (теория, численный эксперимент) возможного метода оптимизации считывания символьной информации, закодированной топологическими зарядами оптических вихрей.

1. Теоретическая часть. Характерная структура пучка

Хотя проекции орбитального момента импульса могут принимать ненулевое значение для широкого круга неплоских или неоднородных волн [5–7, 10–12], в оптических системах связи обычно используют так называемые вихревые пучки – направленные пучки электромагнитных волн, состоящие из фотонов с определенной проекцией орбитального момента импульса на направление распространения. Можно выделить несколько типов таких пучков (например, пучки Бесселя, псевдо-Бесселевы пучки, пучки Лагерра-Гаусса [2]), отличающихся некоторыми деталями структуры, – однако для всех них характерно сохранение структуры при распространении. Иными словами, если представить распределение поля с помощью векторного потенциала магнитного поля $\vec{A}$ в калибровке Лоренца, то для закрученных пучков справедливо соотношение (1), в том числе (с некоторыми оговорками), в дальней зоне:

$$\vec{A}_l\left(\vec{r},t\right)=\vec{x}^{\,0}A_0u_{|l|}\left(\frac{\rho}{\rho_0\left(z\right)}\right)\exp\left\{ik_z z+il\phi-i\omega t\right\} \tag{1}$$

где ρ, φ и z – цилиндрические координаты (пучок распространяется в положительном направлении оси z), $\vec{x}^{\,0}$ – единичный вектор, характеризующий поляризацию пучка, A_0, k_z и ω – амплитуда, проекция волнового вектора на направление распространения и круговая частота поля соответственно, ρ_0 и l – характерный диаметр и топологический заряд пучка соответственно, а функция $u_{|l|}$ определяет радиальное распределение поля.

Следует отметить, что топологический заряд пучка сохраняется при распространении и поэтому может использоваться для передачи информации. Однако, чтобы считать топологический заряд, необходимо установить распределение фазы в поперечном сечении пучка, что в оптике является довольно сложной задачей. Кроме того, при распространении пучка по беспроводному каналу связи в условиях реальной атмосферы распределение фазы подвержено случайным флуктуациям из-за рассеяния на колебаниях показателя преломления воздуха, а также на аэрозольных частицах (пыль, туман), что дополнительно затрудняет считывание информации [5–7, 10].

Можно показать, что при интерференции двух вихревых пучков с одинаковыми амплитудами, диаметром и направлением распространения, а также равными по модулю, но противоположными по знаку топологическими зарядами образуется характерная многолепестковая структура (2), качественно сохраняющаяся при распространении, в том числе, в реальной атмосфере [7]:

$$\vec{A}_{|l|}\left(\vec{r},t\right)=\vec{x}^{0}A_{0}u_{|l|}\left(\frac{\rho}{\rho_{0}\left(z\right)}\right)\cos\left(l\phi\right)\exp\left\{\mathrm{i}k_{z}z-\mathrm{i}\omega t\right\}. \qquad (2)$$

Такие структуры для разных топологических зарядов $|l|$ отличаются распределением интенсивности, измерить которое проще, чем распределение фазы. Поэтому в рамках данной работы, аналогично [7], будет рассматриваться возможность кодирования информации, при которой каждому символу ставится в соответствие пара вихревых пучков (2) со своим значением $|l|$. В этом случае для считывания символа необходимо определить количество «лепестков» в распределении интенсивности пучка на экране.

2. Структура системы оптической связи на основе оптических вихрей

Атмосферная оптическая линия связи на основе технологии оптических вихрей строится по традиционной схеме (рис. 1), включает в себя передатчик на основе лазерного источника излучения, оптического пространственного

(амплитудного) модулятора и телескопической фокусирующей системы, а также приемник на основе регистратора-детектора (видеокамеры) и декодера для получения выходного информационного сигнала [5–7]. Основным требованием является прямая видимость между передатчиком и приемником излучения. Для передачи информации используется модуляция с орбитальным угловым моментом (OAM-SK). Битовая последовательность группируется в символы, каждому из которых назначается мода вида (2), соответствующая определенному значению $|l|$.

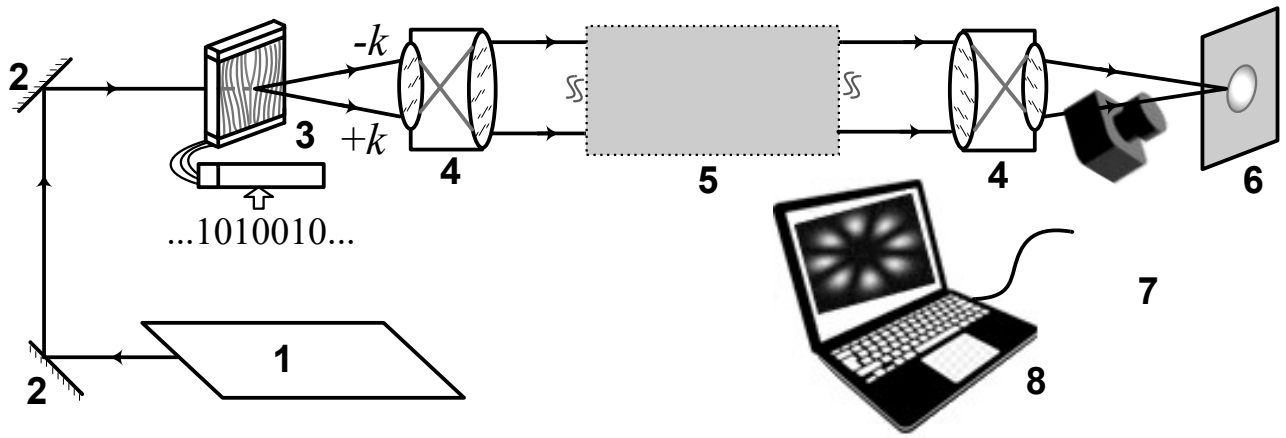


Рис. 1. Примерная схема оптической линии связи на основе технологии оптических вихрей. 1 – лазер, 2 – оптическое зеркало, 3 – пространственный модулятор света, 4 – телескопическая фокусирующая система, 5 – среда распространения света, 6 – экран, 7 – регистрирующая камера, 8 – компьютер.

Для получения модулированных по топологическому заряду вихревых пучков высококогерентного лазерного излучения можно применять различные оптические системы: на основе спиральных фазовых пластинок или специальных дифракционных решеток – формируемые пространственным модулятором света. Однако, как уже отмечено выше, более удобно использовать амплитудные пространственные модуляторы. Необходимая форма прозрачных и непрозрачных участков модулятора рассчитывается, как интерференционная картина между двумя пучками определенной структуры. В частности, для получения пучков типа (2), рассматриваемых в данной статье, в качестве такой пары пучков могут использоваться вихревые пучки (1) с равными по модулю и противоположными по знаку топологическими зарядами.

В результате суперпозиции двух вихревых пучков с противоположными значениями топологического заряда на выходе модулятора получается распределение амплитуды оптического излучения, достаточно устойчивое к изменению характеристик среды распространения, в частности, к турбулентности атмосферы. В качестве примера на рис. 2 представлен ряд картин распределения интенсивности двух закрученных пучков с различными топологическими зарядами [15].

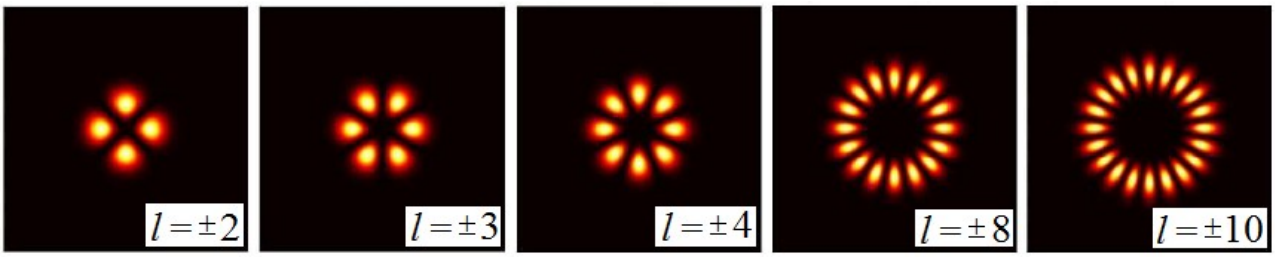


Рис. 2. Распределения интенсивности суперпозиции двух вихревых пучков с различными топологическими зарядами [15].

Для приема сигнала, передаваемого пучком типа (2), можно использовать регистрацию распределения интенсивности пучка, фокусируемого телескопической системой на экране, либо непосредственно на фоточувствительной матрице-детекторе. Для декодирования зарегистрированного распределения интенсивности могут быть использованы как традиционные методы обработки изображений, так и предварительно обученная искусственная нейронная сеть [5, 6, 15].

3. Предполагаемый метод распознавания изображений, соответствующих разным топологическим зарядам

В данном разделе рассматривается подход к декодированию зарегистрированного распределения интенсивности на основе модификации классического метода обнаружения и распознавания образов на изображениях с использованием корреляционного анализа. Для каждого используемого в системе передачи данных топологического заряда формируются (рассчитываются) эталонные изображения, используемые при вычислении корреляции с зарегистрированным распределением интенсивности. На основе

вычисленных коэффициентов корреляции выбирается эталон с максимальным совпадением. Такой подход далее называем «полноснимковым» методом. Он реализует принцип максимального правдоподобия, имеет высокую эффективность даже при высоком уровне шума и наличии геометрических искажений, однако он требует существенных вычислительных ресурсов.

В работе для повышения вычислительной эффективности предлагается использовать линейный метод корреляции. Как видно из рис. 2, основная энергия в поперечном сечении вихревого пучка сосредоточена в кольцевых областях, радиус и толщина которых определяются топологическим зарядом. Толщина и количество выделяемых для анализа колец (рис. 3) зависит от выбранного типа модуляции (по аналогии с фазовой модуляцией радиосигнала ФМ-2, ФМ-4, ФМ-8, …).

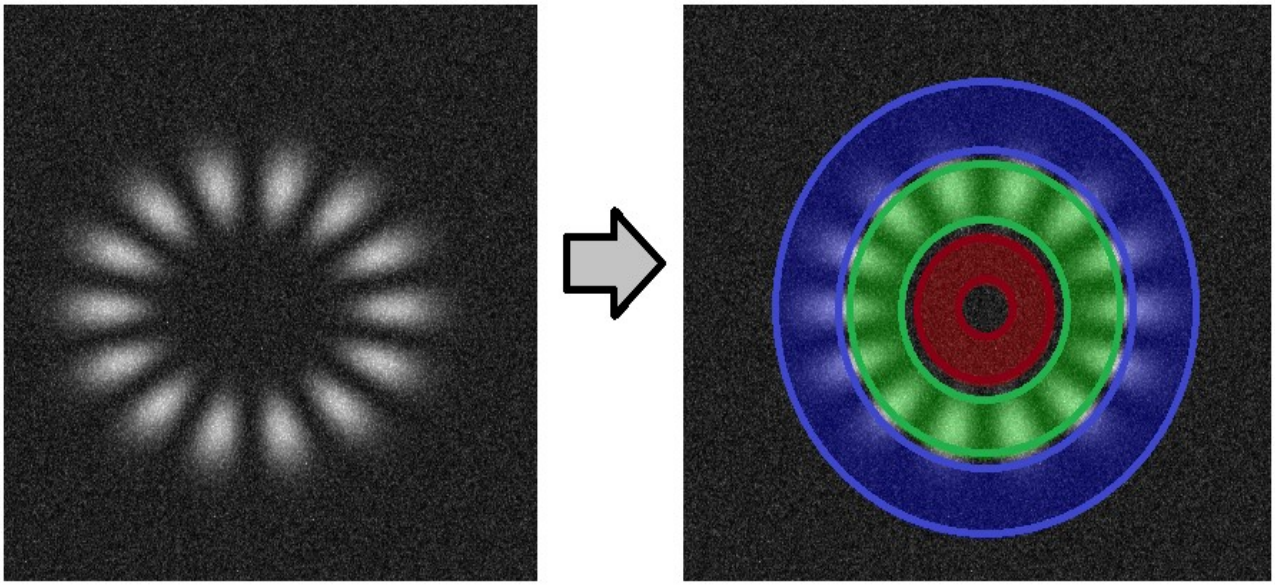


Рис. 3. Выделение из полного распределения интенсивности вихревого пучка кольцевых областей.

Так, предварительные исследования показали, что для модуляции типа QPSK (ФМ-4) достаточно выделить два кольца. Далее формируются линейные массивы. Этот подход далее называем «кольцевым» методом.

Для перехода от кольцевых (двумерных) к линейным массивам можно использовать различные подходы, например:

- формирование по определенному правилу вектора отсчетов из элементов изображения, попадающих в выделенные кольца;
- усреднение элементов изображения внутри кольца, расположенных вдоль радиусов;
- выделение набора одномерных массивов, состоящих из элементов изображения вдоль окружностей, интерполяцию полученных массивов до одинакового размера и последующее усреднение.

Для выбранного метода формирования одномерного массива необходимо сформировать шаблоны (эталонные массивы) для каждого значения топологического заряда оптических вихрей. Предпочтительно использовать подходы с усреднением, т.к. при этом производится дополнительная фильтрация шума, а также получаются массивы существенно меньшей длины. Далее, как и в случае полноснимкового изображения, производится вычисление линейной корреляции между эталонными массивами и полученными «кольцевым» методом из зарегистрированного распределения интенсивности и оценка топологического заряда:

$$\hat{l} = \arg\max_{k=1\ldots L}\left[\max_{m}\left(R_k(m)\right)\right],$$
$$R_k(m) = \sum_{i=-M}^{M} I_k(i)J_k(i+m), \tag{3}$$

где L – количество шаблонов (индекс модуляции), M – максимальный сдвиг при вычислении линейной корреляции, предусмотренный для компенсации возможного поворота регистрируемых изображений, $I(i)$, $J(i)$ – центрированные отсчеты исходного и эталонного пучков соответственно.

Таким образом, предлагаемый подход позволяет исключить влияние фонового шума за пределами пучка, сохранить ключевую информацию о распределении интенсивности и уменьшить объем данных для последующего корреляционного анализа.

4. Результаты компьютерного моделирования

Исследование характеристик предложенного «кольцевого» метода определения топологического заряда, которому соответствует регистрируемое изображение, проводилось методом имитационного компьютерного моделирования.

Интенсивность вихревого пучка рассчитывается на основе следующего выражения (4), соответствующего формированию в плоскости детектора суперпозиции пучков Лагерра-Гаусса с топологическими зарядами l и $-l$, распространяющихся в направлении оси z:

$$I_l(\rho,\phi) \approx \left(\frac{\rho}{W}\right)^{2|l|} \cos^2(l\phi) \exp\left(-2\rho^2 / W^2\right), \quad (4)$$

где ρ, φ – полярные координаты, W – диаметр оптического пучка.

Для модуляции интенсивности пучка использовалось четыре топологических заряда $|l| = 1, 2, 3, 4$ (два бита на символ, по аналогии с ФМ-4 модуляцией радиосигнала). Исходное изображение с разрешением 720×720 пикселей подвергалось зашумлению в соответствии с заданным отношением сигнал/шум (ОСШ).

Поскольку регистрируется интенсивность когерентного излучения, при моделировании использовалось два вида шума – аддитивный и мультипликативный (аналогичный спекл-эффекту в голографии). Аддитивный шум добавляется к значению интенсивности в каждой точке методом Бокса-Мюллера [13], реализующим распределение Рэлея. Мультипликативный шум добавляется к каждому значению интенсивности путем умножения

на случайную величину, распределенную по логарифмически нормальному закону. Данный тип шума моделирует флуктуации интенсивности лазерного пучка при прохождении через турбулентную атмосферу.

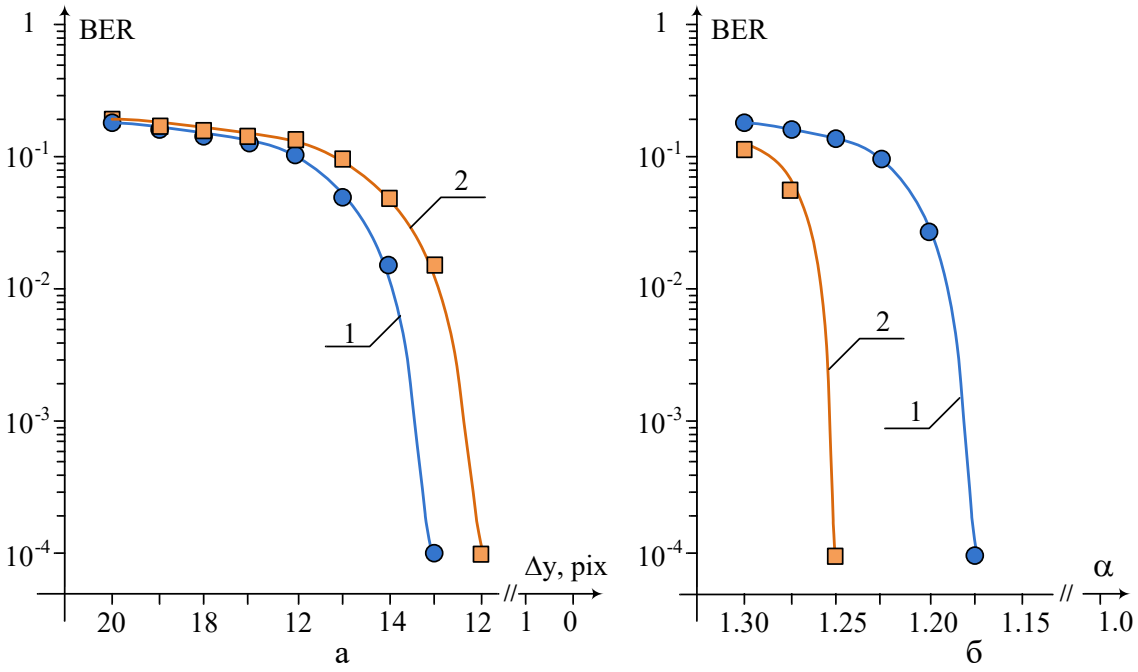


Рис. 4. Зависимость вероятности битовой ошибки декодирования от величины искажающих факторов: а) смещение центра изображения; б) масштабирование. Кривая 1 соответствует полноснимковому методу, кривая 2 – «кольцевому» методу.

На предварительном этапе проводилось исследование влияния искажающих факторов на вероятность ошибки распознавания (битовой ошибки, BER) полноснимковым и «кольцевым» методами для набора топологических зарядов $|l| = 0 \ldots 15$. Для каждого типа искажения проведено 500 экспериментов. В качестве искажающих факторов рассматривались:

- поворот регистрируемого изображения на некоторый угол в плоскости изображения от 0 до 5 градусов;
- смещение центра регистрируемого изображения вдоль осей *Ox* и *Oy* максимально на 20 пикселей.
- масштабирование изображения в диапазоне $\alpha \in [1.0;\ 1.3]$ с шагом 0.025.

Во всех экспериментах на регистрируемое изображение накладывался аддитивный релеевский шум с ОСШ +10дБ.

Анализ результатов предварительного этапа исследования показал, что «кольцевой» метод имеет одинаковую устойчивость с полноснимковым методом к возможному повороту регистрируемого изображения на угол порядка ±3 градуса. На рис. 4а, б приведены графики зависимостей битовой ошибки декодирования BER от величины искажающих факторов: смещение центра регистрируемого изображения по оси *Oy* в пикселях и масштабирование изображения с коэффициентом масштабирования α. Линия 1 на графиках соответствует полноснимковому методу, линия 2 – «кольцевому» методу. Обрыв графиков на уровне вероятности битовой ошибки 10^{-4} означает отсутствие ошибок декодирования. Анализ представленных на рис. 4 зависимостей показывает, что «кольцевой» метод незначительно уступает полноснимковому методу в устойчивости к смещению центра изображения, но при этом более устойчив к масштабированию. Уменьшение размерности обрабатываемых данных позволило повысить вычислительную эффективность «кольцевого» метода по отношению к полноснимковому методу не менее чем в 10 раз.

На рис. 5 представлены зависимости битовой ошибки при декодировании сигнала (аналог ФМ-4) от уровня (ОСШ) аддитивного релеевского шума и мультипликативного шума. С целью выявления особенностей декодирования топологического заряда рассмотрены два случая: без применения и с применением помехозащитного кодирования. Генерировалась псевдослучайная последовательность длиной 2^{20} (1 048 576) бит, из которой применением сверточного кодирования (скорость 1/2, полиномы 171, 133) получали последовательность для последующего декодирования алгоритмом Витерби [14].

Линии 1.1 и 1.2 соответствуют искажению изображений аддитивным шумом, соответственно без использования (1.1) и с использованием (1.2) помехозащитного кодирования. Линии 2.1 и 2.2 соответствуют искажению изображений мультипликативным шумом, также без использования (2.1) и с использованием (2.2) помехозащитного кодирования. По уровню вероятности битовой ошибки 10^{-6} помехозащитное кодирование дает энергетический выигрыш для аддитивного шума порядка 4 дБ, для мультипликативного шума – порядка 3 дБ. Однако при

уменьшении ОСШ в случае мультипликативного шума наблюдается резкое снижение эффективности помехозащитного кодирования. Хорошую работоспособность алгоритма декодирования вихревых пучков (до значения ОСШ порядка −25 дБ) на основе «кольцевого» метода можно объяснить высокой степенью избыточности детектируемых изображений по сравнению с декодированием радиосигналов с ФМ-4 модуляцией, а также наличием низкочастотной фильтрации при формировании одномерных массивов данных из кольцевых областей.

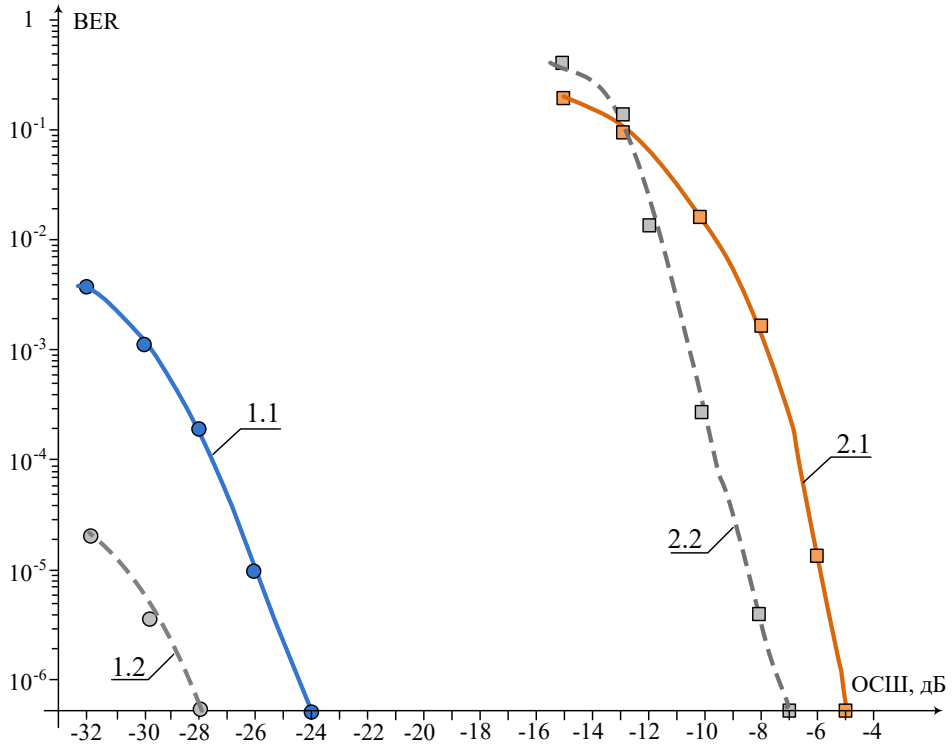


Рис. 5. Зависимость вероятности битовой ошибки декодирования от ОСШ. Левые графики – при условии искажения изображений аддитивным шумом без использования (1.1) и с использованием (1.2) помехозащитного кодирования; правые графики – при условии искажения изображений мультипликативным шумом без использования (2.1) и с использованием (2.2) помехозащитного кодирования.

Заключение

В работе предложена модификация алгоритма декодирования информации, передаваемой по каналу оптической связи на основе модуляции проекции орбитального момента импульса фотонов (т.н. технологии оптических вихрей).

Представлено краткое теоретическое описание методов модуляции лазерного излучения для получения вихревых пучков с разным значением проекции орбитального момента импульса – топологического заряда. При использовании для модуляции оптического излучения вихревых пучков Лагерра-Гаусса алгоритм декодирования информации заключается в корреляционной обработке зарегистрированного изображения, имеющего характерную многолепестковую структуру. В работе предложен «кольцевой» метод формирования одномерных массивов данных из исходного изображения, на основе которых производится вычисление линейной корреляции, имеющий высокую вычислительную эффективность. Выполнен сравнительный анализ методов оценки топологического заряда и, соответственно, декодирования информации, передаваемой по каналу оптической связи вихревыми пучками. На основе компьютерного моделирования показана хорошая устойчивость предложенного метода декодирования топологического заряда вихревых пучков к аддитивному релеевскому шуму (ОСШ порядка −25 дБ) и мультипликативному шуму (ОСШ порядка −7 дБ) по уровню вероятности битовой ошибки 10^{-6}.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского Научного Фонда 21-72-30020 П https://rscf.ru/project/21-72-30020/

Литература

1. Фокин В. Г. Оптические системы передачи и транспортные сети: учебное пособие. – М.: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Эко-Трендз, 2008. – 271 с.
2. Князев Б. А., Сербо В. Г. Пучки фотонов с ненулевой проекцией орбитального момента импульса: новые результаты //Успехи физических наук. – 2018. – Т. 188. – №. 5. – С. 508-539. https://doi.org/10.3367/UFNe.2018.02.038306
3. Wang H.,Song Q.,Cai Y.,Lin Q.,Lu X., Shangguan H., Ai Y., Xu Sh. Recent advances in generation of terahertz vortex beams andtheir applications //Chinese Physics B. – 2020. – Т. 29. – №. 9. – С. 105-121 https://doi.org/10.1088/1674-1056/aba2df

4. Yang H., Zheng Sh., He W., Yu X., Zhang X. Terahertz Orbital Angular Momentum: Generation, Detection and Communication // China Communications, 2021. – Т. 18. – №. 5. – С. 131 – 152. https://doi.org/10.23919/JCC.2021.05.009

5. Аксенов В. П., Канев Ф. Ю., Куксенок Д. С., Макенова Н. А., Хапаева А. В. Регистрация параметров вихревого пучка в турбулентной атмосфере. Ч.1. Использование градиентов волнового фронта // Известия Томского Политехнического Университета, 2013. – Т. 323. – №. 2. – С. 177 – 180.

6. Аксенов В. П., Богданов О. В. Дудоров В. В., Кагадей В. А., Казинский П. О., Колосов В. В., Королев П. С., Лазаренко Г. Ю., Левицкий М. Е., Рякин В. А. Передача сигнала, мультиплексированного по орбитальному угловому моменту, с помощью когерентного сложения лазерных пучков // Оптика Атмосферы и океана, 2025. – Т. 38. – №. 8. – С. 601 – 611. https://doi.org/10.15372/AOO20250801

7. Krenn M., Fickler R., Fink M., Handsteiner J., Malik M., Scheidl T., Ursin R., Zeilinger A. Communication with spatially modulated light through turbulent air across Vienna //New Journal of Physics. – 2014. – Т. 16. – №. 11. – С. 113028. https://doi.org/10.1088/1367-2630/16/11/113028

8. Krenn M., Handsteiner J., Fink M., Fickler R., Ursin R., Malik M., Zeilinger A. Twisted Light Transmission over 143 kilometers // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2016. – Т. 113. – №. 48. – С. 13648-13653. https://doi.org/10.1073/pnas.1612023113

9. Allen L., Beijersbergen M.W., Spreeuw R.J. C., Woerdman J.P. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes // Physical Review A, 1992. – Т. 45. – №. 11. – С. 8185-8189. https://doi.org/10.1103/physreva.45.8185

10. Короленко П.В. Оптические вихри // Соросовский образовательный журнал, 1998. – Т. 6. – С. 94 – 99.

11. Wang X.L.,Chen J., Li Y., Ding J. Optical orbital angular momentum from the curl of polarization // Physical Review Letters, 2010. – Т. 105. – С. 253602, https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.105.253602

12. Котляр В.В., Ковалев А.А., Хонина А.А. Вращающиеся вихревые лазерные пучки. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2021. – 240 с.
13. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для втузов. – М.: Высш. шк., 1977. – 479 с.
14. Витерби А. Д., Омура Дж. К. Принципы цифровой связи и кодирования. – М.: Радио и связь, 1982. – 536 с.
15. Чечеткин В.В., Семенова А.В., Черняева М.Б., Вакс В.Л. О возможности обнаружения суперпозиции оптических вихрей при наличии отдельных искажающих факторов (гауссова шума, вращения и смещения изображения) с использованием нейронных сетей. // Оптика и спектроскопия, 2025, – Т. 133. – №. 9. – С. 968-974. https://doi.org/10.61011/OS.2025.09.61765.8233-25

Для цитирования:

Вакс В.Л., Галкина Ю.В., Морозов О.А., Семенова А.В., Сорохтин М.М. Метод оптимизации считывания информации, переданной по каналу оптической связи, на основе технологии оптических вихрей. // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – № 9. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.9.8