

С.В. Жилин, В.В. Архипенко, Е.С. Басан, М.Ю. Поленов

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ БЕСПРОВОДНЫХ ОПТИЧЕСКИХ КАНАЛОВ СВЯЗИ В РАЗЛИЧНЫХ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЯХ*

Общая проблема традиционных радиоканалов связи – нехватка свободных частот, шумление, низкая пропускная способность, необходимость получения лицензии на использование частоты, относительная простота взлома. Беспроводные оптические каналы связи преодолевают данные ограничения, является одним из видов систем связи, использующих открытое пространство для передачи информации, переносимой светом – это указывает на необходимость прямой видимости приёмопередатчиков. Из-за влияния различных погодных условий световой поток подвержен атмосферному затуханию. В данной работе было проведено исследование метода повышения эффективности высокопроизводительных беспроводных оптических каналов связи в различных погодных условиях: ясное небо, туман, дождь и снег. Была рассмотрена существующая технология беспроводной оптической связи – система с применением плотного мультиплексирования (DWDM) и одним входом и одним выходом (SISO). И было предложено улучшить существующую систему применением множественного ввода-вывода (MIMO). Был проведён анализ влияния и затухания на беспроводную оптическую сеть в различных погодных условиях. Исследование выполнено на основе использования инструментария программного обеспечения для моделирования Optisystem, которое используется для эмуляции различных погодных условий затухания в двух типах систем. Были разработаны модели для каждой из исследуемых систем оптической связи. Сравнение между системами SISO и MIMO проводится с точки зрения коэффициента качества при различных погодных условиях. Предложенная система показывает многообещающие результаты по производительности и качеству принимаемого сигнала. Длина пути передачи предложенной системы в условиях плотного тумана увеличивается на 33,6%. Длина пути передачи предложенной системы в условиях сильного дождя увеличивается на 63,89%. Длина пути передачи предложенной системы при сильном снеге увеличивается на 35,21%.

Оптические каналы связи; ОКС; система SISO; система MIMO; плотное мультиплексирование; DWDM; затухание сигнала; ясное небо; туман; дождь; снег.

S.V. Zhilin, V.V. Arkhipenko, E.S. Basan, M.Yu. Polenov

IMPROVING THE EFFICIENCY OF HIGH-PERFORMANCE FREE SPACE OPTICAL COMMUNICATION CHANNELS IN VARIOUS WEATHER CONDITIONS

A common problem of traditional radio communication channels - the lack of free frequencies, noise, low bandwidth, the need to obtain a license to use the frequency, the relative ease of hacking. Free space optical communication channels overcome these limitations, is one of the types of communication systems that use open space to transmit information carried by light - this points to the need for direct visibility of the transceivers. Due to the influence of various weather conditions, the light flux is subject to atmospheric attenuation. In this paper, a method to improve the efficiency of high-performance wireless optical communication channels in different weather conditions: clear sky, fog, rain and snow was investigated. The existing wireless optical communication technology, a dense multiplexing multiplexing (DWDM) system with one input and one output (SISO), was considered. And it was proposed to improve the existing system by applying multiple input/output (MIMO). An impact and attenuation analysis on the wireless optical network in different weather conditions

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта научно-исследовательской магистратуры Института компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета ГрМг/21-01-КТ.

was conducted. The study was based on the use of the Optisystem simulation software toolkit, which is used to emulate different weather conditions of attenuation in two types of systems. Models were developed for each of the optical communication systems studied. A comparison between SISO and MIMO systems is made in terms of quality factor under different weather conditions. The proposed system shows promising results in terms of performance and received signal quality. The transmission path length of the proposed system in dense fog conditions increases by 33.6%. The transmission path length of the proposed system in heavy rain increases by 63.89%. The transmission path length of the proposed system in heavy snow increases by 35,21%.

Free space optics (FSO); SISO system; MIMO system; dense wavelength division multiplexing (DWDM); signal attenuation; clear sky; fog; rain; snow.

Введение. Системы на основе оптического канала связи (ОКС/FSO) стали технической революцией в беспроводной связи. В последнее время этот тип коммуникационных систем считается подходящим средством для высокоскоростной передачи сигнала, поскольку он зависит от светового излучения при передаче сигнала. Системы ОКС имеют ряд преимуществ перед радиочастотными (РЧ) системами связи из-за высокой пропускной способности ОКС, которая является важной характеристикой для мобильной связи, в том числе и для радиочастотной связи. ОКС лишена необходимости получения лицензии на использование спектральной частоты. Кроме того, радиочастотная система менее безопасна по сравнению с системой связи ОКС.

ОКС работают в ближнем инфракрасном диапазоне (ИК), что указывает на технологию прямой видимости. ОКС может дать потенциальное решение проблемы «последней мили», поскольку ОКС имеет преимущество в виде высокой скорости передачи данных и гибкости. В ОКС отправляется модифицированный луч инфракрасного или видимого света через атмосферу [1]. Так же существует альтернатива ИК диапазону – ультрафиолетовый (УФ) диапазон. Но в УФ диапазоне волны почти полностью поглощаются атмосферой [2]. В УФ диапазоне в отличие от ИК диапазона существуют физические факторы, существенно влияющие на построение и функционирование систем связи [3].

Концепция ОКС была изучена давно, но не была реализована на практике из-за ограничений электронных устройств, которые были разработаны в ту эпоху [4]. ОКС сталкивается с проблемой затухания из-за препятствий, создаваемых объектами, и погодных условий. Атмосфера и погодные условия, такие как туман, дождь и снег, являются основными причинами вызывающие поглощение и рассеивание сигнала. Кроме того, препятствия в виде птиц или насекомых вызывают прерывание передаваемого оптического сигнала [5, 6].

В работе [7] предлагается использовать несколько лучей передачи между станциями передатчика и приемника, т.е. метод множественного ввода-вывода (MIMO) для снижения затухания. Так же предлагается комбинирование лазерных лучей для многолучевой системы ОКС, которая смягчает проблемы, возникающие из-за погодных затуханий (поглощение, рассеяние) и потерь, которые происходят в принимаемой стороне из-за потерь, в детекторе [8].

В данном исследовании предлагается гибридная ОКС с применением плотного мультиплексирования (DWDM) MIMO, которая может преодолеть проблемы атмосферной турбулентности с масштабируемостью и высокой скоростью передачи данных. Также в исследовании сравниваются традиционная система DWDM с одиночным вводом-выводом (SISO) и предложенная система DWDM-MIMO и показано, что предложенная система демонстрирует значительное улучшение коэффициента качества принимаемого сигнала. Предложенная система является лучшим кандидатом для быстрого увеличения пропускной способности без необходимости использования новых передатчиков и приемников FSO и решения проблемы "последней мили".

Технология SISO. Развитие беспроводной связи положило начало новым высокопроизводительным способам передачи данных. Первый, классический и самый простой вариант – использования одной передающей и одной приемной антенны изображен на рис. 1. Такая система с точки зрения терминологии называется SISO – Single Input Single Output. Реализация данной технологии была разработана и смоделирована для сравнения характеристик.

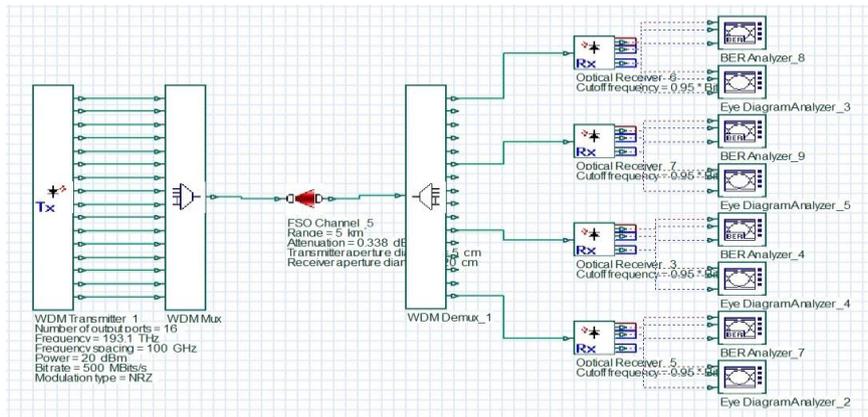


Рис. 1. DWDM-SISO

Система FSO, использующая передачу сигнала по технологии SISO, более чувствительна к атмосферному затуханию из-за влияния погодных факторов и прерывания из-за препятствий, таких как птицы и насекомые.

Мультиплексирование с разделением по длине волны (WDM). WDM используется для повышения производительности системы связи ОКС путем увеличения масштабируемости и пропускной способности системы связи. WDM получила свою известность в области систем связи на основе оптического волокна. Известны два типа WDM: (CWDM) грубое и (DWDM) плотное – классифицируются в зависимости от расстояния между каналами. Кроме того, WDM - это технология, в которой более одного оптического сигнала передается через одну среду с использованием различных длин волн. WDM является копией мультиплексирования с частотным разделением (FDM), но основное различие между этими двумя методами заключается в использовании длин волн или диапазона частот в каждом методе [4].

Демультимплексоры, находящиеся на принимающей стороне системы связи WDM, восстанавливают данные. WDM позволяют работать в одной системе независимым битрейтам информации и протоколам доступа [5, 9], что является основным условием для усовершенствования системы связи.

Влияние погодных условий на беспроводную оптическую связь. Самой большой проблемой для реализации оптической беспроводной связи является погодное затухание, которое происходит из-за рассеивания и поглощения. Частицы воды и диоксида углерода являются основными причинами поглощения сигналов. С другой стороны, дождь, туман, облака и снег являются основными причинами рассеивания беспроводных оптических сигналов. Рассеивание заставляет часть луча отклоняться от заданного вектора. Выражение затухания из-за погодных условий представлено в формуле (1).

$$A_{atm} = \exp(-\alpha L), \quad (1)$$

где A_{atm} , обозначают общее затухание, α , обозначают общий коэффициент затухания, L , обозначают длину пути передачи.

Общий коэффициент затухания вычисляется согласно формуле (2).

$$\alpha = \beta\alpha + \beta s, \quad (2)$$

где $\beta\alpha$, обозначает коэффициент затухания поглощения, βs , обозначает коэффициент затухания рассеяния.

В FSO длины волн используются такие, чтобы сделать изменение энергетических состояний невозможно и поглощение считается нулевым [10]. Общее затухание коэффициент становится как в формуле (3):

$$\alpha = \beta s. \quad (3)$$

Затухание в тумане. Туман – это облако, состоящее из мелких частиц воды, дыма, льда или всего вместе, которое образуется у поверхности земли. Туман является основной причиной рассеивания света, что ухудшает видимость [11]. Ограничение традиционного способа вычисления затухания в тумане зависит от радиуса размера частиц. В большинстве случаев размер частиц неизвестен, что затрудняет вычисление затухания [5], как в уравнении (4):

$$\beta_s = \sum_i^{n_{max}} (n_i * Q_i \pi r_i^2), \quad (4)$$

где β_s , обозначает затухание рассеяния, n_i , обозначает распределение частиц, Q_i , обозначает эффективность рассеяния, r_i , обозначает радиус размера частиц.

Чтобы преодолеть ограничение традиционного подхода, вводится закон, согласно которому величина затухания зависит только от дальности видимости, а не от размера частиц. Атмосферная видимость может быть определена, как расстояние до тела, когда диспропорция изображения составляет (5%) от исходного изображения, если оно находится вблизи [12]. Дальность видимости рассчитывается при длине волны 550 нм, которая соответствует наибольшей интенсивности солнечного спектра. Затухание в зависимости от диапазона видимости было рассчитано в соответствии с уравнением (5) [5, 13]:

$$A FOG = \frac{10 \log(v\%)}{v \text{ km}} \left(\frac{\lambda}{\lambda^0}\right)^{-q} = \frac{13}{v} \left(\frac{\lambda}{550}\right)^{-q}, \quad (5)$$

где $A FOG$, обозначает затухание в тумане в (дБ/км), v , обозначает дальность видимости в км, q , обозначает коэффициент распределения частиц по размерам в зависимости от дальности видимости, λ , обозначает длину волны передаваемого сигнала в нм, $\lambda^0 = 550$ нм обозначает эталон видимости длины волны, соответствующей максимальной интенсивности солнечного спектра.

q , рассчитывается в уравнении (6):

$$q = f(x) = \begin{cases} 1.6 & v > 50 \text{ km} \\ 1.3 & 6 \text{ km} < v < 50 \text{ km} \\ 0.585 v^{1/3} & v < 6 \text{ km} \end{cases}. \quad (6)$$

Затухание в дожде. Рассеивание в дожде отличается от чистой атмосферы, радиус капель дождя, образующихся в результате выпадения осадков, находится в диапазоне (100–1000 мкм), что значительно больше длины волны стандартных систем FSO. В результате лазер может пройти сквозь частицы дождевых капель с минимальным эффектом рассеяния [14]. Модель, которая используется для расчета затухания дождя, зависит от скорости дождя, количества дождевых капель и их размера. Затухание линейно возрастает при увеличении скорости дождя. Среднее значение скорости дождя увеличивается при увеличении размеров капель дождя [15]. Затухание, вызванное дождем, приведено в уравнении (7) [16].

$$A \text{ rain} = 1.07 R^{\frac{2}{3}}, \quad (7)$$

где $A \text{ rain}$, обозначает затухание дождя в (дБ/км), R , обозначает скорость дождя в (мм/ч).

Затухание в снеге. Кусочки снега в основном больше, чем капли дождя, и вносят в оптический сигнал затухание, превышающее эффект от дождя. В литературе сообщается, что диаметр кусочков снега может быть более 20 мкм, что является основной причиной отказа канала связи при узком лазерном луче [13]. Энергия принимаемого сигнала зависит от диаметра кусков снега и положения кусков снега относительно поперечного сечения лазерного луча [17]. Затухание сигнала, вызванное снежными погодными условиями, зависит от скорости снегопада (в мм/ч) и длины волны сигнала [18]. Затухание моделируется на основе классификации: мокрый и сухой снег – и рассчитывается по уравнению (8).

$$A_{snow} = a S^b, \quad (8)$$

где A_{snow} , обозначает затухание снега в (дБ/км), S , обозначает скорость выпадения снега в (мм/ч), (a, b) , обозначает параметры, которые классифицируют тип снегопада: мокрый или сухой снег, и в соответствии с этими двумя типами следующие значения для параметров (a, b) для этих типов:

- ♦ для мокрого снега: $a = 1.023 (10^{-4} \lambda) + 3.7855466$, $b = 0.72$,
- ♦ для сухого снега: $a = 5.42 (10^{-5} \lambda) + 5.4958776$, $b = 1.38$.

Из вышеизложенного следует, что затухание из-за сухого снега больше, чем из-за мокрого снега, поэтому он рассматривается в данном исследовании.

Повышение эффективности ОКС в различных погодных условиях

На рис. 2 представлена разработанная система MIMO, использующая несколько передатчиков и приемников, которая состоит из трёх основных частей: передатчик, канал и приемник.

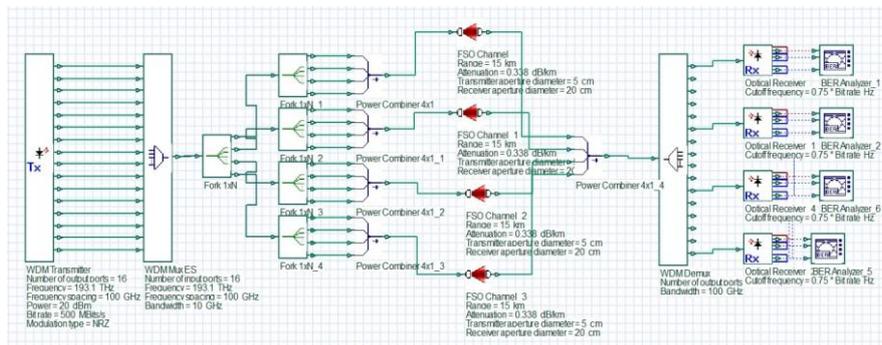


Рис. 2. MIMO

Передатчик содержит трансмиттер из 16 subsystem и мультиплексор WDM (WDM Mux), который предназначен для мультиплексирования оптических сигналов различных длин волн в один оптический канал связи. Как показано на рисунке 2, в завершении мультиплексора находится компонент, называемый разветвителем. Компонент ветвления применяется для формирования нескольких лазерных лучей из одного источника. Каждому лазерному лучу, созданному после разветвления, соответствует еще один компонент ветвления. Для увеличения мощности оптического сигнала лазерные лучи, создаваемые вторым разветвителем, комбинируются в сумматоре и передаются в канал FSO.

Мощность, используемая передатчиком, составляет 20 дБм. Частота источника света составляет 193,1 THz, а расстояние между оптическими каналами – 100 GHz. Передающая и приемная апертуры составляют 5 см и 20 см соответственно, а скорость передачи данных – 500 Мбит/с.

Канал FSO состоит из 4×4 MIMO технологии, с различным затуханием в зависимости от погодных условий. Принимающая часть состоит из:

- ◆ Сумматор мощности используется для интеграции передаваемых оптических сигналов и затем вводится в демультиплексор WDM DE, после чего начинается процесс демультиплексирования. Далее сигнал поступает на оптический приемник.

- ◆ Анализатор BER используется для вычисления коэффициента битовых ошибок принятого сигнала.

Коэффициент качества принимаемого сигнала рассчитывается при различных погодных условиях путем изменения расстояния между передающей и принимающей станциями. Коэффициент качества связан с BER, как показано в уравнении (9):

$$BER = \frac{\exp(-Q^2/2)}{Q\sqrt{2\pi}}, \quad (9)$$

где BER, обозначает коэффициент битовых ошибок принятого сигнала, Q, коэффициент качества принимаемого сигнала.

Модель была верифицирована с помощью симулятора Optisystem [19]. Предложенная система также сравнивается с обычной системой DWDM-SISO с учетом атмосферной турбулентности при различных погодных условиях [20, 21]. Стоит отметить, что в исследовании также рассматриваются значения ниже минимального коэффициента качества (МКК) (которые ниже 6), а значения BER выше 10^{-9} которые указывают на неэффективность оптической системы.

Производительность ОКС в условиях ясной погоды и тумана. Рассматривается влияние погодных условий ясного неба и тумана на производительность системы DWDM-SISO и системы DWDM-MIMO.

В данном исследовании использовалась математическая модель для расчета затухания на основе различных диапазонов видимости (формула 5). При ясном небе видимость составляет более 10 км, что соответствует затуханию 0,338 дБ/км. При легком тумане видимость составляет $(0,5 > v > 10)$ км, что соответствует затуханию 7,743 дБ/км. Для умеренного тумана видимость составляет $(0,05 > v > 0,5)$ км, что соответствует затуханию 26 дБ/км. Для густого тумана видимость $(v > 0,05)$ км, что соответствует затуханию 260 дБ/км.

Учитывая рассчитанные значения затухания для ясного неба и различных условий тумана, симулятор Optisystem рассчитывает коэффициенты качества на основе различных длин путей передачи. На рисунке 3 представлены графики зависимости коэффициента качества от расстояния при использовании: (а) системы DWDM-SISO и (б) системы DWDM-MIMO в условиях ясного неба и тумана. Результаты моделирования:

- ◆ **Затухание в чистом небе 0,338 дБ/км**

В традиционной системе DWDM-SISO МКК достигается на расстоянии 4728м, а в предлагаемой системе DWDM-MIMO МКК достигается на расстоянии 14334м.

- ◆ **Затухание при легком тумане 7,743 дБ/км**

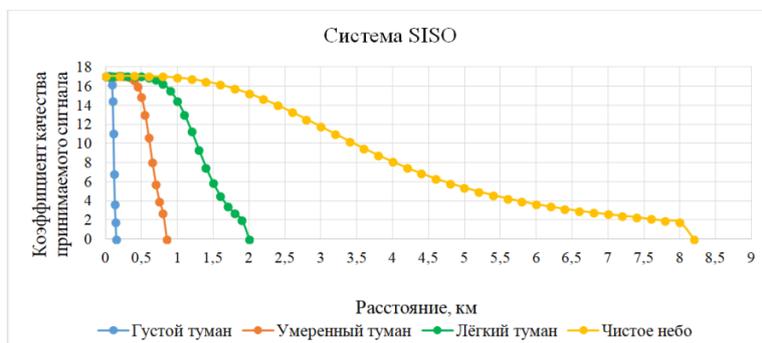
В традиционной системе DWDM-SISO МКК достигается на расстоянии 1490м, а в предлагаемой системе DWDM-MIMO МКК достигается на расстоянии 2553м.

- ◆ **Затухание при умеренном тумане 26 дБ/км**

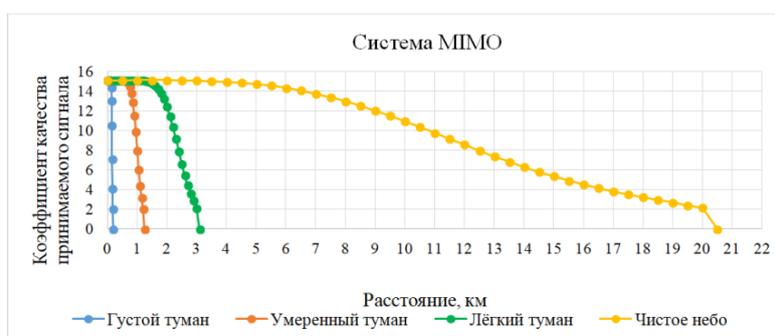
В традиционной системе DWDM-SISO МКК достигается на расстоянии 691м, а в предлагаемой системе DWDM-MIMO МКК достигается на расстоянии 1051м.

- ◆ **Затухание в густом тумане 260 дБ/км**

В традиционной системе DWDM-SISO МКК достигается на расстоянии 122м, а в предлагаемой системе DWDM-MIMO МКК достигается на расстоянии 163м. Это означает, что система MIMO увеличивает на 33,60% длины пути передачи.



а



б

Рис. 3. Зависимость коэффициента качества от расстояния при использовании: а – системы DWDM-SISO и б – системы DWDM-MIMO в условиях ясного неба и тумана

Производительность ОКС в условиях дождливой погоды. Рассматривается производительность традиционной системы DWDM-SISO и предложенной системы DWDM-MIMO в трех случаях дождливой погоды (легкий, средний и сильный дождь). Затухание в этих случаях может быть измерено в соответствии с формулой 7, которые зависят от интенсивности дождя и длины волны передаваемого оптического сигнала. Средняя скорость дождя для этих случаев составляет 2,5мм/ч, 12,5мм/ч и 25мм/ч, при легком, среднем и сильном дожде, соответственно [17]. Следовательно, затухание для этих случаев составляет 1,988 дБ/км при легком дожде, 5,8444 дБ/км при среднем дожде и 9,29 дБ/км при сильном дожде.

Учитывая рассчитанные значения затухания для различных условий дождя, симулятор Optisystem позволяет рассчитать коэффициенты качества на основе различных длин путей передачи. На рис. 4 представлены графики зависимости коэффициента качества от расстояния передачи при использовании: (а) системы DWDM-SISO и (б) системы DWDM-MIMO в условиях дождя.

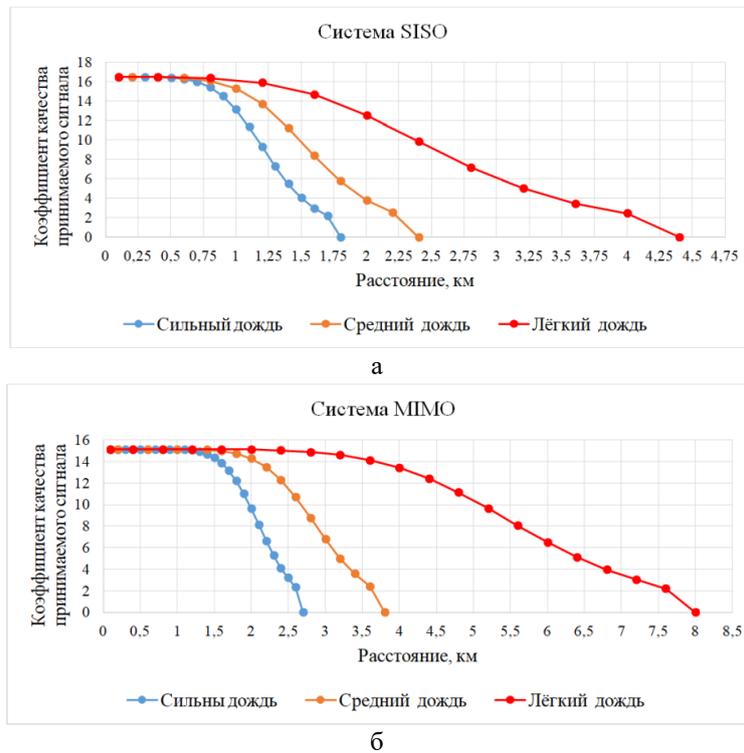


Рис. 4. Зависимость коэффициента качества от расстояния передачи при использовании: а – системы DWDM-SISO и б – системы DWDM-MIMO в условиях дождливой погоды

Результаты моделирования:

◆ **Затухание при слабом дожде 1,988 дБ/км.**

В традиционной системе DWDM-SISO МКК достигается на расстоянии 3021м, а в предлагаемой системе DWDM-MIMO МКК достигается на расстоянии 6140м.

◆ **Затухание при среднем дожде 5,8444 дБ/км**

В традиционной системе DWDM-SISO МКК достигается на расстоянии 1782м, а в предлагаемой системе DWDM-MIMO МКК достигается на расстоянии 3086м.

◆ **Затухание при сильном дожде 9,29 дБ/км**

В традиционной системе DWDM-SISO МКК достигается на расстоянии 1371м, а в предлагаемой системе DWDM-MIMO МКК достигается на расстоянии 2247м,

Это означает, что система MIMO увеличивает на 63,89% длины пути передачи.

Производительность ОКС в условиях сухой снежной погоды. Оцениваются характеристики системы DWDM-SISO и предложенной системы DWDM-MIMO в трех случаях погодных условий с сухим снегом. Затухание сухого снега рассчитывается на основе уравнения 8, которое зависит от скорости снега (S). В данном исследовании рассматриваются три типа условий сухого снега: легкий, средний и сильный, которые определяются на основе средней скорости снега. При легком

сухом снеге скорость снега составляет 2,5мм/час, при среднем сухом снеге скорость снега составляет 5мм/час, а при сильном сухом снеге скорость снега составляет 10мм/час [17].

Исходя из уравнения 8 и используя скорость снега, значения затухания для условий сухого снега составляют 19,356 дБ/км, 50,654 дБ/км, 131,835 дБ/км для легкого, среднего и сильного сухого снега соответственно.

Учитывая рассчитанные значения затухания для различных условий сухого снега, симулятор Optisystem используется для расчета коэффициента качества на основе различных длин путей передачи. На рисунке 5 представлены графики зависимости коэффициента качества от длины пути передачи с использованием: (а) системы DWDM-SISO и (б) системы DWDM-MIMO в условиях снежной погоды. Результаты моделирования:

◆ **Затухание при легком сухом снеге 19,356 дБ/км.**

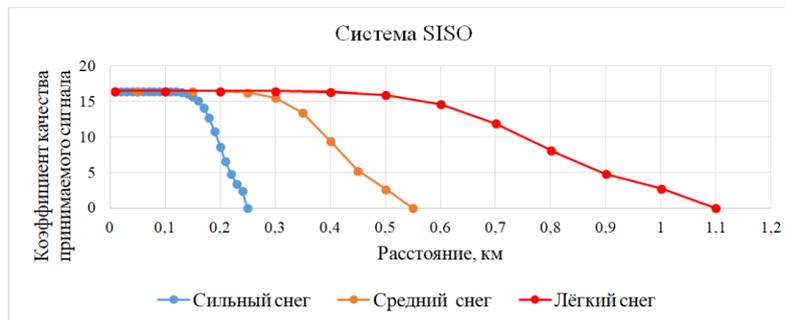
В традиционной системе DWDM-SISO МКК достигается на расстоянии 684м, а в предлагаемой системе DWDM-MIMO МКК достигается на расстоянии 1316м.

◆ **Затухание при среднем сухом снеге 50,654 дБ/км**

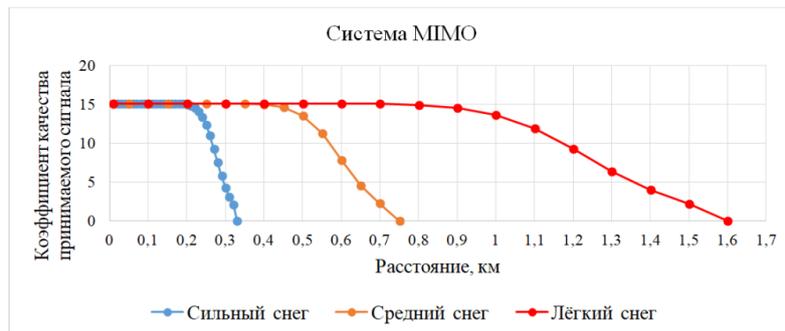
В традиционной системе DWDM-SISO МКК достигается на расстоянии 440м, а в предлагаемой системе DWDM-MIMO МКК достигается на расстоянии 627м.

◆ **Затухание при сильном сухом снеге 131,835 дБ/км**

В традиционной системе DWDM-SISO МКК достигается на расстоянии 213м, а в предлагаемой системе DWDM-MIMO МКК достигается на расстоянии 288м. Это означает, что система MIMO увеличивает на 35,21% длину пути передачи.



а



б

Рис. 5. Зависимость коэффициента качества от длины пути передачи с использованием: а – системы DWDM-SISO и б – системы DWDM-MIMO в условиях снежной погоды

Полученные результаты представлена в табл. 1, которая демонстрирует значительное улучшение использования предлагаемой системы по сравнению с традиционной системой DWDM-SISO для системы оптической связи. Результаты показывают, что коэффициент качества уменьшается, когда длина пути передачи увеличивается из-за затухания. Однако, используя предложенную систему, сигнал может передаваться на большую длину с лучшим качеством при всех описанных погодных условиях. Это достигается за счет использования техники MIMO. Используемая технология MIMO создает избыточные пути передачи, которые помогают преодолеть препятствие, а DWDM увеличивает масштабируемость количества передаваемых сигналов.

Таблица 1

Сравнение системы DWDM-SISO и DWDM-MIMO при максимальной длине передачи, при различных погодных условиях

Погодные условия	SISO, м	MIMO, м	Улучшение на %
Чистое небо	4728	14334	+203,17%
Легкий туман	1490	2553	+71,34%
Умеренный туман	691	1051	+52,09%
Густой туман	122	163	+33,6%
Легкий дождь	3021	6140	+103,24%
Средний дождь	1782	3086	+73,17%
Сильный дождь	1371	2247	+63,89%
Легкий снег	864	1316	+52,31%
Средний снег	440	627	+42,5%
Сильный снег	213	288	+35,21%

Заключение. Несмотря на то, что система связи FSO имеет основные преимущества, включая высокую скорость передачи данных, безопасность и пропускную способность, она страдает от проблем, в основном из-за различных погодных факторов. В данной работе представлена реализация и моделирование традиционной системы DWDM-SISO и гибридной системы DWDM-MIMO. Каждая система тестируется в различных погодных условиях, таких как ясное небо и различные условия тумана, различные условия дождя и различные условия сухого снега. Результаты системы MIMO, показывают улучшение дальности передачи и качества сигнала по сравнению с системой SISO отражены в табл. 1. Учитывая наихудшие погодные условия, вызывающие высокое затухание, длина пути: при затухании в сильном тумане 260дБ/км увеличивается на 33,6%; при затухании в сильном дожде 9,29дБ/км увеличивается на 63,89%; при затухании в условиях сильного сухого снега 131,835дБ/км увеличивается на 35,21%. Стоит выделить преимущество предлагаемой системы. Она может применяться в местах с суровыми погодными условиями, такими как сильный туман, проливной дождь, снег и пыльные бури.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Mohammad A.B.* Optimization of FSO System in Tropical Weather Using Multiple Beams // Proc. of International Conf. on IEEE Photonics (ICP). – 2014. – P. 109-112.
2. *Ефимова Ю.И., Проценко Э.В., Роменский М.В., Унру П.П.* Беспроводная оптическая связь в ультрафиолетовом С-диапазоне // Modern science. – 2021. – № 4-1. – С. 445-450.

3. Поллер Б.В., Бритвин А.В., Никитенко Н.С., Щетинин Ю.И. Атмосферные ультрафиолетовые линии связи. Методы построения и характеристики // XXV международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». – Новосибирск, 2019. – С. В261-В264.
4. Ahmed A., Singh A., Singh A., and Kaur S. Performance Analysis of WDM-MIMO Free Space Optical System Under Atmospheric Turbulence // Proc. of International Conf. on Signal Processing and Integrated Networks. – 2019. – P. 820-825.
5. Mahlobogwane Z., Owolawi P. A., and Sokoya O. Multiple Wavelength Propagation in Free Space Optical Wireless Channel // Proc. of International Conf. on Advances in Big Data Computing and Data Communication Systems (icABCD). – 2018. – P. 1-6.
6. Al-Gailani S.A., Mohammad A.B., and Shaddad R.Q. Enhancement of Free Space Optical Link in Heavy Rain Attenuation Using Multiple Beam Concept // Optik (Stuttg). – 2013. – Vol. 124, No. 21. – P. 4798-4801.
7. Noor N.H.M., Naji A.W., and Al-Khateeb W. Performance Analysis of a Free Space Optics Link With Multiple Transmitters/Receivers // IUJ Engineering Journal. – 2012. – Vol. 13, No. 1. – P. 49-58.
8. Kashani F.D., Mahzoun M.R., and Ghafary B. Beam Propagation Analysis of a Multi Beam FSO System With Partially Flat-topped Laser Beams in Turbulent Atmosphere // Optik (Stuttg). – 2012. – Vol. 123, No. 10. – P. 879-886.
9. Manea V., Petre M., Pusocoi S., and Stoichescu D.A. The Approach of Wavelength Dense Multiplexing Using Free Space Optical Systems // Proc. of International Conf. on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI). – 2016. – P. 1-6.
10. Bloom S., Korevaar E., Schuster J., and Willebrand H. Understanding the Performance of Free-space Optics // Journal of Optical Networking. – 2003. – Vol. 2, No. 6. – P. 178-200.
11. Awan M.S., Leitgeb E., Muhammad S.S., Nadeem F., Khan M.S., and Capsoni C. Distribution Function for Continental and Maritime Fog Environments for Optical Wireless Communication // Proc. of International Conf. on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing. – 2008. – P. 260-264.
12. Nadeem F., Kvicera V., Awan M. S., Leitgeb E., Muhammad S. S., and Kandus G. Weather Effects on Hybrid FSO/RF Communication Link // IEEE Journal on Selected Areas Communication. – 2009. – Vol. 27, No. 9. – P. 1687-1697.
13. Nadeem F., Leitgeb E., Awan M.S., and Kandus G. Optical Wavelengths Comparison for Different Weather Conditions // Proc. of International Conf. on Satellite and Space Communications. – 2009. – P. 279-283.
14. Alkholidi A. and Altowij K. Effect of Clear Atmospheric Turbulence on Quality of Free Space Optical Communications in Western Asia // Optical Communication System. – 2012. – P. 41.
15. Achour M. Simulating Atmospheric Free-Space Optical Propagation: Rainfall Attenuation // In Free-Space Laser Communication Technologies. – 2002. – XIV, Vol. 4635. – P. 192-201.
16. Carbonneau T.H. and Wisely D.R. Opportunities and Challenges for Optical Wireless: The Competitive Advantage of Free Space Telecommunications Links in Today's Crowded Marketplace // In Wireless Technologies and Systems: Millimeter-Wave and Optical. – 1998. – Vol. 3232. – P. 119-128.
17. Akiba M., Ogawa K., Wakamori K., Kodate K., and Ito S. Measurement and Simulation of the Effect of Snowfall on Free-space Optical Propagation // Applied Optics. – 2008. – Vol. 47, No. 31. – P. 5736-5743.
18. Awan M.S. Statistical-dynamical Channel Modeling of Outdoor Optical Wireless Links, 2010.
19. Электронный ресурс: OptiSystem – Getting Started: Optical Communication System Design Software, Version 12. – URL: <https://optiwave.com/?wpdmdl=157>.
20. Murdas I. A. and Abbas Y. K. Design and Simulation of WDM-UWB Based OWC System // Journal of University of Babylon. – 2016. – Vol. 24, No. 4. – P. 893-906.
21. Горбунов А.В., Зачиняев Ю.В., Плёнкин А.П. Проектирование защищённых оптических телекоммуникационных систем. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – 126 с.

REFERENCES

1. *Mohammad A.B.* Optimization of FSO System in Tropical Weather Using Multiple Beams, *Proc. of International Conf. on IEEE Photonics (ICP)*, 2014, pp. 109-112.
2. *Efimova Yu.I., Proshchenok E.V., Romenskiy M.V. Unru P.P.* Besprovodnaya opticheskaya svyaz' v ul'traioletovom S-diapazone [Wireless optical communication in the ultraviolet C-band], *Modern science*, 2021, No. 4-1, pp. 445-450.
3. *Poller B.V., Britvin A.V. Nikitenko N.S., Shchetinin Yu.I.* Atmosferye ul'traioletovye linii svyazi. Metody postroeniya i kharakteristiki [Atmospheric ultraviolet communication lines. Methods of construction and characteristics], *XXV mezhdunarodnyy simpozium «Optika atmosfery i okeana. Fizika atmosfery» [XXV International Symposium "Optics of the atmosphere and ocean. Physics of the atmosphere"]*. Novosibirsk, 2019, pp. V261-V264.
4. *Ahmed A., Singh A., Singh A., and Kaur S.* Performance Analysis of WDM-MIMO Free Space Optical System Under Atmospheric Turbulence, *Proc. of International Conf. on Signal Processing and Integrated Networks*, 2019, pp. 820-825.
5. *Mahlobogwane Z., Owolawi P. A., and Sokoya O.* Multiple Wavelength Propagation in Free Space Optical Wireless Channel, *Proc. of International Conf. on Advances in Big Data Computing and Data Communication Systems (icABCD)*, 2018, pp. 1-6.
6. *Al-Gailani S.A., Mohammad A.B., and Shaddad R.Q.* Enhancement of Free Space Optical Link in Heavy Rain Attenuation Using Multiple Beam Concept, *Optik (Stuttg)*, 2013, Vol. 124, No. 21, pp. 4798-4801.
7. *Noor N.H.M., Naji A.W., and Al-Khateeb W.* Performance Analysis of a Free Space Optics Link With Multiple Transmitters/Receivers, *IJUM Engineering Journal*, 2012, Vol. 13, No. 1, pp. 49-58.
8. *Kashani F.D., Mahzoun M.R., and Ghafary B.* Beam Propagation Analysis of a Multi Beam FSO System With Partially Flat-topped Laser Beams in Turbulent Atmosphere, *Optik (Stuttg)*, 2012, Vol. 123, No. 10, pp. 879-886.
9. *Manea V., Petre M., Puscoci S., and Stoichescu D.A.* The Approach of Wavelength Dense Multiplexing Using Free Space Optical Systems, *Proc. of International Conf. on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, 2016, pp. 1-6.
10. *Bloom S., Korevaar E., Schuster J., and Willebrand H.* Understanding the Performance of Free-space Optics, *Journal of Optical Networking*, 2003, Vol. 2, No. 6, pp. 178-200.
11. *Awan M.S., Leitgeb E., Muhammad S.S., Nadeem F., Khan M.S., and Capsoni C.* Distribution Function for Continental and Maritime Fog Environments for Optical Wireless Communication, *Proc. of International Conf. on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing*, 2008, pp. 260-264.
12. *Nadeem F., Kvicera V., Awan M. S., Leitgeb E., Muhammad S. S., and Kandus G.* Weather Effects on Hybrid FSO/RF Communication Link, *IEEE Journal on Selected Areas Communication*, 2009, Vol. 27, No. 9, pp. 1687-1697.
13. *Nadeem F., Leitgeb E., Awan M.S., and Kandus G.* Optical Wavelengths Comparison for Different Weather Conditions, *Proc. of International Conf. on Satellite and Space Communications*, 2009, pp. 279-283.
14. *Alkholidi A. and Altowij K.* Effect of Clear Atmospheric Turbulence on Quality of Free Space Optical Communications in Western Asia, *Optical Communication System*, 2012, pp. 41.
15. *Achour M.* Simulating Atmospheric Free-Space Optical Propagation: Rainfall Attenuation, *In Free-Space Laser Communication Technologies*, 2002, XIV, Vol. 4635, pp. 192-201.
16. *Carbonneau T.H. and Wisely D.R.* Opportunities and Challenges for Optical Wireless: The Competitive Advantage of Free Space Telecommunications Links in Today's Crowded Marketplace, *In Wireless Technologies and Systems: Millimeter-Wave and Optical*, 1998, Vol. 3232, pp. 119-128.
17. *Akiba M., Ogawa K., Wakamori K., Kodate K., and Ito S.* Measurement and Simulation of the Effect of Snowfall on Free-space Optical Propagation, *Applied Optics*, 2008, Vol. 47, No. 31, pp. 5736-5743.
18. *Awan M.S.* Statistical-dynamical Channel Modeling of Outdoor Optical Wireless Links, 2010.
19. Электронный ресурс: OptiSystem – Getting Started: Optical Communication System Design Software, Version 12. Available at: <https://optiwave.com/?wpdmdl=157>.

20. *Murdas I. A. and Abbas Y. K.* Design and Simulation of WDM-UWB Based OWC System, *Jurnal of University of Babylon*, 2016, Vol. 24, No. 4, pp. 893-906.
21. *Горбунов А.В., Зачиняев Ю.В., Плёткин А.П.* Проектирование защищённых оптических телекоммуникационных систем. Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019, 126 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., в.н.с. М.Ю. Медведев

Жилин Сергей Викторович – Южный федеральный университет; e-mail: szhilin@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра вычислительной техники; магистрант.

Архипенко Владимир Владимирович – e-mail: arkhipenko@sfedu.ru; кафедра вычислительной техники; магистрант.

Басан Елена Сергеевна – e-mail: ebasan@sfedu.ru; кафедра безопасности информационных технологий; к.т.н.; доцент.

Поленов Максим Юрьевич – e-mail: mypolenov@sfedu.ru; тел.: 88634371550; кафедра вычислительной техники; к.т.н.; доцент.

Zhilin Sergey Viktorovich – Southern Federal University; e-mail: szhilin@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the department of computer engineering; master's student.

Arkhipenko Vladimir Vladimirovich – e-mail: arkhipenko@sfedu.ru; the department of computer engineering; master's student.

Basan Elena Sergeevna – e-mail: ebasan@sfedu.ru; the department of information technology security; cand. of eng. sc.; associate professor.

Polenov Maxim Yuryevich – e-mail: mypolenov@sfedu.ru; phone: +78634371550; the department of computer engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.375.9

DOI 10.18522/2311-3103-2022-2-126-135

Н.Н. Прокопенко, В.Е. Чумаков, А.В. Бугакова, А.Е. Титов

ОСОБЕННОСТИ СХЕМОТЕХНИКИ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА КОМПЛЕМЕНТАРНЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ С УПРАВЛЯЮЩИМ PN-ПЕРЕХОДОМ*

Систематическая составляющая напряжения смещения нуля ($U_{см}$) двухкаскадных ВЛТ и CMOS операционных усилителей (ОУ) с классической архитектурой существенно зависит от численных значений (отличия от единицы) коэффициента передачи по току ($K_i \approx 1$) применяемых токовых зеркал (ТЗ). На данный параметр ТЗ оказывает также влияние напряжения Эрли их доминирующих активных компонентов. Поэтому, токовые JFET зеркала являются сегодня слабым звеном в современной JFET аналоговой схемотехнике и их нецелесообразно применять в структуре JFET ОУ. В статье поставлена и решена задача об условиях исключения ТЗ в ОУ на основе полевых транзисторов с управляющим pn-переходом для случая, когда необходимо получить малое значение $U_{см}$. Предлагаются варианты практических схем входных (ВК) и промежуточных (ПК) каскадов микроэлектронных операционных усилителей на комплементарных полевых транзисторах с управляющим pn-переходом (CJFET). Их основная особенность – отсутствие токового зеркала, которое при реализации на CJFET отрицательно влияет на основные параметры ОУ по систематической составляющей напряжения смещения нуля, коэффициентам ослабления входного синфазного сигнала и подавления помех по шинам питания. В этой связи перспективны схемы ВК и ПК, которые не используют данный CJFET функциональный узел. Приведены схемы операционных усилителей на основе разработанных ВК с разомкнутым коэффициентом усиления более 80 дБ и систематической составляющей напряжения смещения нуля в

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-29-00637).