

УДК 004.716

DOI: [10.26102/2310-6018/2024.44.1.032](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.44.1.032)

Разработка гибридной атмосферно-подводной оптической системы связи

Мохаммад Фуркан Али✉, В.М. Саклаков

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Российская Федерация*

Резюме. Подводные оптические беспроводные коммуникации являются перспективными беспроводными носителями данных для обеспечения подводной деятельности, ориентированной на использование беспроводных систем 5G и выше (5GB). Основными проблемами для развертывания подводных приложений являются физико-химические свойства и сильная турбулентность в канале трансляции. В связи с этим в настоящей работе проводится анализ сквозной производительности гибридной системы атмосферного канала связи (FSO) и подводной беспроводной связи в видимом свете (UVLC) при модуляции интенсивности или прямого обнаружения (IM/DD) в методе с учетом схемы амплитудно-импульсной модуляции (PAM). В ходе данного исследования для решения проблем, связанных с условиями канала с умеренной и сильной турбулентностью используется модель замираний с распределением Гамма-Гамма (GG), а линии связи проектируются путем объединения моделирования плоских волн в соответствующие звенья. Предлагаемые методы работы обеспечивают более высокую достижимую скорость передачи данных с минимальной задержкой отклика, а также улучшает сетевую связь в сценариях мониторинга в реальном времени по сравнению с традиционными технологиями подводной беспроводной связи. Результаты моделирования позволяют достоверно оценить такие показатели производительности системы, как среднее значение частоты битовых ошибок (ABER) и вероятность сбоя (P_{out}) при наличии ошибок наведения. Наконец, в данной работе используется подход Монте-Карло для наилучшей подгонки кривых и подтверждается численное выражение результатами моделирования.

Ключевые слова: Сети 5G и 5GB, кооперативная связь, оптическая связь, подводная связь, подводные сенсорные сети (USNs), световая связь VLC.

Благодарности: работа выполнена в рамках Программы повышения конкурентоспособности Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия.

Для цитирования: Али М. Фуркан, Саклаков В.М. Разработка гибридной подводной оптической системы связи. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024;12(1). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1468> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.44.1.032

Development of hybrid atmospheric-underwater optical communication system

Mohammad Furqan Ali✉, V.M. Saklakov

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, the Russian Federation

Abstract. Underwater optical wireless communications are promising and future-oriented wireless carriers to support underwater activities focused on 5G and beyond (5GB) wireless systems. The main challenges for the deployment of underwater applications are the physicochemical properties and strong turbulence in the transmission channel. Therefore, this paper analyzes the end-to-end performance of a hybrid free space optics (FSO) and underwater wireless visible light communication (UVLC) system under intensity modulation or direct detection (IM/DD) in a method considering a pulse amplitude modulation (PAM) scheme. In this study, a fading model with Gamma-Gamma (GG) distribution is used to deal with channel conditions with moderate and strong turbulence, and the links are designed by

combining plane wave modeling in the corresponding links, respectively. The proposed performance methods excel in higher achievable data rates with minimal delay response and improves network connectivity in real-time monitoring scenarios compared to conventional underwater wireless communication techniques. The simulation results provide reliable estimates of system performance metrics such as average bit error rate (ABER) and probability of failure (Pout) in the presence of pointing errors. Finally, this paper uses a Monte Carlo approach for best curve fitting and validate the numerical expression with simulation results.

Keywords: 5G and 5GB networks, cooperative communication, optical communication, underwater communication, underwater sensor networks (USNs), VLC light communication.

Acknowledgements: this research was funded as part of the Competitiveness Enhancement Program of National Research Tomsk Polytechnic University, Russia.

For citation: Ali M. Furqan, Saklakov V.M., Development of hybrid underwater optical communication system. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(1). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1468> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.44.1.032 (In Russ.).

Введение

Оптические сигналы рассматриваются в качестве альтернативных потенциальных беспроводных носителей в различных сценариях гибридной связи, таких как передача сигналов внутри / вне помещений [1], спутниковая связь [2], системы «воздух-земля» [3] и гибридная подводная распределенная связь в системе «берег-суша» [4]. Наиболее значительными преимуществами оптических коммуникаций являются низкая стоимость, нелицензируемый спектр частот, простота развертывания в сложных каналах и широкая роль в качестве беспроводных носителей с высокой связностью и низкой задержкой [5]. Тем не менее, ухудшение качества канала из-за сильной турбулентности и несоосности приемопередатчиков являются решающими факторами затухания сигнала в оптической связи. Благодаря высокому качеству линии атмосферного канала связи (FSO) и связи в видимом свете (VLC) являются перспективными каналами связи в задачах исследования океана. Следует отметить, что многочисленные флуктуации происходят в основном в водных средах, таких как океаны. Океаны – это чрезвычайно глубокие и обширные водные резервуары со случайными и достаточно разнородными физико-химическими свойствами молекул воды. Уникальность океанической среды существенно усложняет задачу организации каналов связи. Поэтому океаны, как правило, являются сложной средой для развертывания беспроводных систем связи по сравнению с наземными линиями связи.

Высокоскоростная подводная связь, имеющая минимальные задержки в передаче сигнала очень важна для распределенных подводных объектов (DUO) или подводных беспроводных сенсорных сетей (UWSNs). Однако электромагнитные волны (ЭМ) страдают от высокого затухания, частотной дисперсии, и многолучевые замирания под водой [6]. Кроме того, электромагнитные волны требуют больших размеров антенны и энергоемких приемопередатчиков. С другой стороны, акустические волны широко используются в качестве беспроводных носителей для передачи данных на большие расстояния. Тем не менее, акустические волны хоть передают данные со скоростью несколько Кбит/с, однако обладают высокой задержкой и узкой полосой пропускания из-за ограниченной скорости распространения (1500 м/с) [7]. Соединение WSNs или DOUs с прибрежными базовыми станциями является важной задачей для обеспечения связи на больших расстояниях.

Исследовательский вклад авторов

Исходя из описанной выше проблемной ситуации проводилось моделирование системы поддержки интересов человека в исследовании подводной среды, таких как формирование зон роуминга для наблюдения за прибрежными районами, погрузки и разгрузки товаров в морских портах, а также для построения связи между подводными узлами и морскими / береговыми базовыми станциями.

Разработка ориентирована на поддержку извлечения сигнала в системе гибридной оптической связи в различных типах подводных сред. Результаты исследования демонстрируют повышение эффективности подводных оптических линий связи. Так же были рассмотрены характеристики гибридной оптической системы связи для соединения узлов связи береговой зоны с DUO в целях содействия географического картирования или сбора батиметрических данных для мелководных и прибрежных водохранилищ. Таким образом, предложенная модель системы применима для морских портов, соединяющая малые острова при передаче данных в реальном времени.

Важная роль работы состоит в инновационном подходе к архитектуре системы связи, заключающемся в более высокой технике модуляции для различных подводных беспроводных оптических сенсорных сетей. В работе аналитически выводятся метрики сквозной производительности (ABER и BER) системы FSO-UVLC при ухудшении условий эксплуатации.

Рассматривается модель системы FSO-UVLC с модуляцией на стороне промежуточных узлов связи (SIM) на основе протокола декодирования и переадресации (DF-протокола) оптической сигнализации. Каналы моделируются с учетом независимых, но не обязательно идентично распределенных сигналов GG-замирания.

Поглощение, рассеяние и физико-химические свойства в двух разных каналах являются основными факторами, влияющими на сцинтилляционный индекс. В связи с этим изменение сцинтилляционного индекса под влиянием сильной турбулентности, мелкомасштабных и крупномасштабных параметров существенно отличается. Оно рассматривается как модель плоской волны с использованием модели спектра турбулентности.

Представлено новое аналитическое выражение статистических характеристик для отношения сигнал-шум (SNR). Также исследуется выражение в закрытой форме для условий каналов FSO и VLC в терминах функции плотности вероятности (PDF) и функции кумулятивной плотности (CDF) с учетом SNR. Кроме того, показатели отказов ABER для всей системы получены с использованием статистики канала. Далее, результаты моделирования выполняются и сверяются с теоретическими результатами с помощью расширенной двумерной G-функции Майера (EBMGF) и метода Монте-Карло.

Предлагаемая модель системы

В предлагаемой модели системы сигналы передаются от базовой станции s (наземная базовая станция) с помощью DF-протокола r через плавучий буй к подводному пункту назначения (получатель d). Сигналы передаются между береговой базовой станцией и ретранслятором через FSO, а ретранслятор связывается с подводным пунктом назначения через канал VLC. Следует отметить, что полученная копия сигнала на ретрансляторе перекодируется в формат VLC и затем передается на распределенный подводный объект. Более того, ретранслятор оснащен двунаправленными антеннами: одна антенна установлена в направлении береговой базовой станции для приема сигнала по FSO-каналу, другая установлена по направлению к месту назначения и отвечает за передачу информации на DUO. Вся система связи работает в полнодуплексном режиме и изображена на Рисунке 1.

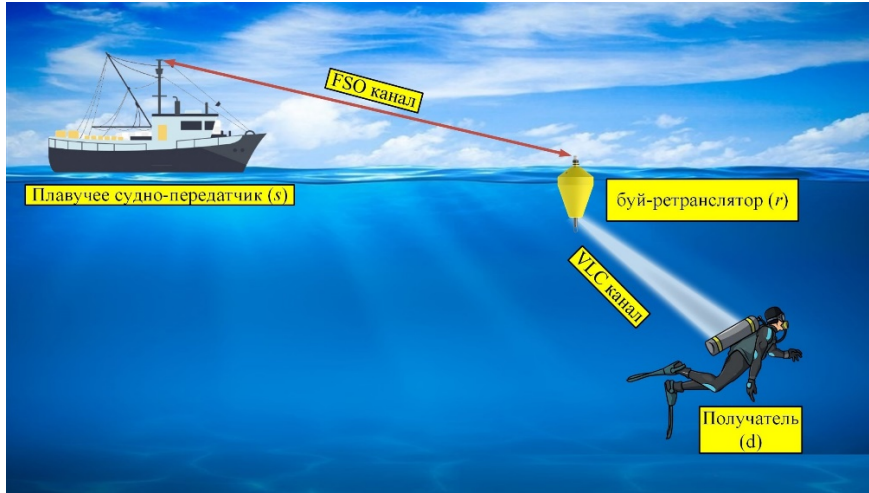


Рисунок 1 – Гибридная регенеративная ретрансляционная связь FSO-UVLC. Плавучее судно (береговая базовая станция) связывается с распределенным подводным объектом (DUO)
Figure 1 – FSO-UVLC hybrid regenerative relay communication where a floating vessel (shore base station) communicates with a distributed underwater object (DUO)

При моделировании оптических линий связи учитываются относительные свойства узлов связи: эффективность преобразования сигнала и чувствительность приемника. Береговая базовая станция передает информационный символ x с мощностью сигнала P_s в направлении ретранслятора. Информация принимается плавающим узлом и модулируется по PAM-схеме, которая может быть выражена как:

$$y_{sr} = \sqrt{P_s} \eta_{sr} R_{sr} h_{sr} x + n_{sr}, \quad (1)$$

где h_{sr} – коэффициент усиления FSO-канала, а n_{sr} представляет собой аддитивный белый гауссовский шум (AWGN) с нулевым средним и σ_{sr}^2 дисперсией $s-r$. η_{sr} и R_{sr} обозначаются как эффективность преобразования оптического сигнала в электрический и чувствительность приемника-фотодетектора узла ретрансляции, соответственно. Протокол ретрансляции декодирует полученный информационный символ и повторно модулирует исходную информацию в формат VLC как \bar{x} , и передает в направлении DUO по схеме амплитудно-импульсной модуляции. Полученный DUO сигнал имеет вид:

$$y_{rd} = \sqrt{P_r} \eta_{rd} R_{rd} h_{rd} \bar{x} + n_{rd}, \quad (2)$$

где h_{rd} и P_r обозначают коэффициент усиления канала VLC и мощность оптического сигнала ретрансляционного узла. Далее представлены: эффективность преобразования электрического сигнала в оптический η_{rd} , чувствительность фотодиода приемника R_{rd} , комплексный аддитивный белый гауссов шум (AWGN) – n_{rd} , с нулевым средним и дисперсией σ_{rd}^2 . Кроме того, комбинированное состояние канала для обоих каналов обозначается h_{mn} . Мгновенное отношение сигнал-шум (SNR) для обоих каналов $s-r$ и $r-d$ задается формулой $\gamma_{mn} = E |h_{mn}|^2 \bar{\gamma}_{mn}$, здесь средний электрический SNR определяется как $\bar{\gamma}_{mn} = P_{mn} \eta_{mn}^2 r_{mn}^2 / \sigma_{mn}^2$. Дополнительно m, n представляются $s-r$ и $r-d$ связями с $m, n \in (s, r, d)$.

Модель статистических условий канала

В исследовании обе линии связи являются оптическими, для них рассматривается возможность почти одинаковых ухудшений условий канала связи в надводной и

подводной сред. Условия канала ухудшаются, исходя из коэффициентов потерь в пути h_{lmn} , турбулентности канала h_{imn} и рассогласования приемопередатчиков h_{pmn} . Комбинированный нормированный коэффициент затухания сигнала h_{mn} для обоих каналов формулируется как [8]:

$$h_{mn} = h_{lmn} h_{pmn} h_{imn} . \quad (3)$$

Приближенный коэффициент потери траектории в канале. На FSO-канал связи непосредственно влияют условия атмосферы, вызывающие ослабление сигнала. Поэтому, в соответствии с законом Бира-Ламберта, потери в пути для FSO-канала формулируются в (4) [9] следующим образом,

$$\sigma_c(\lambda) = \left(\frac{3.912}{V}\right) \left(\frac{\lambda}{550}\right)^{-\delta} . \quad (4)$$

В (4) коэффициент экстинкции атмосферы $\sigma_c(\lambda)$ зависит от длины волны и описывается в терминах параметров канала, таких как атмосферная видимость V (в км), коэффициент распределения рассеяния δ вместе с расстоянием L между узлами s и r , соответственно [9]. Потеря пути в UVLC определяется по закону Бера-Ламберта [10]:

$$h_{pl} = 10 \log_{10} \left\{ \exp(-c(\lambda) d_t) \right\} . \quad (5)$$

А. Модель коэффициента замирования канала турбулентности. Явление турбулентности в FSO-канале возникает из-за переменного ветра, существующих взвешенных частиц и других причин ухудшения качества связи в канале. С другой стороны, в подводных условиях коэффициент затухания, вызванный турбулентностью, возникает из-за случайности температуры, плотности, солености и высокого давления. Коэффициент затухания турбулентности моделируется с учетом независимых, но не обязательно идентично распределенных случайных GG-величин. Данная работа проведена в соответствии с GG-распределением для каналов с замирающими сигналами с индуцированной турбулентностью. Выражение PDF для канала турбулентности для FSO и VLC каналов связи имеет вид [11]:

$$f_{h_{mn}}(h_{t_{mn}}) = 2 \frac{(\alpha_{mn} \beta_{mn})^{\frac{\alpha_{mn} + \beta_{mn}}{2}}}{\Gamma \alpha_{mn} \Gamma \beta_{mn}} (h_{t_{mn}})^{\frac{\alpha_{mn} + \beta_{mn} - 1}{2}} \times K_{\alpha_{mn} - \beta_{mn}} \left(2 \sqrt{\alpha_{mn} \beta_{mn} h_{t_{mn}}} \right) , \quad (6)$$

где модифицированная функция Бесселя второго рода обозначается как $K(\alpha_{mn} - \beta_{mn})(\cdot)$, крупномасштабные и мелкомасштабные параметры для обоих описываемых каналов связи обозначаются α_{mn} и β_{mn} соответственно. Отметим: FSO указана в соответствии с моделью плоской волны. Отсюда высокие коэффициенты для s - r связи (FSO-связь между базовой станцией (s) и плавучим буем (r)) могут быть записаны как [12-13]:

$$\alpha_{sr} = \left[\exp \left(\frac{0.49 \chi_{h_{sr}}^2}{\left(1 + 0.18d^2 + 0.56 \chi_{h_{sr}}^{\frac{12}{5}} \right)^{\frac{7}{6}}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (7)$$

$$\beta_{sr} = \left[\exp \left(\frac{0.51 \chi_{h_{sr}}^2}{\left(1 + 0.9d^2 + 0.62 \chi_{h_{sr}}^{\frac{12}{5}} \right)^{\frac{5}{6}}} \right) - 1 \right]^{-1} . \quad (8)$$

Для связи $s-r$ в (10) и (11) показатель сцинтилляции обозначается как $\chi_{h_{sr}}^2$, дисперсия Рытова рассчитывается как $\chi_{h_{sr}}^2 = 1.23C_n^2 k^7 L^{11/6}$. Оптическое волновое число обозначается как $k = 2\pi/\lambda$, которое зависит от длины волны передаваемого сигнала λ , и

параметр d определяется как $d = D_r \sqrt{\frac{5\pi}{\lambda z}}$, где z – расстояние распространения с диаметром апертуры приемника D_r . Показатель преломления C_n^2 изменяется от $10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$ (для режима сильной турбулентности) и до $10^{-17} \text{ м}^{-2/3}$ (для режима слабой турбулентности) с неопределенностью $10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$. Кроме того, дисперсия Рытова описывает движение крупных частиц при $\chi_{h_{sr}}^2 \gg 1$, а также частиц мелких при $\chi_{h_{sr}}^2 \ll 1$ при рассмотрении с помощью модели плоской волны. С другой стороны, для $r-d$ звена (звено UVLC) в (9) и (10), крупно- и мелкомасштабные логарифмические дисперсии α_{rd} и β_{rd} моделируются как [14, уравнение 46]:

$$\alpha_{rd} = \left[\exp \left(\frac{0.49 \chi_{h_{rd}}^2}{\left(1 + 1.11 \chi_{h_{sr}}^{\frac{12}{5}} \right)^{\frac{7}{6}}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (9) \quad \beta_{rd} = \left[\exp \left(\frac{0.51 \chi_{h_{rd}}^2}{\left(1 + 1.11 \chi_{h_{sr}}^{\frac{12}{5}} \right)^{\frac{5}{6}}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (10)$$

Сцинтилляционный индекс для связи $r-d$ моделируется с учетом плоской волны гауссова пучка и рассчитывается в (11) как в [15, уравнение 18]:

$$\chi_{h_{rd}}^2 = \frac{2\pi^2 k_0^2 d_0 C_0 \alpha^2 \varepsilon^{-1/3} \chi_T}{\omega^2} \int_0^1 \int_0^\infty \kappa^{-8/3} \left\{ 1 - \cos \left[\frac{d_0 \kappa^2}{k_0} \xi \right] \right\} \left[1 + C_1 (\kappa \eta)^{2/3} \right] (\omega^2 \exp(-A_{TS} \delta)) d\kappa d\xi \quad (11)$$

Таблица 1 – Параметры моделирования сцинтилляционного индекса, формула (11)
Table 1 – Parameters used to model the scintillation index in formula (11)

Параметр	Определение
$k_0=2\pi/\lambda$	Волновое число
λ	Длина волны оптического луча
d_0	Расстояние между получателем и передатчиком
κ	Величина пространственной частоты в модели спектра UOT
χ_T	Скорость диссипации среднеквадратичной температуры показателя преломления
χ_s	Скорость диссипации среднеквадратичной солености показателя преломления
ω	Относительная сила температуры и солености
ε	Скорость диссипации турбулентной кинетической энергии на единицу массы жидкости
η	Микромасштабная длина Колмогорова
R_T	Число Прандтля для температуры
R_S	Число Прандтля для солености
C_0 и C_1	Константы

Рассогласование (ошибка наведения). Замирание канала. Коэффициенты. Необходимо учитывать ошибку наведения в UVLC-канале из-за случайных перемещений приемопередатчиков под воздействием ветра, тепловых расширений, наклона положения ретрансляционного буя и / или приемника из-за океанских волн и водных течений. В ответ на это случайное движение коммуникационных узлов связи необходим точный механизм наведения и отслеживания для необходимого уровня качества связи в сложных условиях канала. Таким образом, коэффициент замираний при ошибке наведения $h_{p_{mn}}$ записывается для обоих каналов (FSO и VLS) [16] следующим образом:

$$h_{p_{mn}} = A_{mn} \exp\left(-\frac{2a_{mn}^2}{\Omega_{mn}^2}\right), \quad (12)$$

где A_{mn} определяет случайное радиальное смещение коммуникационных узлов (RRD).

RRD рассчитывается по $a_{mn} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}$. Далее, горизонтальная и вертикальная оси возвышения обозначаются как a_x^2 и a_y^2 , соответственно. Здесь A_{mn} – коэффициент накопленной мощности при $a_{mn} = 0$. Эквивалентная ширина луча представлена Ω_{mn} . PDF равномерной ошибки наведения выражается как [16]:

$$f_{h_{p_{mn}}}(h_p) = \frac{\zeta_{mn}^2}{A_{mn}^{\zeta_{mn}^2}} h_{p_{mn}}^{\zeta_{mn}^2 - 1}, \quad (13)$$

где $\zeta_{mn} = \Omega_{mn}/2\sigma_{mn}$ описывается как отношение эквивалентного радиуса луча и среднеквадратичного смещения отклонения (ошибка наведения) на обоих концах ретранслятора и приемника.

Аналитическое моделирование канала

Совместное влияние замираний сигнала в предлагаемой модели системы обсуждалось в предыдущих разделах. Более того, PDF агрегированных условий канала выражается в [16] следующим образом:

$$f_{\gamma_{mn}}(\gamma_{mn}) = \frac{\zeta_{mn}^2}{\psi \gamma_{mn} P_{\Gamma_{\alpha_{mn}} \Gamma_{\beta_{mn}}}} \times G_{1,3}^{3,0} \left[P_{\alpha_{mn} \beta_{mn}} \left(\frac{\gamma_{mn}}{\gamma} \right)^{1/\psi} \middle| \begin{matrix} \zeta_{mn}^2 + 1 \\ \zeta_{mn}^2, \alpha_{mn}, \beta_{mn} \end{matrix} \right], \quad (14)$$

где $\Gamma(\cdot)$ и $G(\cdot, \cdot)$ обозначаются как двойная функция Гамма и обобщенная G-функция Мейера, а $P_{\alpha_{mn} \beta_{mn}}$ – произведение крупно- и мелко масштабных факторов в обоих каналах связи. Параметр для метода обнаружения обозначается ψ . Для гетродинового обнаружения параметр обнаружения принимается равным $\psi = 1$, для прямого обнаружения $\psi = 2$, а γ_{mn} представляет собой средний электрический SNR. Следует отметить, что в данном исследовании вся работа рассматривается в рамках метода прямого оптического обнаружения. Поэтому $\psi = 2$ было принято для результатов моделирования и анализа. Однако, среднее значение SNR для обоих каналов описывается как $\bar{\gamma}_{mn} = \gamma_{mn}/E|hp_{mn} ht_{mn}|^2$.

В результате, CDF мгновенного SNR для каждого звена получено интегрированием:

$$F_{\gamma_{mn}}(\gamma_{mn}) = \int_0^{\gamma} f_{\gamma_{mn}}(\gamma) d\gamma \quad (15)$$

как при использовании [17, уравнение 24] следующим образом:

$$F_{\gamma_{mn}}(\gamma_{mn}) = \frac{\zeta_{mn}^2}{P_{\Gamma_{\alpha_{mn}}\Gamma_{\beta_{mn}}}} \times G_{2,4}^{3,1} \left[P_{\alpha_{mn}\beta_{mn}} \sqrt{\left(\frac{\gamma_{mn}}{\gamma}\right)} \middle| \zeta_{mn}^2, \alpha_{mn}, \beta_{mn}, 0 \right], \quad (16)$$

Для упрощения вышеприведенного выражения оно модифицируется путем использования G-функции Майера [18, уравнение (07.34.17.0013.01)], после чего получили (17) в виде:

$$F_{\gamma_{mn}}(\gamma_{mn}) = \frac{2^{(\alpha_{mn}+\beta_{mn}-2)} \zeta_{mn}^2}{2\pi P_{\Gamma_{\alpha_{mn}}\Gamma_{\beta_{mn}}}} \times G_{4,8}^{6,2} \left[\frac{P_{\alpha_{mn}\beta_{mn}}}{16\gamma_{mn}} \gamma_{mn} \middle| \phi_1 \right], \quad (17)$$

$$\phi_1 = \left[\frac{\zeta_{mn}^2 + 1}{2}, \frac{\zeta_{mn}^2 + 2}{2}, \frac{1}{2}, 1 \right], \quad \phi_2 = \left[\frac{\zeta_{mn}^2}{2}, \frac{\zeta_{mn}^2 + 1}{2}, \frac{\alpha_{mn}}{2}, \frac{\alpha_{mn} + 1}{2}, \frac{\beta_{mn}}{2}, \frac{\beta_{mn} + 1}{2}, 0, \frac{1}{2} \right].$$

Приведенное выражение (17) является сложным и трудно для вычисления. В дополнение к этому для дальнейшего упрощения, снова используя свойства обобщенной функции G-функции Майера [19, уравнение 07.34.03.0001.01], выражение в (17) модифицируется и выражение CDF для отдельного звена формулируется в (18) как:

$$F_{\gamma_{mn}}(\gamma_{mn}) = z_{mn} G_{3,7}^{6,1} \left[\frac{B_{mn}\gamma_{mn}}{\gamma_{mn}} \middle| \phi_{mn} \right]. \quad (18)$$

Придерживаясь параметров, использованных в (18), описываются следующим образом:

$$z_{mn} = \frac{2^{(\alpha_{mn}+\beta_{mn}-3)} \zeta_{mn}^2}{\pi P_{\Gamma_{\alpha_{mn}}\Gamma_{\beta_{mn}}}}, \quad B_{mn} = \left(\frac{P_{\alpha_{mn}\beta_{mn}}}{4} \right)^2, \quad \phi_{mn} = \left[\frac{\zeta_{mn}^2 + 2}{2}, \frac{1}{2}, 1 \right],$$

$$\kappa_{mn} = \left[\frac{\zeta_{mn}^2 + 1}{2}, \frac{\alpha_{mn}}{2}, \frac{\alpha_{mn} + 1}{2}, \frac{\beta_{mn}}{2}, \frac{\beta_{mn} + 1}{2}, 0, \frac{1}{2} \right].$$

Анализ вероятности перебоев в работе

Вероятность выхода из строя при ошибке наведения. Вероятность отказа системы формулируется, когда мгновенное значение SNR должно быть равно или ниже порогового значения SNR. Таким образом, производительность системы при простоях может быть определена следующим образом:

$$P_{out} = F_{\gamma}(\gamma) = \Pr[\min(\gamma_{sr}, \gamma_{rd}) < \gamma_{th}]. \quad (19)$$

Впоследствии для вычисления производительности перерыва в работе, заменим $F_{\gamma_{sr}}(\gamma_{sr})$ и $F_{\gamma_{sd}}(\gamma_{sd})$ в (19) на (18). Вышеприведенное математическое выражение (19) можно представить в виде

$$P_{out} = 1 - (1 - F_{\gamma_{sr}}(\gamma_{th})) (1 - F_{\gamma_{rd}}(\gamma_{th}))$$

$$= F_{\gamma_{sr}}(\gamma_{th}) + F_{\gamma_{rd}}(\gamma_{th}) - \underbrace{F_{\gamma_{sr}}(\gamma_{th}) F_{\gamma_{rd}}(\gamma_{th})}_{\phi(\gamma)}. \quad (20)$$

Следует отметить, что член $\phi(\gamma)$ включает две CDF-функции, которые являются произведением двух независимых G-функций Майера и могут быть выражены в

терминах расширенной обобщенной двумерной G-функции Майера (EGBMGF). Представление произведения двух G-функций Майера получено путем следования той же концепции, что и в [20-21]. Таким образом, произведение CDF $\phi(\gamma)$ вычисляется с помощью G-функции Майера в [19, уравнение 07.34.16.0003.01], и мы получим (20) в следующем виде:

$$\phi(\gamma) = P_{z_{sr}z_{rd}} G_{0,0;3,7;3,7}^{0,0;6,1;6,1} \left[\begin{matrix} -\left| \phi_{sr} \right| \phi_{rd} \\ -\left| \kappa_{sr} \right| \kappa_{rd} \end{matrix} \middle| B_{sr} \left(\frac{\gamma_{th}}{\gamma_{sr}} \right), B_{rd} \left(\frac{\gamma_{th}}{\gamma_{rd}} \right) \right], \quad (21)$$

где $G_{\cdot, \cdot; \cdot, \cdot; \cdot, \cdot}^{0, \cdot; \cdot, \cdot; \cdot, \cdot}(\cdot | \cdot | \cdot, \cdot)$ обозначается как EGBMGF, а $P_{z_{sr}z_{rd}}$ – это произведение z_{sr} и z_{rd} , которые указаны в (18). Произведение CDF получено по (21), далее подставим (18) и (21) в (20), мы формулируем (22), как показано ниже. В (22) мы получаем замкнутую форму выражения производительности перебоев для общей системы DF системы FSO-UVLC на основе ретрансляции.

$$P_{out} = z_{sr} G_{3,7}^{6,1} \left[\frac{B_{sr} \gamma_{th}}{\gamma_{sr}} \middle| \phi_{sr} \right] + z_{rd} G_{3,7}^{6,1} \left[\frac{B_{rd} \gamma_{th}}{\gamma_{rd}} \middle| \phi_{rd} \right] - P_{z_{sr}z_{rd}} G_{0,0;3,7;3,7}^{0,0;6,1;6,1} \left[\begin{matrix} -\left| \phi_{sr} \right| \phi_{rd} \\ -\left| \kappa_{sr} \right| \kappa_{rd} \end{matrix} \middle| B_{sr} \left(\frac{\gamma_{th}}{\gamma_{sr}} \right), B_{rd} \left(\frac{\gamma_{th}}{\gamma_{rd}} \right) \right]. \quad (22)$$

Анализ производительности среднего BER

В этом разделе приведены характеристики ABER всей системы, рассматриваемой в схеме PAM. Раздел также разделен на два основных подраздела, в них приводится аналитическое ABER-выражение системы при наличии ошибки наведения и в сценариях ее отсутствия.

Влияние ошибки наведения на средний BER. Аналитическое выражение ABER при наличии эффекта ошибки наведения для предложенной Модели системы выводится в настоящем подразделе. В качестве альтернативы, в данном исследовании протокол ретрансляции DF рассматривается как модулятор интенсивности работы на стороне промежуточных узлов связи и используется для регенерации информации в формат VLC. Для отдельного прыжка ABER, обозначим I_{sr} , I_{rd} и произведение I_{sr} , I_{rd} представлено $\phi_{I_{sys}}$. Кроме того, общий средний BER рассчитывается [22] так:

$$\overline{BER}_{sys} \approx \overline{BER}_{sr}(1 - \overline{BER}_{rd}) + \overline{BER}_{rd}(1 - \overline{BER}_{sr}) \approx \underbrace{\overline{BER}_{sr}}_{I_{sr}} + \underbrace{\overline{BER}_{rd}}_{I_{rd}} - 2 \underbrace{\overline{BER}_{sr} \overline{BER}_{rd}}_{\phi_{I_{sr}}} \quad (23)$$

Расчет ABER для отдельного прыжка каждого звена, мы осуществляли с помощью [23, уравнение (16)] при рассмотрении схемы модуляции M-ary PAM в (35).

$$I_{mn} = K \int_0^{\infty} \operatorname{erfc} \sqrt{D\gamma_{mn}} \times f_{h_t}(h_{t_{mn}}) f_{h_p}(h_{p_{mn}}) dh_{t_{mn}} dh_{p_{mn}}, \quad (24)$$

где $K = (M - 1)/(M \log_2(M))$ и $D = 3/(2(M - 1)(2M - 1))$ для PAM-схемы. В дополнение используются свойства из [19, уравнение (06.27.26.0006.01)], для преобразования функции ошибки в G-функцию Майера и замены значения $f_{h_t}(h_{trd})$ из [8, уравнение (3)] в (24) и получаем (25). Чтобы произвести интегрирование произведения двух G-функций Майера в (25), используем свойства в [19, уравнение (07.34.21.0013.01)], и подставим значения из (13) в (25). Чтобы рассчитать ABER для канала UVLC снова используем G-функцию Майера как в [19, уравнение (07.34.03.0001.01)], и получим (26). Для FSO-канала рассматривается однослойный ABER, выражающийся через (27) и (26). Аналогично предыдущим разделам, параметры в (26) и (27) показаны ниже:

$$z_1 = \frac{KP \alpha_{sr}^j \beta_{sr}^j}{\sqrt{\pi} P_{\Gamma \alpha_{sr}^j \Gamma \beta_{sr}^j}}, \quad \rho_1 = \sum_{j=1}^J (\alpha_{sr}^j + \beta_{sr}^j - 2J), \quad C_{rd} = \left(\frac{2^{2J}}{P_{\alpha_{sr}^j \beta_{sr}^j}} \right)^2$$

$$C_{sr} = \left(\frac{4}{\alpha_{sr}^j \beta_{sr}^j} \right)^2, \quad z_2 = \frac{2^{\rho_1-1} K \zeta_{rd}^2}{\pi^{\frac{2J+1}{2}} \prod_{j=1}^J \Gamma \alpha_{rd}^j \Gamma \beta_{rd}^j}$$

$$I_{rd} = z_1 \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} G_{0,2J}^{2J,0} \left[P_{\alpha_{rd}^j \beta_{rd}^j} h_{rd} \left| \alpha_{rd}^1 - 1, \dots, \alpha_{rd}^J - 1, \beta_{rd}^1 - 1, \dots, \beta_{rd}^J - 1, \dots \right. \right] G_{1,2}^{2,0} \left[D \bar{\gamma}_{rd} h_{p_{rd}}^2 h_{rd}^2 \left| \frac{1}{0}, \frac{1}{2} \right. \right] f_{h_p} (h_{p_{rd}}) dh_{p_{rd}} dh_{rd} \quad (25)$$

$$I_{rd} = \frac{2^{\rho_1-1} K \zeta_{rd}^2}{\pi^{\frac{2J+1}{2}} \prod_{j=1}^J \Gamma \alpha_{rd}^j \Gamma \beta_{rd}^j} G_{4J+2,3}^{2,4J+1} \left[\left(A_{rd}^2 C_{rd} D \bar{\gamma}_{rd} \right) \left| \frac{\phi_{I_{rd}}}{0}, \frac{1}{2}, \frac{-\zeta_{rd}^2}{2} \right. \right] \quad (26)$$

$$I_{sr} = \frac{2^{\rho_1} K \zeta_{sr}^2}{\pi^{\frac{3}{2}} P_{\Gamma \alpha_{sr} \Gamma \beta_{sr}}} G_{6,3}^{2,5} \left[\left(A_{sr}^2 C_{sr} D \bar{\gamma}_{sr} \right) \left| \frac{\phi_{I_{sr}}}{0}, \frac{1}{2}, \frac{-\zeta_{sr}^2}{2} \right. \right] \quad (27)$$

$$\overline{BER} = I_{sr} + I_{rd} - 2P_{z_2 z_3} G_{0,0;6,3;4J+2,3}^{0,0;2,5;2,4J+1} \left[\left(A_{sr}^2 C_{sr} D \bar{\gamma}_{sr} \right), \left(A_{rd}^2 C_{rd} D \bar{\gamma}_{rd} \right) \left| \frac{\phi_{I_{sr}}}{0}, \frac{1}{2}, \frac{-\zeta_{sr}^2}{2} \right|, \frac{\phi_{I_{rd}}}{0}, \frac{1}{2}, \frac{-\zeta_{rd}^2}{2} \right] \quad (28)$$

$$\rho_2 = (\alpha_{rd} + \beta_{rd} - 3), \quad z_3 = \frac{2^{\rho_2} K \zeta_{sr}^2}{\pi^{3/2} P_{\Gamma \alpha_{sr} \Gamma \beta_{sr}}}$$

$$\phi_{I_{sr}} = \left[\frac{2 - \zeta_{sr}^2}{2}, \frac{1 - \alpha_{sr}}{2}, \frac{2 - \alpha_{sr}}{2}, \frac{1 - \beta_{sr}}{2}, \frac{2 - \beta_{sr}}{2}, 1 \right],$$

$$\phi_{I_{rd}} = \left[\frac{2 - \zeta_{rd}^2}{2}, \frac{1 - \alpha_{rd}^1}{2}, \dots, \frac{1 - \alpha_{rd}^J}{2}, \frac{2 - \alpha_{rd}^1}{2}, \dots, \frac{2 - \alpha_{rd}^J}{2}, \dots, \frac{1 - \beta_{rd}^1}{2}, \dots, \frac{1 - \beta_{rd}^J}{2}, \frac{2 - \beta_{rd}^1}{2}, \dots, \frac{2 - \beta_{rd}^J}{2}, 1 \right]$$

Подставляя значения из (26) и (27) в (23), получаем АBER всей системы. Выражение в закрытой форме АBER для всей системы определяется по (28), как показано ранее – при совокупном комбинированном влиянии условий канала сильной турбулентности и эффектов ошибки наведения.

Численные результаты

В настоящем разделе описывается исследование вероятности перебоев в работе и производительность АBER всей системы с комбинированным влиянием ухудшения качества связи в обоих каналах. Для FSO канала с учетом потерь при доставке при длине волны луча $\lambda = 1550$ нм и экспонента потерь на пути была принята как $\delta = 0,46$, а показатель преломления $C_n^2 = 1 \times 10^{-13}$ используется для моделирования коэффициента канала с сильной турбулентностью. Фиксированная длина между источником и

ретранслятором составляет 0,5 км. Для UVLC были приняты длина оптической волны $\lambda = 532$ нм, а коэффициент экстинкции $c(\lambda) = 0,0566$. Приемник площадь и диаметр апертуры приемника на ретрансляторе и DUO были $a = 1$ см, $D_r = 0,5$ см соответственно. Вертикальное расстояние между ретранслятором и пунктом назначения принято $d_t = 100$ м. Эффективность фотодетектора для обоих переходов принимается одинаковой $\eta_{mn} = 0.5$, а чувствительность фотодетектора $\gamma_{mn} = 0,28$. Угол расхождения луча $\Theta =$ от 6^0 до 18^0 для VLC-канала.

На Рисунке 2 мы получаем метрику производительности отказов для системы в целом, применяя подход Монте-Карло для правильного подбора кривых относительно пороговых значений SNR. Факторы ухудшения качества связи в канале и ошибка наведения ответственны за затухание сигнала, который используется для моделирования результатов FSO канала $(\alpha_{sr}, \beta_{sr}, \zeta_{sr}) \rightarrow (4, 2, 1.5)$, в то время как для VLC канала $(\alpha_{rd}, \beta_{rd}, \zeta_{rd}) \rightarrow (5.54, 3.92, 1.5)$, соответственно. На Рисунке 2 видно, что с увеличением порогового значения SNR кривые вероятности перебоев показывают низкую производительность. В сценарии без ошибки наведения лучшая производительность перебоев достигается в системе при низких значениях SNR.

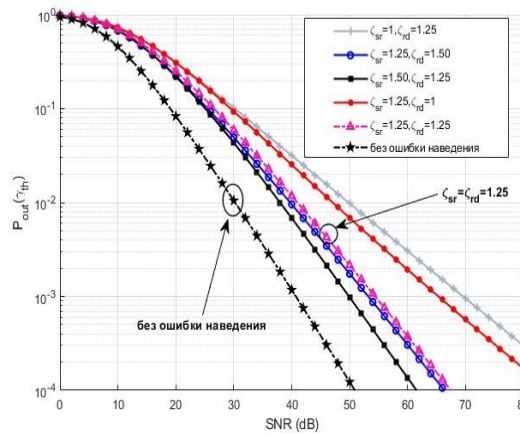


Рисунок 2 – Вероятность перебоев в работе при изменяющейся ошибке наведения
 Figure 2 – Outage probability performance on varying pointing error

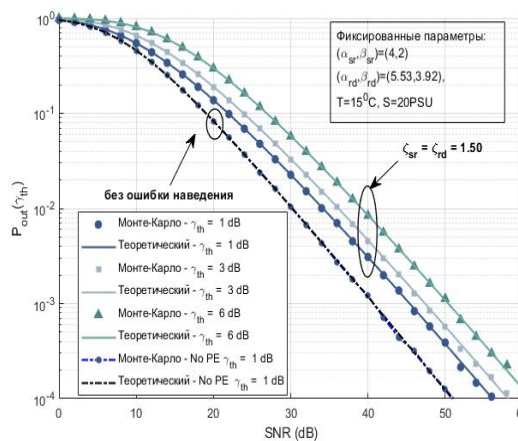


Рисунок 3 – Характеристики вероятности перебоев при изменении порогового SNR
 Figure 3 – Outage probability performance with varying threshold SNR

На Рисунке 3 мы получили характеристики перебоев в работе системы в условиях сильной турбулентности в канале из-за изменяющихся ошибок наведения в обоих каналах при фиксированных параметрах подводного канала, которые используются для

моделирования (Рисунок 2). Однако, коэффициенты потерь на трассе детерминированы и были приняты как постоянные: $h_{sr} = 0,9998$ и $h_{rd} = 0,2466$. Для моделирования результатов расстояние между источником и ретранслятором составило 0,5 км, а между ретранслятором и пунктом назначения 25 м.

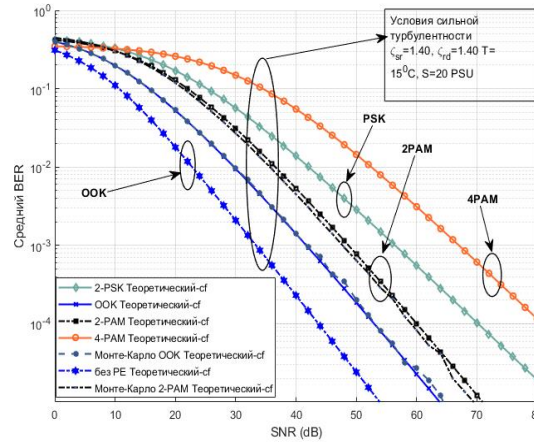


Рисунок 4 – Сравнение средних показателей BER среди различных методов модуляции сигнала
 Figure 4 – Average BER performance comparison among the different signal modulation techniques

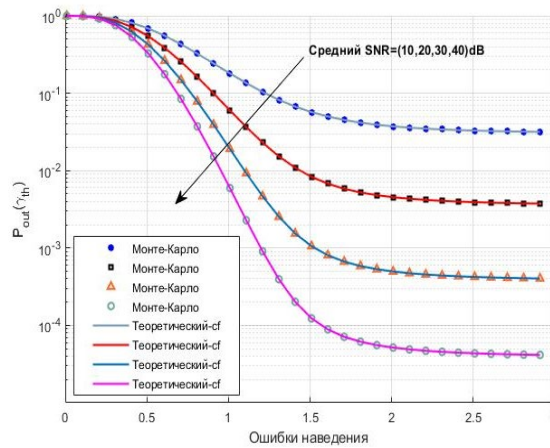


Рисунок 5 – Среднее значение BER для модели системы при изменении глубины погружения
 Figure 5 – Average BER performance of system model on varying underwater depth

На Рисунке 4 показано изменение влияния ошибки наведения на показатели перебоев в работе системы по PAM-схеме в условиях канала с сильной турбулентностью. При этом используются фиксированные параметры канала, такие как температура воды $T = 15^{\circ}\text{C}$ и соленость 20 PSU (практических единиц солености). Однако, эффект ошибки наведения изменяется из-за распространения оптического луча с потоком воды. Это означает, что при фиксированных параметрах производительность системы увеличивается на основе приращения SNR. Подход Монте-Карло также используется здесь для подтверждения точности аналитической работы с полученными результатами.

На Рисунке 5 показаны средние показатели BER при фиксированном расстоянии (0,5 км) между источником и реле, однако, расстояние между ретранслятором и пунктом назначения варьируется. Производительность BER также наблюдается при расстоянии 100 м между ретранслятором и пунктом назначения. Изменяющееся расстояние в подводном пространстве рассматривается как j -й последовательные вертикальные слои (10 м каждый) в водной среде при фиксированной температуре воды 20°C и солености

20 PSU. Результаты моделирования показывают постоянно низкую производительность в связи с увеличением вертикального расстояния в подводной среде. При приближении к 20 м в подводной среде BER 10^{-3} достигается в режиме низкого SNR. В условиях высокого SNR в последовательных слоях наблюдается ухудшение среднего BER. Превосходная производительность достигается при отсутствии ошибки наведения при подводном вертикальном расстоянии 20 м.

Заключение

В данном исследовании предлагается новый подход для получения метрики E2E-производительности для следующего поколения сетей 5G. Предложенная система работает в полнодуплексном режиме, где источник связывается с DUO через DF протокол ретрансляции. DF протокол рассматривается как интенсивный модулятор, находящийся на стороне промежуточных узлов связи (SIM) для декодирования сигналов и пересылки в различных каналах. Гамма-гамма распределение также используется для моделирования умеренной и сильной турбулентных условий канала. Модель спектра подводной оптической турбулентности (UOT) используется для расчета больших и малых вихревых отклонений с учетом модели плоских волн. Эффекты ошибки наведения также широко обобщены и проведено представление их влияния в процессе обработки сигнала. Расширенная обобщенная безвариантная G-функция Майера (EGBMGF) используется для подтверждения точности в качестве новой математической основы для получения производительности системы. Кроме того, имитационное моделирование Монте-Карло также используется для подтверждения точности работы системы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Yahia S., Meraihi Y., Ramdane-Cherif A., Gabis A.B., Acheli D., Guan H. A survey of channel modeling techniques for visible light communications. *J. Netw. Comput. Appl.* 2021;194:103206.
2. Nguyen T.V., Le H.D., Pham T.V., Pham A.T. Link availability of satellite-based FSO communications in the presence of clouds and turbulence. *IEICE Commun. Exp.* 2021;10(5):206–211.
3. Miranda F.A. et al. An overview of key optical communications technologies under development at the NASA Glenn Research Center. *Proc. Opt. Interconnects XXI.* 2021;11692:130–144.
4. Mohsan S.A.H. Amjad H. A comprehensive survey on hybrid wireless networks: Practical considerations, challenges, applications and research directions. *Opt. Quantum Electron.* 2021;53(9):1–56.
5. Ali M.F., Jayakody D.N.K., Li Y. Recent trends in underwater visible light communication (UVLC) systems. *IEEE Access.* 2022;10:22169–22225.
6. Hoehner P.A., Sticklus J., Harlakin A. Underwater optical wireless communications in swarm robotics: A tutorial. *IEEE Commun. Surveys Tuts.* 2021;23(4):2630–2659.
7. Ali M.F., Jayakody D.N.K., Chursin Y.A., Affes S., Sonkin D. Recent advances and future directions on underwater wireless communications. *Arch. Comput. Methods Eng.* 2020;26(100):1379–1412.
8. Elamassie M. Uysal M. Vertical underwater VLC links over cascaded gamma-gamma turbulence channels with pointing errors. *Proc. IEEE Int. Black Sea Conf. Commun. Netw. (BlackSeaCom).* 2019:1–5.
9. Aggarwal M., Garg P., Puri P. Analysis of subcarrier intensity modulation-based optical wireless DF relaying over turbulence channels with path loss and pointing error impairments. *IET Commun.* 2014;8(17):3170–3178.

10. Sokolov A., Chami M., Dmitriev E., Khomenko G. Parameterization of volume scattering function of coastal waters based on the statistical approach. *Opt. Exp.* 2010;18(5):4615–4636.
11. Elamassie M., Miramirkhani F., Uysal M. Channel modeling and performance characterization of underwater visible light communications. *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. Workshops (ICC Workshops)*. 2018:1–5.
12. Gappmair W., Further results on the capacity of free-space optical channels in turbulent atmosphere. *IET Commun.* 2011;5(9):1262–1267.
13. Varotsos G.K. et al. Probability of fade estimation for FSO links with time dispersion and turbulence modeled with the gamma-gamma or the IK distribution. *Optik.* 2014;125(24):7191–7197.
14. Varotsos G. K., Nistazakis H. E., Ninos M. P., Tombras G. S., Tsigopoulos A. D., Volos C. K. DF relayed FSO communication systems with time dispersion over gamma gamma turbulence and misalignment. *Proc. 6th Int. Conf. Modern Circuits Syst. Technol. (MOCASST)*. 2017:1–4.
15. Levidala B. K., Ramavath P. N., Krishnan P. Performance enhancement using multiple input multiple output in dual-hop convergent underwater wireless optical communication–free-space optical communication system under strong turbulence with pointing errors. *Opt. Eng.* 2021;60(10):106106.
16. Farid A.A. Hranilovic S. Outage capacity optimization for freespace optical links with pointing errors. *J. Lightw. Technol.* 2007;25(7):1702–1710.
17. Ansari I. S., Yilmaz F., Alouini M.-S. Impact of pointing errors on the performance of mixed RF/FSO dual-hop transmission systems. *IEEE Wireless Commun. Lett.* 2013;2(3): 351–354.
18. Adamchik V., Marichev O. The algorithm for calculating integrals of hypergeometric type functions and its realization in REDUCE system. *Proc. Int. Symp. Symbolic Algebr. Comput.* 1990:212–224.
19. Generalized G-Meijer Function. URL: functions.wolfram.com/GeneralizedFunctions [дата обращения 29.11.2023].
20. Liao Z., Yang L., Chen J., Yang H.-C., Alouini M.-S. Physical layer security for dual-hop VLC/RF communication systems. *IEEE Commun. Lett.* 2018;22:12:2603–2606.
21. Ansari I.S., Al-Ahmadi S., Yilmaz F., Alouini M.-S., Yanikomeroglu H. A new formula for the BER of binary modulations with dual-branch selection over generalized-K composite fading channels. *IEEE Trans. Commun.* 2011;59(10)2654–2658.
22. Odeyemi K.O., Owolawi P.A., Olakanmi O.O. Performance analysis of reconfigurable intelligent surface assisted underwater optical communication system. *Progr. Electromagn. Res.* 2020;98:101–111.
23. Elamassie M., Sait S.M., Uysal M. Finite-SNR diversity gain analysis of FSO systems over gamma-gamma fading channels with pointing errors. *IEEE Commun. Lett.* 2021;25(6):1940–1944.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Али Мохаммад Фуркан, ассистент, **Ali Mohammad Furqan**, Teaching Assistant in
Отделение информационных технологий, Division for Information Technology.
Томский политехнический университет, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, the
Томск, Российская Федерация. Russian Federation.

e-mail: ali89@tpu.ru

ORCID: [0000-0001-7602-0209](https://orcid.org/0000-0001-7602-0209)

Саклаков Василий Михайлович, старший преподаватель, Отделение информационных технологий, Томский политехнический университет, Томск, Российская Федерация. **Vasiliy M. Saklakov**, Senior Lecturer in Division for Information Technology. Tomsk Polytechnic University, Tomsk, the Russian Federation.

e-mail: saklavas@tpu.ru

ORCID: [0000-0003-1716-4581](https://orcid.org/0000-0003-1716-4581)

*Статья поступила в редакцию 29.11.2023; одобрена после рецензирования 26.03.2024;
принята к публикации 29.03.2024.*

*The article was submitted 29.11.2023; approved after reviewing 26.03.2024;
accepted for publication 29.03.2024.*