МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ВОЛОКОННЫХ И АТМОСФЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ, В ТОМ ЧИСЛЕ С КАНАЛАМИ АДАПТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИИ

DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-10-43-52

Колесников Олег Вячеславович,
Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, ***o.v.kolesnikov@mtuci.ru***

Терешонок Максим Валерьевич,
Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, ***m.v.tereshonok@mtuci.ru***

Топоровский Владимир Владимирович,
Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, ***v.v.toporovskiy @mtuci.ru***

Галактионов Илья Владимирович,
Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, ***i.v.galaktionov@mtuci.ru***

Manuscript received 27 July 2026;
Accepted 30 September 2026

Исследование выполнено при частичной поддержке гранта Российского научного фонда № 23-79-10223-П, https://rscf.ru/project/23-79-10223-П/.

Ключевые слова: *волоконно-оптические линии связи; АОЛС-канал; адаптивная оптика; коррекция волнового фронта; квантовое распределение ключей; функциональная устойчивость; BER; QBER; электромагнитная совместимость; формализм Джонса атмосферная турбулентность, грозовые разряды*

В статье рассматриваются методы обеспечения функциональной устойчивости оптических систем передачи информации при воздействии дестабилизирующих факторов двух классов: импульсных электромагнитных (ЭМ) полей, нарушающих состояние поляризации в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС), и атмосферной турбулентности, приводящей к деградации параметров беспроводного оптического (АОЛС) канала. Целью исследования является разработка единой методологии оценки и компенсации дестабилизирующих воздействий в гибридных системах ВОЛС-АОЛС на основе единого критерия качества – вероятности битовой ошибки (BER) и квантовой битовой ошибки (QBER). Метод. Применяется матричный формализм Джонса-Мюллера для моделирования поляризационных эффектов в ВОЛС. Разработан и экспериментально апробирован гибридный алгоритм адаптивной оптической коррекции волнового фронта в АОЛС-канале, объединяющий стохастическую и градиентную фазы оптимизации. В результате проведенных исследований установлено, что импульсные ЭМ-поля молниевых разрядов при токах 80-100 кА на расстоянии 100-300 м приводят к скорости изменения состояния поляризации порядка 10^5-10^6 рад/с, что нарушает работу алгоритмов отслеживания состояния поляризации (State of Polarization, SOP), реализуемых в приёмном тракте и условие QBER ≤ 11% для протокола BB84. Гибридный алгоритм адаптивной коррекции обеспечивает повышение мощности сигнала в волокне с 0,33 до 2,3 мВт, снижение среднеквадратического отклонения (СКО) волнового фронта с 0,63 до 0,12 мкм, улучшение BER с 10^{-2} до 10^{-6} и рост эффективности сопряжения с 0,1 до 0,6. Установлено частотное условие устойчивой коррекции: частота системы коррекции должна превышать частоту турбулентных флуктуаций не менее чем в 15 раз. Область применения. Гибридные ВОЛС-АОЛС сети, когерентные системы передачи 100G+, АОЛС-каналы связи с подвижными объектами, QKD-системы со свободно-пространственным сегментом. Выводы. Показан изоморфизм задач компенсации в ВОЛС и АОЛС, позволяющий применять единую методологию функциональной устойчивости к гибридным телекоммуникационным системам.

Информация об авторах:
Колесников Олег Вячеславович, *к.т.н., доцент, заведующий кафедрой "Оптические и квантовые коммуникации", декан факультета сетевой инженерии, Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), Москва, Россия. ORCID 0000-0002-8728-3458*
Терешонок Максим Валерьевич, *д.т.н., профессор, Начальник Научно-исследовательской части, Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), Москва, Россия. ORCID 0000-0003-1330-281X*
Топоровский Владимир Владимирович, *старший преподаватель кафедры "Оптические и квантовые коммуникации", Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), Москва, Россия. ORCID 0000-0002-8172-5171*
Галактионов Илья Владимирович, *к.ф.-м.н., доцент кафедры "Оптические и квантовые коммуникации", зам. декана факультета сетевой инженерии по науке, Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), Москва, Россия. ORCID 0000-0002-8993-3741*

Для цитирования:
Колесников О.В., Терешонок М.В., Топоровский В.В., Галактионов И.В. Методы обеспечения функциональной устойчивости кабельных и беспроводных оптических линий передачи информации, в том числе с каналами адаптивной компенсации // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2026. Том 20. №10. С. 43-52.

For citation:
O.V. Kolesnikov, M.V. Tereshonok, V.V. Toporovsky, I.V. Galaktionov, "Methods for ensuring functional stability of fiber and atmospheric optical communication links, including adaptive compensation channels," *T-Comm*, 2026, vol. 20, no. 10, pp. 43-52. (*in Russian*)

Введение

Глобальный рост объёма телекоммуникационного трафика, ускоренный развитием облачных вычислений, потоковых сервисов и интернета вещей, предъявляет принципиально новые требования к функциональной устойчивости оптических систем передачи информации. По данным аналитических агентств, мировой IP-трафик превышает 400 Эбайт/месяц, причём не менее 80% его объёма передаётся посредством волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) [1, 2]. Вместе с тем практика эксплуатации ВОЛС-магистралей показывает, что физические факторы внешней среды – импульсные электромагнитные (ЭМ) поля (в том числе наиболее опасные от грозовых разрядов), наведённые токи в металлических элементах кабелей, а также атмосферная турбулентность в беспроводных оптических (АОЛС) каналах – становятся критическими угрозами прерывания связи [3, 4].

Беспроводные оптические каналы играют всё более значимую роль в архитектуре гибридных телекоммуникационных сетей как альтернатива радиочастотным каналам в условиях перегруженности радиочастотного спектра в плотной городской застройке, а также как средство организации высокоскоростных временных линий связи и каналов с подвижными объектами [5, 6]. Принципиальное ограничение АОЛС-каналов связано с атмосферной турбулентностью, вызывающей флуктуации показателя преломления воздуха и, как следствие, деградацию качества волнового фронта лазерного пучка, ослабление сигнала и деградацию BER [7, 8].

Таким образом, ВОЛС-сегмент и АОЛС-сегмент гибридной сети подвержены различным по физической природе, но сходным по функциональным последствиям дестабилизирующим воздействиям: в обоих случаях нарушается качество оптического канала, измеряемое единым критерием – вероятностью битовой ошибки (BER) или квантовой битовой ошибки (QBER) для систем квантового распределения ключей (КРК). В настоящей работе показано, что сходство функциональных последствий дестабилизирующих воздействий позволяет построить единую методологию обеспечения функциональной устойчивости гибридных оптических систем передачи информации.

Целью настоящей работы является разработка и проверка достоверности методов оценки и компенсации дестабилизирующих воздействий в ВОЛС и АОЛС-каналах на основе единого критерия качества и единого методологического подхода. Для достижения цели решены следующие задачи:

1. Произведён анализ физических механизмов воздействия ЭМ-импульсов на поляризацию сигнала в ВОЛС.
2. Разработаны матричные модели для описания поляризационных эффектов.
3. Разработан и экспериментально апробирован гибридный алгоритм адаптивной коррекции волнового фронта для АОЛС-каналов.
4. Установлены частотные критерии эффективности адаптивной коррекции.
5. Сформирована единая методология устойчивости.

На рис. 1 приведена обобщённая структура гибридной телекоммуникационной системы ВОЛС-АОЛС с указанием классов дестабилизирующих воздействий.

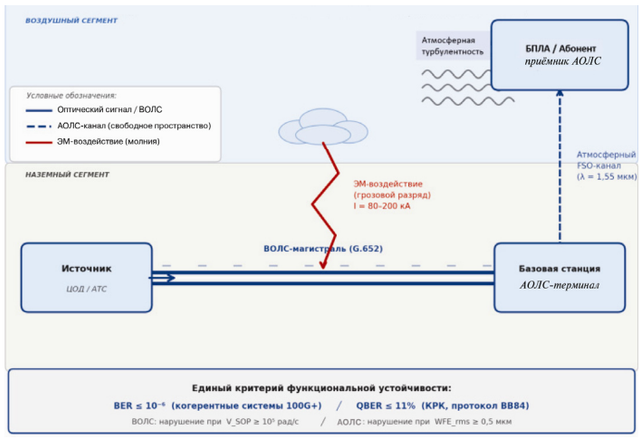


Рис. 1. Обобщённая структура гибридной телекоммуникационной системы ВОЛС-АОЛС с указанием классов дестабилизирующих воздействий

1 Угрозы устойчивости ВОЛС при импульсных ЭМ-полях

Электромагнитные поля молниевых разрядов оказывают комплексное воздействие на оптические волокна ВОЛС через несколько физических механизмов [3, 9]. Первым и наиболее значимым является магнитооптический эффект Фарадея: магнитное поле молниевого тока индуцирует вращение плоскости поляризации световой волны на угол θ~F~, пропорциональный проекции магнитной индукции на ось распространения. Вторым механизмом служит нелинейный эффект Керра – квадратичный электрооптический эффект, вносящий дополнительный вклад в изменение состояния поляризации (SOP, State of Polarization) при интенсивных ЭМ-импульсах. Третьим механизмом является поляризационная модовая дисперсия (PMD, Polarization Mode Dispersion), усугубляющая деградацию сигнала вследствие случайного двулучепреломления волокна [10].

Конструктивный тип кабеля ВОЛС принципиально определяет степень уязвимости к ЭМ-воздействию. Кабели типа ОКГТ (оптический кабель грозозащитного троса) содержат металлические проводящие элементы и непосредственно несут функцию грозозащиты в ЛЭП, что обеспечивает управляемые параметры ЭМ-воздействия на волокно. Кабели типа ADSS (All Dielectric Self-Supporting) и ПДО (полностью диэлектрические), несмотря на отсутствие металла, подвержены воздействию через электрическое поле грозовых облаков и разрядный ток в земле, а также через наводки на соседние металлосодержащие конструкции [11].

Критерием функциональной устойчивости ВОЛС принято значение вероятности битовой ошибки BER. Для 100G-когерентных систем передачи с форматом модуляции PDM-QPSK рабочий предел составляет BER ≤ 10^{-9} (с учётом кодирования FEC – до 10^{-4}–10^{-3}). Связь BER с параметрами поляризационного воздействия осуществляется через динамический критерий – скорость изменения SOP (V~SOP~, рад/с) и динамическое дифференциальное групповое запаздывание (DGD~dyn~, пс). Установлено[12,13], что при V~SOP~ ≥ 10^4

рад/с начинается деградация BER в системах без адаптивного DSP-трекера SOP, при V~SOP~ ≥ 10^5 рад/с BER превышает 10^{-6}–10^{-3} даже при наличии трекера с полосой до 100 кГц.

Классификация уровней ЭМ-воздействия в соответствии с международным стандартом МЭК 62305 предусматривает четыре уровня (I–IV): от наивысшего (I, ток до 200 кА, время нарастания 1–10 мкс) до наименьшего (IV, ток до 16 кА). Результаты исследований показывают [12], что воздействие уровня I–II на ВОЛС ОКГТ при расстоянии до удара *r* < 100–200 м вызывает V~SOP~ ≥ 10^5 рад/с, что критично для QKD-систем (нарушение порога QBER ≤ 11%). Воздействие уровня III–IV при *r* > 200 м не приводит к нарушению BER-критерия в когерентных 100G-системах.

На основании проведённых расчётов и экспериментальных данных предложена функциональная классификация кабелей ВОЛС по пяти категориям устойчивости: от категории А (полная устойчивость при всех уровнях воздействия) до категории Д (работоспособность не гарантируется при воздействии уровней I–II). Категория определяется сочетанием конструктивного типа кабеля, трассировки линии и форматом передачи данных [14]. Механизм воздействия импульсного электромагнитного поля на параметры оптического канала ВОЛС приведен на рис. 2.

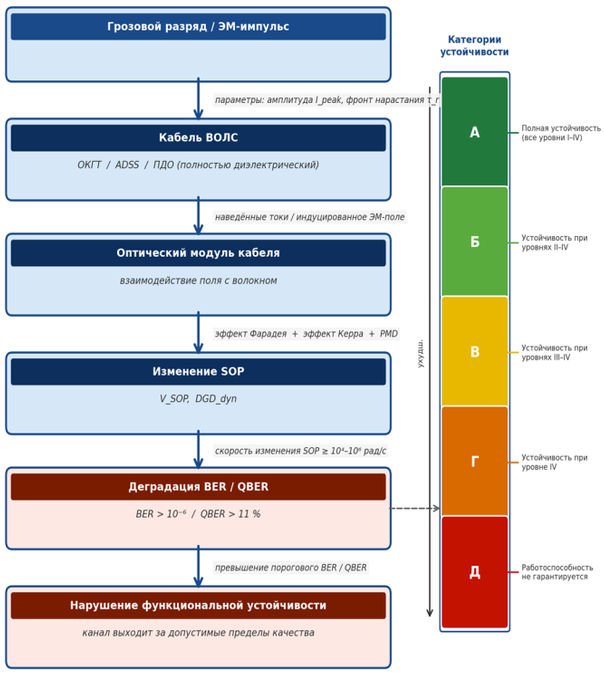


Рис. 2. Механизм воздействия импульсного ЭМ-поля на параметры ВОЛС-канала

2 Матричные модели поляризационных эффектов

Для описания эволюции состояния поляризации оптического сигнала под действием ЭМ-поля молниевого разряда используется матричный формализм Джонса и Мюллера [3, 10]. Матрица Джонса для эффекта Фарадея, описывающего поворот плоскости поляризации на угол θF, имеет вид:

$$J_F = \begin{bmatrix} \cos\theta_F & -\sin\theta_F \\ \sin\theta_F & \cos\theta_F \end{bmatrix} \quad (1)$$

где $\theta F = V \int Bzdz$ – угол поворота Фарадея, V = 0,53 рад/(Тл·м) – постоянная Верде для одномодового волокна SMF-28 на длине волны λ = 1,55 мкм, Bz – проекция магнитной индукции на ось волокна, интегрирование производится по длине взаимодействия.

Суммарная матрица Джонса для участка волокна с комбинированным воздействием (Фарадей + PMD) записывается как:

$$J_{tot} = J_{PMD} \cdot J_F \quad (2)$$

Для перехода к матрице Мюллера, описывающей эволюцию вектора Стокса $S = (S_0, S_1, S_2, S_3)^T$, используется стандартное преобразование. Полученная матрица Мюллера Mtot позволяет вычислить выходной вектор Стокса:

$$S_{out} = M_{tot} \cdot S_{in} \quad (3)$$

Динамический критерий VSOP определяется как угловая скорость изменения вектора Стокса на сфере Пуанкаре. Для линейно-поляризованного сигнала при воздействии эффекта Фарадея:

$$V_{SOP} = \frac{d\theta_{SOP}}{dt} = 2 \cdot V \cdot L \cdot \frac{dB_z}{dt} \quad (4)$$

где L – эффективная длина взаимодействия. Для импульса молниевого разряда с амплитудой тока Ipeak = 100 кА, временем нарастания τr = 1 мкс и расстоянием r = 100 м расчётное значение VSOP составляет порядка $1{,}7 \cdot 10^5$ рад/с [12].

Полоса трекинга DSP-компенсатора поляризации fDSP должна удовлетворять условию:

$$f_{DSP} \geq \frac{V_{SOP}}{2\pi \cdot \Delta\theta_{max}} \quad (5)$$

где Δθmax – допустимое угловое отклонение SOP. Для форматов модуляции PDM-QPSK, PDM-16QAM и PDM-64QAM максимальные пороговые значения VSOP составляют соответственно $6 \cdot 10^4$, $2 \cdot 10^4$ и $8 \cdot 10^3$ рад/с при BER = 10^{-3} (до FEC). Превышение этих порогов приводит к нарушению работы когерентного приёмника.

Для систем квантового распределения ключей (КРК) по протоколу BB84 аналитическая цепочка имеет вид: параметры ЭМ-импульса → угол Фарадея θ_F → скорость RSOP → QBER. Квантовая битовая ошибка вычисляется по формуле:

$$QBER(t) = \frac{1 - \sin^2(2 \cdot \theta_{F(t)})}{2} + QBER_{det} + QBER_{opt} \quad (6)$$

где QBERdet и QBERopt – составляющие, обусловленные характеристиками детектора и оптического тракта. Критическое условие QBER ≤ 11% (для протокола BB84) нарушается при углах θF ≥ 18°, что соответствует параметру удара ток Ipeak = 80 кА, r = 100 м или эквивалентные условия [12, 13]. Последовательность расчета приведена на рис. 3.

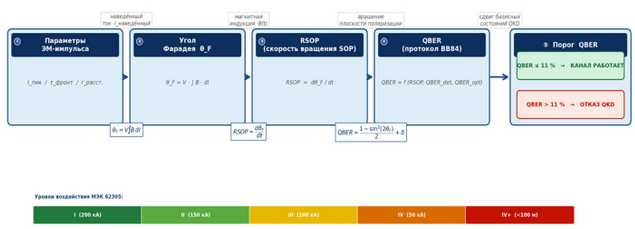


Рис. 3. Аналитическая цепочка расчёта деградации BER/QBER при ЭМ-воздействии на ВОЛС

3 Адаптивные методы компенсации в АОЛС-каналах

Атмосферная турбулентность и импульсные ЭМ-поля являются сходными дестабилизаторами оптического канала (табл. 1): в обоих случаях нарушается фазовая когерентность оптического сигнала, что приводит к деградации BER или QBER. В ВОЛС дестабилизирующее воздействие характеризуется параметром VSOP, в АОЛС-канале – среднеквадратичным отклонением волнового фронта WFErms и параметром атмосферной когерентности – радиусом Фрида r0. Оба вида воздействий допускают адаптивную компенсацию с обратной связью по сигналу качества канала [15].

Таблица 1

Дестабилизаторы оптического канала связи

Аспект аналогии	**ВОЛС: импульсное ЭМ-поле**	**АОЛС: атмосферная турбулентность**
Физическая причина возмущения	Магнитное поле тока молнии B(t)	Флуктуации показателя преломления воздуха n(r,t)
Наблюдаемое искажение сигнала	Поворот состояния поляризации (угол Фарадея θF)	Искажение волнового фронта (WFE_{rms})
Динамический параметр процесса	Скорость изменения SOP V_{SOP}, рад/с	Частота турбулентных флуктуаций fтурб, Гц
Математический аппарат описания	Матрицы Джонса/Мюллера (формулы 3.1-3.3)	Спектр Колмогорова-Обухова (формулы 6.14-6.15)
Критерий деградации канала связи	BER, QBER при превышении порога VSOP	BER, эффективность сопряжения при росте WFErms
Принцип адаптивной компенсации	DSP-трекер SOP, полоса fDSP ≥ VSOP/(2π·Δθmax)	Деформируемое зеркало, полоса fсист ≥ 15·fтурб

Как показано в таблице 1, оба класса дестабилизирующих факторов, различные по физической природе, описываются идентичной структурной последовательностью «причина – параметр – критерий – компенсация», что и составляет содержание заявленной аналогии, то есть изоморфизма задач компенсации в ВОЛС и АОЛС.

Адаптивные оптические (АО) системы для АОЛС-каналов строятся на основе деформируемых зеркал (биморфного типа, на пьезоэлектрических толкателях, MEMS) и датчиков волнового фронта Шака-Гартмана [16]. В описываемых экспериментах применялись биморфные зеркала с 42 управляющими элементами (для задачи связи с подвижными объектами) и с 92 управляющими элементами (для задачи генерации и компенсации искусственной турбулентности). Датчик Шака–Гартмана состоит из матричного фотоприёмника и массива микролинз. Каждая микролинза фокусирует часть пучка на матричный фотоприёмник; смещение пятен относительно реперных положений пересчитывается в наклоны волнового фронта [17].

Ключевым результатом является разработка гибридного алгоритма оптимизации фокусировки лазерного излучения в волокно, объединяющего стохастическую и градиентную фазы оптимизации.

Алгоритм функционирует следующим образом: на первой фазе применяется быстрый стохастический поиск с возмущениями устройств по распределению Бернулли с методом ускорения; при достижении целевым функционалом порогового значения происходит переключение на вторую фазу – медленный градиентный спуск для точной доводки. При ухудшении качества ниже порога алгоритм автоматически возвращается к стохастической фазе. Вычислительная сложность алгоритма составляет O(N·T), где N – число управляющих элементов, T – число итераций, что существенно ниже по сравнению с алгоритмом SPGD [15, 18].

Вектор возмущений с методом ускорения формируется по правилу:

$$\Delta X_t = \varepsilon_t \odot A_R \tag{7}$$

где εt,i = {±δ с вероятностью p, 0 с вероятностью 1−p}; εt – вектор случайных возмущений, AR – матрица масштабирования, p – параметр разрежения или прореживания (0 < p ≤ 1), δ – амплитуда возмущения.

Корреляционный параметр ηt, определяющий шаг обновления управляющего вектора, вычисляется как:

$$\eta_t = \frac{f(Xt+\Delta Xt) - f(Xt-\Delta Xt)}{2\cdot\|\Delta Xt\|^2} \cdot \Delta X_t \tag{8}$$

Экспериментальная апробация алгоритма проводилась на лабораторном стенде с λ = 1,55 мкм, апертурой 50 мм и одномодовым приёмным волокном диаметром 10 мкм. Излучение из лазерного диода с длиной волны 1,55 мкм, введённое в одномодовое волокно коллимировалось, проходило оптическую трассу, отражалось от пьезоэлектрического биморфного зеркала диаметром 50 мм с 42 управляющими элементами, попадало в коллиматор приёмника, где фокусировалось в волокно диаметром 10 мкм и регистрировалось с помощью измерителя мощности.

Часть излучения ответвлялась на датчик Шака-Гартмана [19-22] для измерения параметров волнового фронта. Сигнал с измерителя мощности передавался через SDK в разработанное программное обеспечение на персональном компьютере, которое рассчитывало управляющие воздействия на электроды биморфного зеркала, необходимые для коррекции фазовых флуктуаций и увеличения уровня сигнала на измерителе мощности.

Полученные результаты: мощность в волокне возросла с 0,33 до 1,85-2,3 мВт (в зависимости от конфигурации установки); WFErms снизилась с 0,63-0,70 до 0,12-0,17 мкм; BER улучшился с 10^{-2} до 10^{-6}; эффективность сопряжения (coupling efficiency) выросла с 0,1 до 0,6-0,7 [15, 18, 23].

Достигнутое значение WFErms = 0,12-0,17 мкм соответствует волновой ошибке в диапазоне 0,49-0,69 рад, определяемой по формуле (9):

$$\sigma_\varphi = \frac{2\pi\cdot WFE_{rms}}{\lambda} \tag{9}$$

что приближается к требованию QKD-канала (σφ ≤ 0,5 рад при λ = 1,55 мкм). Это подтверждает применимость разработанного алгоритма для АОЛС-сегментов QKD-сетей [15].

Структура гибридного алгоритма и схема экспериментальной установки приведены на рисунках 4 и 5. В таблице 2 представлены основные эффекты, которые могут оказывать влияние на качество канала связи и величину QBER.

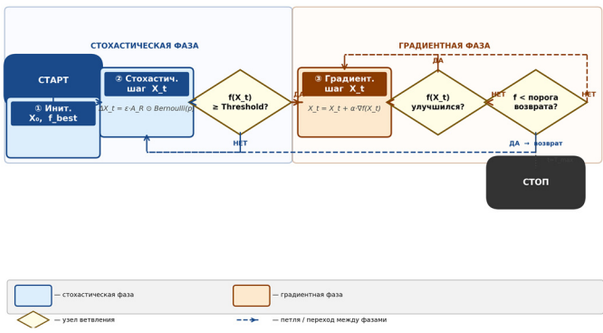


Рис. 4. Структура гибридного алгоритма адаптивной коррекции волнового фронта в АОЛС-канале

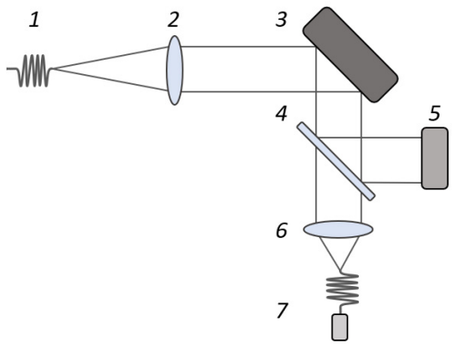


Рис. 5. Схема экспериментальной установки для исследования адаптивной коррекции в АОЛС-канале: 1 – лазерный диод; 2 – коллимирующая линза; 3 – биморфное зеркало; 4 – светоделитель; 5 – датчик Шака-Гартмана; 6 – фокусирующая линза; 7 – измеритель мощности

Таблица 2

Влияние различных эффектов, наблюдаемых в канале связи на его технические характеристики

Эффект	Итоговое влияние на канал связи
Естественный дрейф внешней среды	Легко корректируется; QBER остается стабильным (<2%).
Сильный / шквалистый ветер	Стандартные транспондеры компенсируют без проблем.
Удар молнии (эффект Фарадея)	Полный отказ канала, QBER возрастает до ~50%; система останавливает работу.
Атмосферная турбулентность (C_n^2 – 10^{-14} м$^{-2/3}$)	Типичная величина QBER (приводит к смещению пятна относительно приёмной апертуры и росту QBER до 50%)

4 Коррекция волнового фронта для связи с подвижными объектами

Связь с подвижными объектами в городской среде представляет собой принципиально новый сценарий применения АОЛС-технологий, существенно отличающийся от классических астрономических задач адаптивной оптики [6, 15]. Основные отличия состоят в следующем: (а) трасса распространения проходит через нижние слои атмосферы (0-500 м), характеризующиеся высокой интенсивностью турбулентности и динамической изменчивостью структурной характеристики показателя преломления воздуха Cn^2; (б) приёмная станция является подвижным объектом с ограниченной апертурой; (в) радиочастотный спектр в плотной городской застройке перегружен, что делает АОЛС-канал привлекательной альтернативой или дополнением к RF-каналу [5, 6].

Для решения задачи связи с подвижными объектами использовалась экспериментальная установка с параметрами: длина волны $\lambda = 1{,}55$ мкм (телекоммуникационный диапазон C-band), апертура коллиматора 50 мм, биморфное деформируемое зеркало с 42 управляющими элементами, одномодовое приёмное волокно с диаметром сердцевины 10 мкм [15]. Атмосферная турбулентность моделировалась путём использования тонких фазовых экранов в оптическом тракте [16]. Данная модель позволяет с высокой степенью достоверности имитировать искажения волнового фронта, возникающие при прохождении излучения через непрерывную случайно-неоднородную среду. Ключевое преимущество этого подхода заключается в том, что аберрации, вносимые последовательностью таких экранов, адекватно отражают реальные флуктуации светового поля, обусловленные преимущественно крупномасштабными атмосферными неоднородностями [17]. Как следствие, метод фазовых экранов обеспечивает приемлемую точность (согласно спектральной плотности мощности) при моделировании турбулентных воздействий в подавляющем большинстве практических задач.

Для генерации динамической последовательности фазовых экранов в данной работе использовался метод, основанный на быстром преобразовании Фурье и Колмогоровской модели спектра фазовых флуктуаций [18]. Соответствующее выражение имеет вид:

$$p(u,v,t+\Delta t) = \iint_{-\infty}^{\infty} \sqrt{K(x,y)} \cdot f(x,y,t+\Delta t) \cdot e^{i\cdot\sqrt{x^2+y^2}\cdot V\cdot\Delta t}\, dxdy \quad (10)$$

где $pu,v,t+\Delta t$ – сгенерированный фазовый экран, V – скорость ветра, м/с, t и $t+\Delta t$ – момент генерации предыдущего и последующего фазовых экранов, $K(x,y)$ – спектр фазовых флуктуаций.

Для расчета спектра фазовых флуктуаций $K(x,y)$ использовалась следующая формула [19]:

$$Kx,y = 0{,}023\cdot(2Dr0)53\cdot(x2+y2)-113 \quad (11)$$

где D – приемная апертура телескопа, r0 – радиус Фрида, $f(x,y,t+\Delta t)$ – функция, определяемая по формуле:

$$fx,y,t+\Delta t=p\cdot fx,y,t+1-p2\cdot ei\cdot\varphi(x,y,t) \quad (12)$$

где $p=e-\Delta t\tau$, τ – время когерентности атмосферы, $\varphi(x,y,t)$ – случайная дельта-коррелированная величина в диапазоне $[0; 2\pi]$.

Использовалась следующая структурная функция:

$$DN = 6{,}88\cdot\left(\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{r_0}\right)^{5/3} \quad (13)$$

Фазовый экран, сгенерированный таким образом, аппроксимировался круговыми полиномами Цернике для дальнейшего аналитического представления. Выбор именно этих полиномов обусловлен их способностью аппроксимировать крупномасштабные аберрации волнового фронта [24]. В работе использовались первые 36 полиномов Цернике [25-28]. Далее, такой экран воспроизводился с помощью биморфного адаптивного зеркала. Генерируя серию фазовых экранов и

восстанавливая их с помощью адаптивного зеркала, можно создавать условия контролируемой искусственной атмосферной турбулентности.

Результаты экспериментов демонстрируют высокую эффективность предложенного подхода. Мощность лазерного пучка, фокусируемого в приёмное волокно диаметром 10 мкм, возросла с 0,33 мВт (без коррекции) до 2,3 мВт (с коррекцией), что соответствует увеличению в 6,97 раза [15]. Параметр WFErms снизился с 0,63 до 0,12 мкм, что свидетельствует об эффективном подавлении аберраций волнового фронта. Доля мощности, попадающей в приёмный тракт подвижного объекта, возросла с 0,1 до 0,6, что непосредственно транслируется в улучшение отношения сигнал-шум и, следовательно, в снижение BER и увеличение рабочей дальности канала [15].

Практическое значение достигнутых результатов состоит в следующем. Во-первых, повышение эффективности сопряжения с 0,1 до 0,6 при прочих равных условиях позволяет увеличить рабочую дальность АОЛС-канала с подвижным объектом приблизительно в 2,4 раза (оценка из формулы передачи энергии [34] с квадратичной зависимостью мощности от дальности). Во-вторых, снижение требуемой мощности передатчика для обеспечения заданного BER открывает возможности для создания компактных энергоэффективных АОЛС-терминалов для подвижных объектов [6, 33]. В-третьих, достигнутое качество пучка (WFErms ≈ 0,12 мкм) приближает АОЛС-канал с подвижным объектом к требованиям QKD-систем, что перспективно для организации защищённых квантовых каналов связи с воздушными объектами.

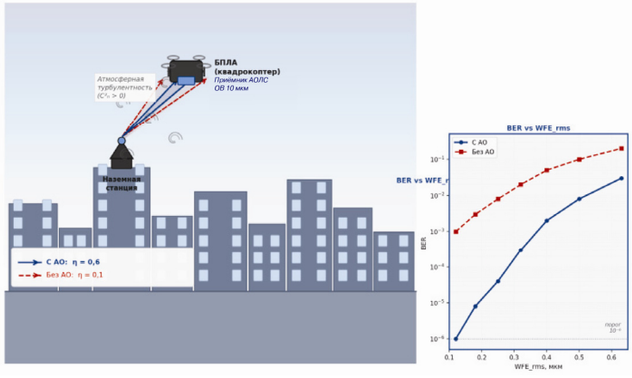


Рис. 6. Схема АОЛС-канала связи с подвижным объектом в городских условиях и сравнение эффективности без адаптивной коррекции и с ней

5 Частотные критерии адаптивной коррекции

Эффективность адаптивной коррекции принципиально определяется соотношением частоты работы системы управления fсист и характеристической частоты флуктуаций турбулентности fтурб. Для экспериментального исследования этого соотношения разработан генератор искусственной атмосферной турбулентности на базе биморфного деформируемого зеркала с 92 управляющими элементами, установленного в кинематической оправе [32].

В основу модели положена колмогоровская статистика атмосферной турбулентности. Пространственный спектр флуктуаций фазы волнового фронта описывается формулой Колмогорова-Обухова:

$$\Phi_\varphi(\kappa) = 0{,}023 \cdot r_0^{-5/3} \cdot \kappa^{-11/3} \qquad (14)$$

где к – пространственная частота, $r0$ – радиус Фрида (параметр атмосферной когерентности). Структурная функция фазы:

$$D_\varphi(\rho) = 6{,}88 \cdot \left(\frac{\rho}{r_0}\right)^{5/3} \qquad (15)$$

Фазовые экраны, имитирующие турбулентность, синтезируются методом быстрого преобразования Фурье (ФПФ) с использованием спектра (10). Двухконтурная схема установки включает контур генерации искусственной турбулентности (первое зеркало, 92 элемента) и контур коррекции (второе зеркало, 42 элемента). Частота генерации fтурб варьировалась в диапазоне 1-100 Гц, частота системы коррекции fсист – в диапазоне 10-1000 Гц [33].

Ключевой результат экспериментального исследования показал, что устойчивая адаптивная коррекция обеспечивается при условии fсист / fтурб ≥ 15. При fтурб > 20 Гц (характерном для нижних слоёв атмосферы в городских условиях и при ветре более 5 м/с) требуется fсист > 300 Гц. При невыполнении этого условия эффективность коррекции резко падает, а WFErms не снижается ниже 0,4-0,5 мкм [32].

Структурная характеристика показателя преломления воздуха Cn^2 является ключевым параметром, определяющим интенсивность атмосферной турбулентности. По результатам анализа литературных данных составлена сводная таблица диапазонов Cn^2 для различных типов трасс. Диапазоны структурной характеристики показателя преломления воздуха Cn^2 для различных типов АОЛС-трасс представлены в таблице 3.

Таблица 3

Диапазоны Cn^2 для различных типов АОЛС-трасс

Тип трассы	Cn^2, $м^{-2/3}$	Характеристика
Городская (плотная застройка)	1×10^{-13} – $9{,}87\times10^{-14}$	Высокая турбулентность, тепловые потоки
Городская (умеренная)	$6{,}69\times10^{-16}$ – 1×10^{-13}	Умеренная, вертикальные потоки
Пригородная	1×10^{-16} – 6×10^{-15}	Низкая-умеренная
Горная	1×10^{-17} – 1×10^{-15}	Переменная, зависит от высоты
Приморская	5×10^{-17} – 5×10^{-15}	Умеренная, морской бриз
Пустынная (дневная)	1×10^{-14} – 5×10^{-13}	Очень высокая, тепловые конвекции

Полученные данные свидетельствуют о том, что для проектирования городских АОЛС-систем необходимо закладывать $f_{сист} \geq$ 500-1000 Гц, тогда как для пригородных и открытых трасс достаточно $f_{сист} \geq$ 100-300 Гц [32].

6 Единая методология устойчивости ВОЛС и АОЛС

Проведённый анализ позволяет сформулировать единую методологию обеспечения функциональной устойчивости оптических систем передачи информации в гибридных

ВОЛС–АОЛС архитектурах. Ключевым элементом методологии является единый критерий качества канала – BER (или QBER для QKD-систем), позволяющий унифицировать оценку устойчивости вне зависимости от физической природы дестабилизирующего воздействия.

Сравнительная характеристика методов обеспечения функциональной устойчивости ВОЛС и АОЛС представлена в таблице 4.

Таблица 4

Сравнительная характеристика методов обеспечения функциональной устойчивости ВОЛС и АОЛС

Параметр	**ВОЛС (ЭМ-воздействие)**	**АОЛС (турбулентность)**
Дестабилизатор	ЭМ-импульс молнии	Атмосферная турбулентность
Параметр	**ВОЛС (ЭМ-воздействие)**	**АОЛС (турбулентность)**
Физ. механизм	Эффекты Фарадея, Керра, PMD	Флуктуации n(r,t), Cn^2
Ключевой параметр	V_{SOP}, DGD_{dyn}	WFE_{rms}, r_0
Критерий качества	BER, QBER (BB84)	BER, эффективность сопряжения
Метод компенсации	DSP-трекер SOP	Адаптивное деформируемое зеркало
Достигнутый результат	BER ≤ 10^{-9} при V_{SOP} < 10^4 рад/с	BER: 10^{-2} → 10^{-6}, η: 0,1 → 0,6

Единство методологии проявляется на нескольких уровнях. На уровне физического моделирования оба класса воздействий описываются матричным формализмом: матрица Джонса/Мюллера – для SOP-преобразования в ВОЛС, матрица влияния (функции влияния управляющих элементов) деформируемого зеркала – для коррекции волнового фронта в АОЛС. На уровне алгоритмического управления оба случая допускают применение адаптивных алгоритмов с обратной связью по BER/QBER. На уровне проектирования в обоих случаях определяющим является динамический параметр: VSOP (рад/с) для ВОЛС и fтурб (Гц) для АОЛС, а также соответствующее требование к полосе компенсатора [3, 12, 32]. Важно отметить, что таблица 1 и таблица 4 не дублируют друг друга: таблица 1 сопоставляет физику воздействий, таблица 2 – методы и достигнутые практические результаты компенсации.

Перспективным направлением является интеграция DSP-компенсатора поляризации (для ВОЛС) и адаптивной оптической системы (для АОЛС) в единый контур управления гибридным каналом ВОЛС–АОЛС. Такая архитектура позволила бы обеспечить сквозную функциональную устойчивость от источника до конечного абонента, включая подвижный или спутниковый объект, с использованием единой системы мониторинга BER/QBER [30, 34]. Для QKD-сетей со свободно-пространственным сегментом интеграция адаптивной оптики на земных станциях является необходимым условием достижения QBER < 11% в условиях городской атмосферной турбулентности, что подтверждается экспериментальными данными настоящей работы [15].

Заключение

В настоящей работе получены следующие основные (теоретические и экспериментальные) научные результаты.

1. Показан изоморфизм задач компенсации в ВОЛС и АОЛС: импульсные ЭМ-поля и атмосферная турбулентность представляют собой два класса дестабилизирующих воздействий, различных по физической природе, но идентичных по функциональным последствиям (деградация BER/QBER) и допускающих единый методологический подход к оценке и компенсации.

2. Разработан и экспериментально апробирован гибридный алгоритм адаптивной коррекции волнового фронта в АОЛС-канале, объединяющий стохастическую и градиентную фазы оптимизации. Алгоритм обеспечивает рост эффективности сопряжения с 0,1 до 0,6-0,7, снижение WFErms с 0,63-0,70 до 0,12-0,17 мкм и улучшение BER с 10^{-2} до 10^{-6}.

3. Установлено и обосновано частотное условие устойчивой адаптивной коррекции: соотношение частот системы коррекции и турбулентных флуктуаций должно быть не менее 15, что при fтурб > 20 Гц требует fсист > 300 Гц.

4. Разработана и предложена единая методология обеспечения функциональной устойчивости гибридных ВОЛС–АОЛС систем на основе единого критерия BER/QBER, применимая как к традиционным когерентным системам передачи, так и к QKD-сетям со свободно-пространственным сегментом.

Направлениями дальнейших исследований являются: интеграция DSP-компенсатора поляризации ВОЛС и АО-системы АОЛС в единый контур управления; разработка модели АОЛС-канала ВОЛС-подвижный объект с учётом реальных статистик Cn^2 для российских городов; экспериментальная верификация предложенных методов для QKD-протоколов BB84 и CV-QKD.

Литература

1. Cisco Annual Internet Report (2018-2023). White Paper. Cisco Systems, 2020.

2. *Belova O.S., Bolotov D.V., Kazantsev S.Yu. et al.* Features of Functioning of Modern Communication Systems in the Presence of Thunderstorm Activity // Technical Physics. 2025. V. 70, No 5, pp. 135–142. DOI 10.1134/S1063784225600274.

3. *Колесников О.В.* Особенности воздействия молниевых разрядов на оптические кабели: учебник для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2024. 123 с.

4. *Соколов С.А.* Воздействие внешних ЭМ-полей на оптические кабели связи и гибридные линии. М.: Горячая линия – Телеком, 2018. 214 с.

5. *Казанцев С.Ю., Кузнецов С.Н., Максимов А.Ю., Пчелкина Н.В.* Применения атмосферной оптической связи на объектах атомной энергетики // Успехи прикладной физики. 2023. Т. 11, №. 6. С. 530–539. DOI 10.51368/2307-4469-2023-11-6-530-539.

6. *Галактионов И.В., Топоровский В.В., Колесников О.В.* Повышение эффективности связи с летательными аппаратами средствами адаптивной оптики // Труды МАИ. 2026. № 145.

7. *Wijerathne B., Ampalavanapillai N., Zhu M. et al.* Mitigation of Atmospheric Effects in FSO Communication Systems: A Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2023. Vol. 25, No. 3, pp. 1–28.

8. *Kaushal H., Jain V.K., Kar S.* Free Space Optical Communication. Springer, 2024. 350 p.

9. *Belova O.S., Bolotov D.V., Kazantsev S.Yu. et al.* The Influence of Atmospheric Electricity and Lightning on the Operation of Communication Systems with Quantum Key Distribution // Technical Physics Letters. 2025. Vol. 51, No 2, pp. 43–47. DOI 10.1134/S1063785025600048.

10. *Конышев В.А., Лукиных С.Н., Наний О.Е. и др.* Влияние магнитного поля на поляризацию света в оптическом волокне со случайным распределением линейного двулучепреломления // Квантовая электроника. 2019. Т. 49, № 8. С. 773–778.

11. *Конышев В.А., Лукашова Т.О., Нании О.Е. и др.* Влияние молниевых разрядов на работу когерентных систем связи на основе ВОЛС // Прикладная фотоника. 2020. Т. 7, № 2. С. 118–129.

12. *Колесников О.В., Белова О.С., Болотов Д.В., Паимцев Г.П.* Эффекты Фарадея и Керра в оптическом волокне при воздействии ЭМ-поля токов молнии // Электросвязь. 2026. № 4. С. 2–10.

13. *Бушуев Э.Ю., Грычкин С.Е., Строганова Е.П.* Влияние непреднамеренных электромагнитных помех на квантовые криптографические системы связи // Электросвязь. 2026. № 1. С. 2–10. DOI 10.34832/ELSV.2026.75.1.001.

14. *Колесников О.В., Болотов Д.В., Грычкин С.Е. и др.* Классификация ВОЛС по устойчивости к ЭМ-воздействию // WECONF 2026: тр. конф. СПб., 2026. С. 1–5.

15. *Galaktionov I., Toporovsky V.* Performance Analysis of an Optical System for FSO Communications Utilizing Combined Stochastic Gradient Descent Optimization Algorithm. Applied System Innovation, 8(5), 143, 2025. https://doi.org/10.3390/asi8050143

16. *Kandidov V., Shlenov A.* Atmospheric Turbulence Simulation. Grid Representation. Technical Summary; International Laser Center: Moscow, Russia, 1995.

17. *Vorontsov M., Shmalhausen V.* Principles of Adaptive Optics; Nauka: Moscow, Russia, 1985.

18. *Dudorov V., Kolosov V., Filimonov G.* Algorithm for formation of an infinite random turbulent screen. In Proceedings of the Twelfth Joint International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics/Atmospheric Physics, Tomsk, Russia, 27–30 June 2005. https://doi.org/10.1117/12.675235

19. *Platt B., Shack R.J.* History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing. Refr. Surg. 2001, 17, 15.

20. *Liang J., Grimm B., Goelz S., Bille J.F.* Objective measurement of the wave aberrations of the human eye with the use of a Hartmann-Shack wave-front sensor. J. Opt. Soc. Am. A 1994, 11, 1949.

21. *Lane R.G.* Wave-front reconstruction using a Shack–Hartmann sensor. Appl. Opt. 1992, 31, 6902.

22. *Primot J.* Theoretical description of Shack–Hartmann wave-front sensor. Opt. Commun. 2003, 222, pp. 81–92.

23. *Lane R.G., Glindemann A., Dainty J.C.* Simulation of a Kolmogorov phase screen. Waves Random Media 1992; 2, pp. 209–224.

24. *Khonina S.N., Volotovskiy S.G., Kirilenko M.S.* A method of generating a random optical field using the Karhunen-Loeve expansion to simulate atmospheric turbulence. Computer Optics 2020, no. 44(1), pp. 53-59. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-680

25. *Zernike F.* Diffraction theory of the knife-edge test and its improved form, the phase-contrast method. Mon. Not. R. Astron. Soc. 1934, 94, pp. 377–384. https://doi.org/10.1093/mnras/94.5.377.

26. *Zernike F.* Beugungstheorie des schneidenver-fahrens und seiner verbesserten form, der phasenkontrastmethode. Physica 1934, 1, pp. 689–704. https://doi.org/10.1016/S0031-8914(34)80259-5.

27. *Schwiegerling J., Greivenkamp J.* Using corneal height maps and polynomial decomposition to determine corneal aberrations. Optom. Vis. Sci. Off. Publ. Am. Acad. Optom. 1997, 74, pp. 906–916. https://doi.org/10.1097/00006324-199711000-00024.

28. *Schwiegerling J., Greivenkamp J., Miller J.* Representation of videokeratoscopic height data with Zernike polynomials. JOSA A 1995, 12, pp. 2105–2113. https://doi.org/10.1364/JOSAA.12.002105.

29. *Tyson R.K.* Principles of Adaptive Optics. 5th ed. CRC Press, 2022. 336 p.

30. *Roggemann M.C., Welsh B.* Imaging Through Turbulence. CRC Press, 2018. 340 p.

31. *Malik M., Erven C., Leifgen M. et al.* Direct generation of three-photon polarization entanglement // Physical Review Letters. 2023. Vol. 130. P. 040405.

32. *Galaktionov I., Toporovsky V.* A Multi-Deformable-Mirror 500 Hz Adaptive Optical System for Atmospheric Turbulence Simulation, Real-Time Reconstruction, and Wavefront Correction Using Bimorph and Tip-Tilt Correctors. Photonics, 12(6), 592, 2025. https://doi.org/10.3390/photonics12060592

33. *Liao S.-K., Cai W.-Q., Liu W.-Y. et al.* Satellite-to-ground quantum key distribution // Nature. 2023. Vol. 549, pp. 43–47.

34. *Bushuev E.Y., Bolotov D.V., Grychkin S.E. et al.* Study of the influence of electric and magnetic fields on a fiber-optic communication system with quantum cryptographic equipment // Electrosvyaz. 2025. No. 5, pp. 12–19.

METHODS FOR ENSURING FUNCTIONAL STABILITY OF FIBER AND ATMOSPHERIC OPTICAL COMMUNICATION LINKS, INCLUDING ADAPTIVE COMPENSATION CHANNELS

Oleg V. Kolesnikov, *Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia,* ***o.v.kolesnikov@mtuci.ru***
Maxim V. Tereshonok, *Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia,* ***m.v.tereshonok@mtuci.ru***
Vladimir V. Toporovsky, *Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia,* ***v.v.toporovskiy@mtuci.ru***
Ilya V. Galaktionov, *Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia,* ***i.v.galaktionov@mtuci.ru***

Abstract
The paper addresses methods for ensuring functional stability of optical information transmission systems under two classes of destabilizing factors: pulsed electromagnetic (EM) fields that disturb the state of polarization in fiber-optic lines (FOL), and atmospheric turbulence that degrades atmospheric optical communication links (AOCL) channel parameters. Purpose. To develop and validate a unified methodology for assessing and compensating destabilizing impacts in hybrid FOL-AOCL systems based on a single quality criterion – bit error rate (BER) and quantum bit error rate (QBER). Method. The Jones-Mueller matrix formalism is applied for modeling polarization effects in FOL. A hybrid adaptive optics wavefront correction algorithm combining stochastic and gradient optimization phases is developed and experimentally validated for AOCL channels. Results. Lightning EM fields with currents of 80-100 kA at 100-300 m produce SOP change rates of 10^5-10^6 rad/s, violating DSP tracker operation and the QBER $\leq$ 11% condition for BB84 protocol. The hybrid correction algorithm increases fiber-coupled power from 0.33 to 2.3 mW, reduces WFE~rms~ from 0.63 to 0.12 μm, improves BER from 10^{-2} to 10^{-6}, and raises coupling efficiency from 0.1 to 0.6. The frequency condition for stable correction is established: the system frequency must exceed the turbulence frequency by a factor of at least 15. Application. Hybrid FOL-AOCL networks, 100G+ coherent transmission systems, UAV AOCL links, QKD systems with free-space segments. Conclusions. The isomorphism of compensation tasks in FOL and AOCL is demonstrated, enabling a unified functional stability methodology for hybrid optical telecommunication systems.

Keywords: *fiber-optic communication lines; AOCL channel; adaptive optics; wavefront correction; quantum key distribution; functional stability; BER; QBER; electromagnetic compatibility; atmospheric turbulence.*

References

[1] Cisco Systems, "Cisco Annual Internet Report (2018-2023) White Paper," 2020.
[2] O.S. Belova, D.V. Bolotov, S.Yu. Kazantsev et al., "Features of Functioning of Modern Communication Systems in the Presence of Thunderstorm Activity," *Technical Physics*, vol. 70, no. 5, pp. 135-142, 2025.
[3] O.V. Kolesnikov, Features of Lightning Effects on Optical Cables (in Russian), Moscow: Hot Line Telecom, 2024.
[4] S.A. Sokolov, Impact of External EM Fields on Optical Communication Cables (in Russian), Moscow: Hot Line Telecom, 2018.
[5] S.Yu. Kazantsev et al., "Applications of atmospheric optical communication at nuclear power facilities," *Advances in Applied Physics*, vol. 11, no. 6, pp. 530-539, 2023.
[6] I.V. Galaktionov, V.V. Toporovsky, O.V. Kolesnikov, "Optical link efficiency increase with UAVs using adaptive optics," *Trudy MAI*, no. 145, 2026.
[7] B. Wijerathne et al., "Mitigation of Atmospheric Effects in FSO Communication Systems: A Survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts*., vol. 25, no. 3, 2023.
[8] H. Kaushal, V.K. Jain, S. Kar, Free Space Optical Communication, Springer, 2024.
[9] O.S. Belova et al., "Influence of Atmospheric Electricity and Lightning on QKD Communication Systems," *Technical Physics Letters*, vol. 51, no. 2, pp. 43-47, 2025.
[10] V.A. Konyshev et al., "Influence of magnetic field on light polarization in optical fiber," *Quantum Electronics*, vol. 49, no. 8, pp. 773-778, 2019.
[11] V.A. Konyshev et al., "Influence of lightning strikes on coherent communication systems," *Applied Photonics,* vol. 7, no. 2, pp. 118-129, 2020.
[12] O.V. Kolesnikov, O.S. Belova, D.V. Bolotov, G.P. Paimtsev, "Faraday and Kerr effects in optical fiber under EM field of lightning currents," *Electrosvyaz*, no. 4, 2026.
[13] E.Y. Bushuev, S.E. Grychkin, E.P. Stroganova, "Impact of unintentional EM interference on QKD systems," *Electrosvyaz*, no. 1, pp. 2-10, 2026.
[14] O.V. Kolesnikov et al., "Classification of FOL by EM impact resistance," *WECONF,* 2026, St. Petersburg, 2026.
[15] I. Galaktionov, V. Toporovsky, "Performance Analysis of an Optical System for FSO Communications Utilizing Combined Stochastic Gradient Descent Optimization Algorithm," *Applied System Innovation*, 8(5), 143, 2025. https://doi.org/10.3390/asi8050143.
[16] V. Kandidov, A. Shlenov, "Atmospheric Turbulence Simulation. Grid Representation," Technical Summary; International Laser Center: Moscow, Russia, 1995.
[17] M. Vorontsov, V. Shmalhausen, "Principles of Adaptive Optics," Moscow: Nauka, 1985.
[18] V. Dudorov, V. Kolosov, G. Filimonov, "Algorithm for formation of an infinite random turbulent screen," In *Proceedings of the Twelfth Joint ternational Symposium on Atmospheric and Ocean Optics/Atmospheric Physics*, Tomsk, Russia, 27-30 June 2005. https://doi.org/10.1117/12.675235
[19] B. Platt, R.J. Shack, "History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing," Refr. Surg. 2001, 17, 15.
[20] J. Liang, B. Grimm, S. Goelz, J.F. Bille, "Objective measurement of the wave aberrations of the human eye with the use of a Hartmann-Shack wavefront sensor," *J. Opt. Soc. Am. A,* 1994, 11, 1949.
[21] R.G. Lane, "Wave-front reconstruction using a Shack-Hartmann sensor," *Appl. Opt*. 1992, 31, 6902.

[22] J. Primot, "Theoretical description of Shack-Hartmann wave-front sensor," *Opt. Commun.* 2003, 222, 81-92.
[23] R.G. Lane, A. Glindemann, J.C. Dainty, "Simulation of a Kolmogorov phase screen," *Waves Random Media*, 1992, 2, pp. 209-224.
[24] S.N. Khonina, S.G. Volotovskiy, M.S. Kirilenko, "A method of generating a random optical field using the Karhunen-Loeve expansion to simulate atmospheric turbulence," *Computer Optics,* 2020; 44(1), pp. 53-59. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-680
[25] F. Zernike, "Diffraction theory of the knife-edge test and its improved form, the phase-contrast method," *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1934, 94, pp. 377-384. https://doi.org/10.1093/mnras/94.5.377.
[26] F. Zernike, "Beugungstheorie des schneidenver-fahrens und seiner verbesserten form, der phasenkontrastmethode," *Physica,* 1934, 1, pp. 689-704. https://doi.org/10.1016/S0031-8914(34)80259-5.
[27] J. Schwiegerling, J. Greivenkamp, "Using corneal height maps and polynomial decomposition to determine corneal aberrations," *Optom. Vis. Sci. Off. Publ. Am. Acad. Optom.* 1997, 74, pp. 906-916. https://doi.org/10.1097/00006324-199711000-00024.
[28] J. Schwiegerling, J. Greivenkamp, J. Miller, "Representation of videokeratoscopic height data with Zernike polynomials," *JOSA A,* 1995, 12, pp. 2105-2113. https://doi.org/10.1364/JOSAA.12.002105.
[29] R.K. Tyson, Principles of Adaptive Optics, 5th ed., CRC Press, 2022.
[30] M.C. Roggemann, B. Welsh, Imaging Through Turbulence, CRC Press, 2018.
[31] M. Malik et al., "Direct generation of three-photon polarization entanglement," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 130, p. 040405, 2023.
[32] I. Galaktionov, V. Toporovsky, "A Multi-Deformable-Mirror 500 Hz Adaptive Optical System for Atmospheric Turbulence Simulation, Real-Time Reconstruction, and Wavefront Correction Using Bimorph and Tip-Tilt Correctors," *Photonics*, 12(6), 592, 2025. https://doi.org/10.3390/photonics12060592
[33] S.-K. Liao et al., "Satellite-to-ground quantum key distribution," *Nature*, vol. 549, pp. 43-47, 2023.
[34] E.Y. Bushuev et al., "Study of the influence of EM fields on FOL with quantum cryptographic equipment," *Electrosvyaz*, no. 5, pp. 12-19, 2025.

Information about authors:

Oleg V. Kolesnikov, *Ph.D., Associate Professor, Head of the Department of Optical and Quantum Communications, Dean of the Faculty of Network Engineering, Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Moscow, Russia. ORCID 0000-0002-8728-3458*

Maxim V. Tereshonok, *D.Sc., Professor, Head of Scientific Research, Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Moscow, Russia. ORCID 0000-0003-1330-281X*

Vladimir V. Toporovsky, *Senior Lecturer, Department of Optical and Quantum Communications, Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Moscow, Russia. ORCID 0000-0002-8172-5171*

Ilya V. Galaktionov, *Ph.D., Associate Professor, Department of Optical and Quantum Communications, Deputy Dean for Research, Faculty of Network Engineering, Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Moscow, Russia. ORCID 0000-0002-8993-3741*