

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛН

УДК 621.391.6; 535.361

Оптическая загоризонтная связь. Полевые, лабораторные и численные эксперименты в России в 2012–2022 гг.

**В.В. Белов[✉], М.В. Тарасенков, Е.С. Познахарев,
А.В. Федосов, В.Н. Абрамочкин***

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 15.05.2023 г.;
после доработки 22.06.2023 г.;
принята к печати 21.08.2023 г.

Приведен обзор выполненных в России работ, связанных с экспериментальными и теоретическими исследованиями по проблемам оптической связи вне пределов прямой видимости в воздушной и водной средах. Приводятся основные результаты полевых, лабораторных и численных экспериментов в ИК-, видимом и УФ-диапазонах длин волн. В лабораторных экспериментах в качестве рассеивающих сред использованы водно-глицериновая смесь и атмосферный воздух. В полевых экспериментах оптическая связь осуществлялась в приземном слое атмосферы, а также в искусственных и природных водоемах (в том числе в зимнее время через лед). Исследования выполнялись для компланарных и некомпланарных схем формирования каналов связи.

Ключевые слова: оптико-электронная загоризонтная (NLOS) связь, эксперименты, воздушная, водная среда, вероятность ошибки; optoelectronic non-line-of-sight (NLOS) communication, experiments, air, water medium, probability error.

Введение

Несмотря на то что первые работы, посвященные оптической связи на рассеянном излучении (non-light-of-sight, или NLOS-связь), были опубликованы более 50 лет назад (см., например, [1]), теоретические и экспериментальные исследования в этом направлении продолжают и, более того, их интенсивность не ослабевает. Ученые в Китае, США, Израиле, Индии, Канаде и других странах ставят различные вопросы, ответы на которые позволяют оценить области практического применения этого вида связи в атмосфере и под водой, определить условия, гарантирующие ее устойчивость, высокую надежность, доступность и т.д. В частности, рассматриваются вопросы, связанные с выбором типа модуляции (например, [2]), учетом конфигурации связи (с одним излучателем и одним набором приемников, со множеством излучателей или приемников), с использованием ретрансляторов (например, [3]) и т.п.

В России одна из первых теоретических работ по загоризонтной оптической связи была опубликована в 1977 г. В.М. Пожидаевым [4], а экспериментальная — в 2004 г. Б.В. Поллером [5]. С 2012 г. численные и экспериментальные исследования по проблемам NLOS-связи в атмосфере и водной среде осуществляются в нескольких регионах России, наиболее интенсивно и широко — в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (ИОА СО РАН), г. Томск. Численные эксперименты выполняются методом Монте-Карло, так же как это в основном делается зарубежными коллегами в теоретических исследованиях оптической NLOS-связи. Эксперименты проводятся в реальных условиях приземной атмосферы, в искусственных и естественных водоемах и в лабораторных условиях с модельными дисперсными средами и атмосферным воздухом.

Блок-схема типичной системы NLOS-связи приведена на рис. 1.

С точки зрения системного анализа любую из рассматриваемых оптико-электронных систем связи (ОЭСС) можно разделить на две части: передающую и внешний канал связи. При фиксированных характеристиках оптико-электронных блоков на рис. 1 выходные параметры ОЭСС будут зависеть от оптического состояния канала распространения излучения от источника до приемника.

* Владимир Васильевич Белов (belov@iao.ru); Михаил Викторович Тарасенков (tmv@iao.ru); Егор Сергеевич Познахарев (724_pes1992@iao.ru); Андрей Васильевич Федосов (fean.2010@yandex.ru); Владимир Николаевич Абрамочкин (ya.wna@yandex.ru).

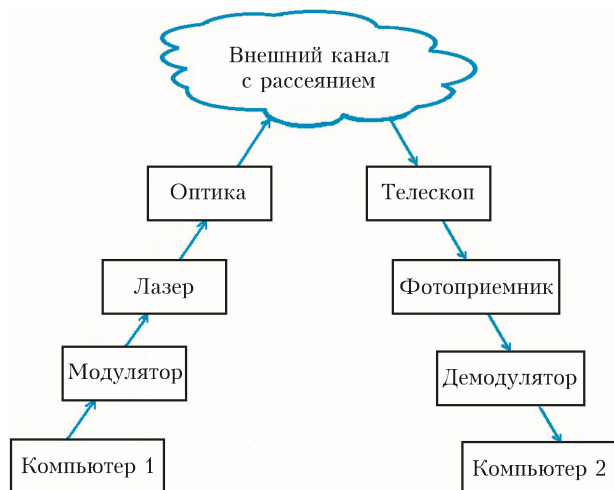


Рис. 1. Общая структурная блок-схема системы NLOS-связи

Как в атмосфере, так и в водной среде эти состояния могут варьироваться в широких пределах [6–10]. Очевидно, что дальность действия, стабильность, качество связи (например, вероятность ошибок и их СКО) определяются не только характеристиками аппаратуры (качество оптики, чувствительность фотоприемников, стабильность работы оптического источника и т.д.), но и оптическим состоянием канала, связывающего через рассеяние источник и приемник излучения. Поэтому при одинаковых аппаратных характеристиках оптические свойства канала связи могут приводить к ограничению дальности действия ОЭСС, повышению вероятностей ошибок и даже прерыванию или прекращению связи. Среди способов преодоления этих проблем будут управляемое снижение скорости передачи информационных потоков, повышение мощности излучения или спектральной чувствительности фотоприемников и т.д.

Какова роль полевых экспериментов в исследовании характеристик ОЭСС? Результаты, полученные при их выполнении, носят частный характер в силу изменчивости оптических характеристик, например, атмосферы. Кроме того, в настоящее время нет средств оперативного контроля оптического состояния внешних каналов связи. Эти факторы не позволяют исследовать в полном объеме в полевых условиях эффективность работы ОЭСС в зависимости от варьируемых характеристик исходных геометрических параметров схем формирования каналов связи. Тем не менее полевые эксперименты важны для доказательства реализуемости предлагаемых вариантов ОЭСС, а их результаты позволяют подтвердить или опровергнуть выводы из численных экспериментов и поставить перед теоретиками новые вопросы.

1. Численные эксперименты

Теоретическое исследование передаточных свойств загоризонтных каналов ОЭСС выполняется в рамках теории переноса коротковолнового излучения в рассеивающих и поглощающих средах (ка-

ковыми являются атмосфера и водные среды) и теории анализа линейных систем.

Уравнение переноса излучения (УПИ) устанавливает связь между интенсивностью светового потока в среде в заданных точке и направлении с оптическими характеристиками среды. В интегро-дифференциальной форме УПИ имеет вид

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I}{\partial t} + (\omega, \text{grad} I) = -\beta_{\text{ext}} I + \beta_{\text{sc}} \int_{\Omega} I(\mathbf{r}, \omega') g(\mathbf{r}, \omega, \omega') d\omega' + \Phi_0(\mathbf{r}, \omega), \quad (1)$$

где $I = I(\lambda, \mathbf{r}, \omega, t)$ — интенсивность оптического излучения в точке $\mathbf{r}$ в направлении ω ; c — скорость света; $\beta_{\text{ext}}(\lambda, \mathbf{r})$ — коэффициент ослабления излучения в точке $\mathbf{r}$; $\beta_{\text{sc}}(\lambda, \mathbf{r})$ — коэффициент рассеяния света в точке $\mathbf{r}$; $g(\lambda, \mathbf{r}, \omega, \omega')$ — индикатриса рассеяния в точке $\mathbf{r}$ в направлении ω ; ω' — направление распространения излучения до рассеяния; Φ_0 — функция источников в точке $\mathbf{r}$ в направлении ω ; λ — длина волны излучения.

Это уравнение решается при заданных начальных и граничных условиях, соответствующих конкретной схеме ОЭСС. Аналитического общего решения УПИ не существует, поэтому используется численный метод его решения, в нашем случае это метод Монте-Карло [11]. Для анализа внешнего канала связи и ОЭСС можно применить теорию линейных систем. Целью решения уравнения (1) будет определение импульсной передаточной характеристики, или импульсной реакции, системы $h(t)$ на входной $\delta(t)$ -импульс [12].

На основе алгоритма модифицированной двойной локальной оценки нами была создана программа моделирования импульсных реакций атмосферных и подводных NLOS-каналов ОЭСС методом Монте-Карло [13]. Геометрическая схема ОЭСС, для которой было выполнено моделирование функций $h(t)$, изображена на рис. 2. Под компланарной схемой

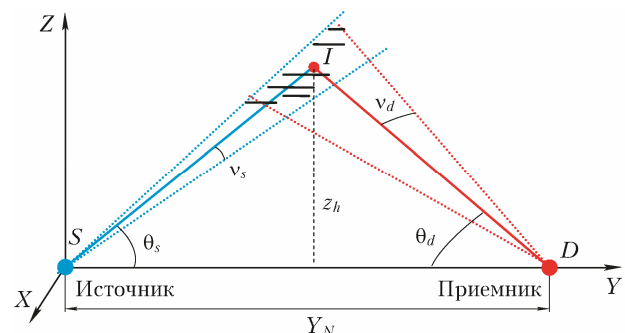


Рис. 2. Геометрическая схема компланарной ОЭСС, для которой сравниваются алгоритмы [15]: S — источник; D — приемник; Y_N — базовое расстояние от источника до приемника; θ_s — угол между направлением оптической оси источника и горизонталью; v_s — угол расходимости источника; θ_d — угол между направлением оптической оси приемника и горизонталью; v_d — угол поля зрения; z_h — высота точки пересечения оптических осей источника и приемника

ОЭСС понимается схема, при которой ось поля зрения приемника и оптическая ось излучателя лежат в одной плоскости.

В нашей работе [13] предложен модифицированный алгоритм двойной локальной оценки. Выполнено сравнение трудоемкости трех алгоритмов статистического моделирования многократно рассеянной части импульсной реакции канала NLOS-связи: классического алгоритма двойной локальной оценки [11], комбинированной оценки [14] и предлагаемого алгоритма. Показано, что трудоемкость нашего алгоритма значительно меньше, чем конкурентов (в среднем в 5 раз по сравнению с алгоритмом двойной локальной оценки и в 5,9 раза — с алгоритмом комбинированной оценки), при оптической длине линии связи $\tau_{SID} \leq 1$. Это обеспечивает, соответственно, в среднем в 2,2 и 2,4 раза меньшую погрешность вычислений нашим алгоритмом по сравнению с конкурирующими при одинаковом времени, затраченном на расчеты. Отметим, что созданный нами алгоритм может использоваться для моделирования импульсных реакций в задачах бистатистического зондирования атмосферы и водных сред.

1.1. Атмосфера

Обратимся к основным результатам работ [16, 17], в которых анализируются загоризонтные ОЭСС, работающие в приземном слое атмосферы, когда источник и приемник излучения расположены на земной поверхности на расстоянии Y_N (см. рис. 2) между ними, называемом базовым. В [15] рассмотрена система NLOS-связи, геометрическая схема которой приведена на рис. 2. Для упрощения задачи она соответствует случаю, когда плоскость SID перпендикулярна земной поверхности. На земной поверхности располагается $\delta(t)$ -импульсный источник лазерного излучения с угловой расходимостью v_s , положение оси которого задано углом θ_s . На базовом расстоянии от источника Y_N размещается приемник с углом поля зрения v_d , ось которого ориентирована в направлении, заданном углом θ_d . В [17] определены характеристики ФЭУ УФК-4Г-4 из [18], которые использовались в численных экспериментах. Они приведены в табл. 1.

Таблица 1
Характеристики ФЭУ УФК-4Г-4 [18]

λ , нм	Σ_k , мА/Вт	λ , нм	Σ_k , мА/Вт
200	30	300	52
210	36	310	50
220	45	320	49
230	51	330	48
240	53	340	47
250	54	350	42
260	54	360	25
270	54	370	7
280	53	380	3
290	53	390	1

Примечание. Σ_k — спектральная чувствительность фотокатода.

Оптические характеристики приземного слоя атмосферы, при которых моделировалась функция $h(t)$ с помощью генератора оптических моделей, построенного на основе LOWTRAN-7 [19], даны в табл. 2.

Таблица 2
Оптические параметры приземного (0–1 км) слоя атмосферы, используемые в расчетах

λ , мкм	S_M , км	σ_{ta} , км ⁻¹	σ_{sa} , км ⁻¹	σ_{tm} , км ⁻¹	σ_{sm} , км ⁻¹
0,3	10	0,6610	0,6200	0,16500	0,1400
0,3	50	0,1130	0,1060	0,16500	0,1400
0,5	10	0,4330	0,4100	0,01660	0,0165
0,5	50	0,0744	0,0700	0,01660	0,0165
0,9	10	0,2150	0,1960	0,13694	0,0015
0,9	50	0,0367	0,0334	0,13694	0,0015

Примечание. σ_{ta} — коэффициент аэрозольного ослабления; σ_{sa} — коэффициент аэрозольного рассеяния; σ_{tm} — коэффициент молекулярного ослабления; σ_{sm} — коэффициент молекулярного рассеяния; S_M — метеорологическая дальность видимости.

Анализ результатов, приведенных в [16, 17], показывает, что на коротких базовых расстояниях ($Y_N < 2–3$ км) наибольшая мощность принимаемого излучения при одинаковых прочих условиях достигается при $\lambda = 300$ нм. При больших базовых расстояниях и низкой мутности среды этот максимум наблюдается для $\lambda = 500$ нм. При высокой мутности среды и базовых расстояниях 3–10 км он достигается также для $\lambda = 500$ нм, но если $Y_N > 10$ км, то при $\lambda = 900$ нм. Проведенные расчеты импульсных реакций позволяют оценить дальное действие системы связи и максимальную частоту следования импульсов, которую не ограничивает атмосферный канал связи. В рассмотренной в [16] модели оптико-электронной системы NLOS-связи возможна передача информации на базовые расстояния до 40 км при $\lambda = 500$ нм, $S_M = 10$ км с частотой ν_{max} от $8,3 \cdot 10^5$ до $3,3 \cdot 10^7$ Гц и на базовые расстояния до 200 км при $\lambda = 500$ нм, $S_M = 50$ км с частотой ν_{max} в диапазоне от $5 \cdot 10^5$ до $3,3 \cdot 10^7$ Гц, что согласуется с результатами полевых экспериментов по загоризонтной оптической связи на рассеянном лазерном излучении.

Выполненные расчеты вероятности регистрации ошибочных символов, приведенные в [17] для УФ-диапазона в дневных и ночных условиях, показали, что при организации такого вида оптической связи днем предпочтительно использовать излучение на $\lambda = 295$ нм, чем на других длинах волн из этого диапазона, а ночью — на $\lambda = 395$ нм.

1.2. Атмосферная связь с БПЛА

В работе [20] обсуждаются результаты численных экспериментов, выполненных для анализа характеристик атмосферной NLOS-связи между наземным источником информации и приемником на борту беспилотного летательного аппарата (БПЛА) (рис. 3). Статистические эксперименты

с использованием метода Монте-Карло выполнены для приземного слоя атмосферы в диапазоне длин волн от 200 до 750 нм с шагом $\Delta\lambda = 10$ нм при $S_M = 1, 10$ и 50 км.

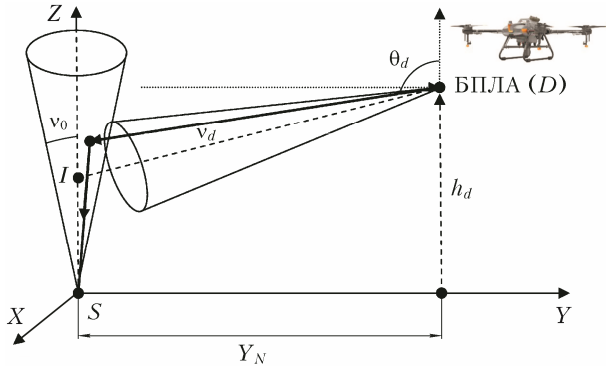


Рис. 3. Геометрическая схема численных экспериментов по NLOS-связи в атмосфере между БПЛА (приемник) и источником на земной поверхности [20]: v_0 — угол расхождения излучения источника; θ_d — угол между направлением оптической оси приемника и вертикалью; h_d — высота расположения БПЛА

Основные результаты, полученные в этих численных экспериментах, сводятся к следующему. В зависимости от угла ориентации оси оптического пучка θ_d оптимальные условия связи (с точки зрения минимального ослабления излучения в канале) реализуются при $\theta_d = 94,5^\circ$. С ростом расходимости излучения источника v_d , с одной стороны, увеличивается мощность принимаемого импульса, с другой — существенно увеличивается его длительность. Последнее может привести к повышению вероятностей ошибок или даже к срыву связи. При $\theta_d = 90^\circ$, $Y_N = 1$ км для $\lambda > 700$ нм наименьшее ослабление полезного сигнала следует ожидать при $S_M = 1$ км, для $\lambda = 400\text{--}550$ нм — при $S_M = 10$ км, а для $\lambda = 200$ нм — при $S_M = 50$ км. Для рассмотренных характеристик приемопередающей системы и дневных условий наилучшей длиной волны с точки зрения максимального значения отношения сигнал/шум является $\lambda = 285$ нм. Однако максимально достижимая скорость передачи информации на этой длине волны будет меньше, чем на больших длинах волн.

1.3. Подводная связь

Результаты моделирования процесса переноса оптических сигналов в подводных ОЭСС методом Монте-Карло обсуждаются в [21]. На рис. 4 приведена геометрическая схема канала NLOS-связи, которая рассматривалась в этой работе.

Моделирование осуществлялось в предположении, что форма лазерного импульса источника прямоугольная, его длительность 30 нс, мощность в импульсе $P_0 = 1$ Вт, площадь апертуры приемника $0,01$ м². Расчеты импульсной реакции этого канала подводной оптической связи выполнялись для следующих оптико-геометрических условий: $Y_N = 10$;

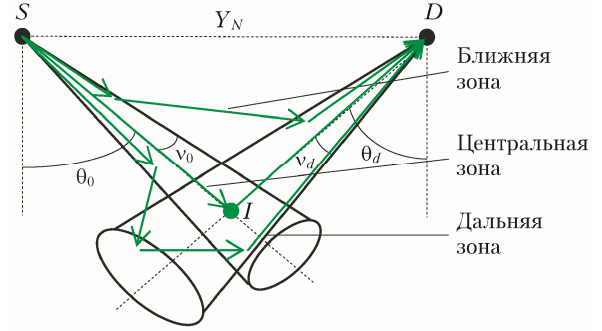


Рис. 4. Схема формирования канала подводной оптической связи на рассеянном излучении (вид сверху) [21]: θ_d — угол между направлением оптической оси приемника и перпендикуляром к направлению на источник; θ_0 — угол между оптической осью источника и перпендикуляром к направлению на приемник

20; 30; 40; 50; 100 м; $\theta_0 = 0; 30; 45; 85^\circ$; $\theta_d = 30; 45; 85^\circ$; $v_0 = 0,0034^\circ$; $v_d = 2^\circ$. Для каждой рассмотренной ситуации моделировалось 30 пачек по 10^8 траекторий (всего $3 \cdot 10^9$ траекторий). Результаты расчетов показали, что для реализации этого варианта связи на $\lambda = 500$ нм при глубине видимости 30 м на базовых расстояниях 10–100 м и при широком наборе направлений ориентаций оптических осей источника и приемной системы необходимо, чтобы предельная мощность излучения, регистрируемая приемником, отличалась от мощности излучения источника не менее чем на 150 дБ. В этом случае максимальное количество передаваемых и принимаемых импульсов (с вероятностью не выше заданной) будет лежать в пределах от $3 \cdot 10^6$ до $2 \cdot 10^7$ Гц.

2. Полевые и лабораторные эксперименты

Результаты полевых экспериментов по атмосферным NLOS-линиям связи в видимом и УФ-диапазонах длин волн приведены и обсуждаются в [22–29]. Типичная упрощенная блок-схема ОЭС NLOS-связи приведена на рис. 1.

Качество связи в экспериментах будем описывать средним значением и среднеквадратическим отклонением (СКО) ошибок за сеанс связи. Проще осуществить расчет этих характеристик на основе анализа графической тестовой информации. Предложенная нами в [23] процедура оценки вероятности ошибок связи и их СКО в реальном времени сводится к следующему.

Пусть Z_i — переданный символ, z_i — принятый. Будем считать, что

$$x_i = \begin{cases} 0, & \text{если } Z_i = z_i; \\ 1, & \text{если } Z_i \neq z_i. \end{cases}$$

Пусть в сеансе связи передано N символов, причем

$$N = \sum_{j=1}^m n_j,$$

т.е. принятый ряд символов разбит на m пачек по n_j символов в каждой. Будем считать случайной величиной среднее количество ошибочно принятых символов

$$y_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} x_i.$$

Тогда средняя вероятность ошибки приема информации по каналу за сеанс связи

$$\bar{y} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_j,$$

а среднее квадратичное отклонение

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_i^2 - \bar{y}^2}.$$

2.1. Атмосферные полевые эксперименты

В 2013–2016 гг. в летне-осенний период была проведена серия полевых экспериментов с целью оценки возможности и качества приема информации по загоризонтным оптическим каналам связи при различных атмосферных условиях и вариациях геометрических параметров приемопередающей схемы ОЭСС. Эксперименты выполнялись на атмосферных трассах в Томской области. Карта-схема этих экспериментов из [27] приведена на рис. 5. В качестве источника излучения использовался лазер на парах брома меди [30], созданный в ИОА СО РАН, со следующими характеристиками: $\lambda = 510,6$ нм, частота повторения импульсов 11–14 кГц, длительность импульса $\Delta t = 30$ нс, средняя мощность $P = 4$ –14 Вт, диаметр пучка на входе в атмосферу $\varnothing = 15$ мм; расходимость излучения $\Delta v = 0,06$ мрад. Угол поля зрения приемного телескопа в экспериментах составлял $FOV = 2^\circ$. Использовался фотоприемник ФЭУ-84 или ФЭУ УФК-4Г-2. Оптическая ось телескопа в основном пересекала оптическую ось лазерного пучка, и ее наклон относительно горизонтальной плоскости задавался углом α . Мобильная приемная оптико-

электронная система могла размещаться в любой доступной для автотранспорта точке. Передающая ОЭС располагалась в северной башне блока «А» ИОА СО РАН (точка **S** на рис. 5) на высоте $h_0 = 13$ м от земной поверхности и 173 м н.у.м. Направление оси лазерного пучка определялось углом места $5^\circ < \theta < 15^\circ$ и азимутальным углом $-10^\circ < \varphi < +10^\circ$ в горизонтальной плоскости относительно направления на приемную ОЭС. Во время проведения экспериментов в 2013 г. средняя мощность лазерного источника излучения составляла 4 и 6 Вт, в 2016 г. – 8,5 и 14 Вт.

В экспериментах измерялся интервал времени между излучаемым лазерным и синхронимпульсом. Именно этот вид модуляции излучения (временн-импульсная модуляция [31], или digital pulse interval modulation (DPIM)) используется в лабораторных макетах ОЭСС в ИОА СО РАН. Первые успешные полевые эксперименты были осуществлены в 2013 г. при базовом расстоянии 9,9 км (цифра 1 на рис. 5). Основные эксперименты проводились при расположении приемной системы за р. Томью на базовых расстояниях 12, 26 и 69,8 км (цифры 2, 3 и 4). Эксперименты выполнялись с августа по октябрь в темное время суток в условиях облачности (отдельные облачные образования, сплошная облачность), безоблачной атмосферы и осадков (дождь). Для оценки качества связи в качестве информации, передаваемой по атмосферному NLOS-каналу, использовалось изображение графического тестового сигнала в виде периодической треугольной (без горизонтального катета) структуры. На рис. 6 приведен пример такого изображения, принятого с ошибками (вертикальные линии).

Контроль состояния атмосферного канала оптической связи на рассеянном излучении осуществить в полевых условиях практически невозможно. Поэтому для анализа влияния оптических и метеорологических условий на качество работы ОЭСС использовались следующие параметры. Метеорологическая дальность видимости S_M измерялась с интервалом в 1 ч на территории Базового экспериментального комплекса ИОА СО РАН, удаленного от точки **S** (см. рис. 5) на расстояние 12 км. Диапазон измерений S_M ограничивался сверху значением 30 км.

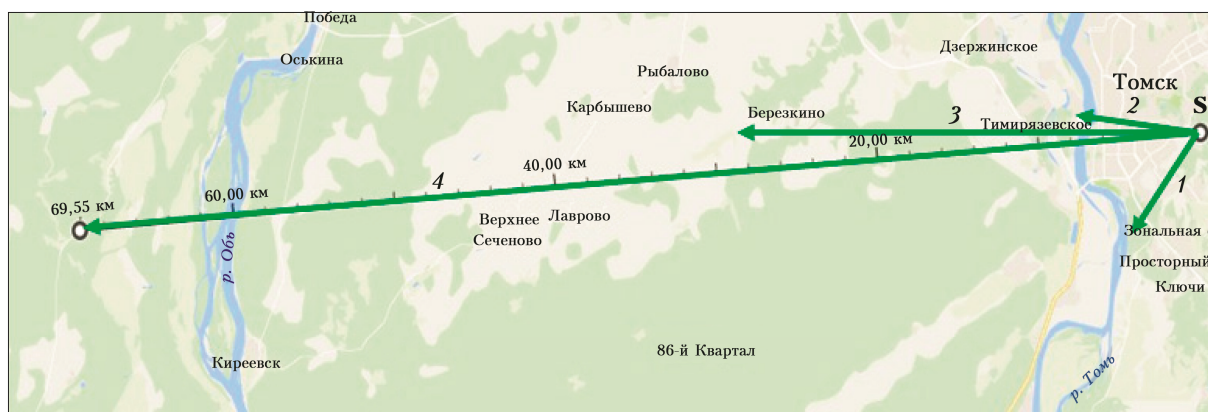


Рис. 5. Схема направлений (стрелки) лазерного луча и точек размещения приемной ОЭС в экспериментах 2013–2016 гг.

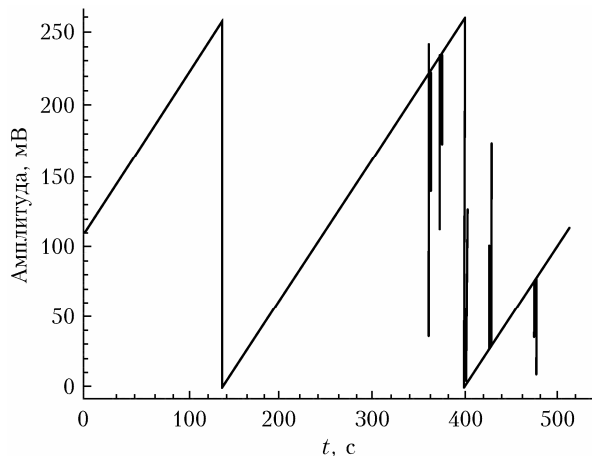


Рис. 6. Изображение графического тест-объекта, принятого через NLOS-канал с рассеянием

Давление, влажность, концентрация аэрозоля (с размерами частиц более 300 нм) измерялись на ТОР-станции [32], размещенной на Высотной станции ИОА СО РАН (находится на расстоянии 400 м от источника лазерного излучения). Коэффициент аэрозольного ослабления β_{ext}^a атмосферы на $\lambda = 500$ нм определялся на горизонтальной трассе (начинающейся от здания, где размещался передающий лазер ОЭСС) с помощью аппаратуры и по методике, описанным в [33–35].

Полевые эксперименты, выполненные в 2013–2016 гг. с целью оценки возможности и качества передачи информации по атмосферным загоризонтным ОЭСС в видимом и УФ-диапазонах длин волн, позволили сформулировать следующие общие и частные выводы.

Оптико-электронная связь в видимом диапазоне длин волн может устанавливаться в условиях как облачной, так и безоблачной атмосферы. При наличии облачности связь осуществляется через области вхождения и рассеяния лазерного излучения на нижней границе сплошной облачности или на нижней и боковой границах одиночных облаков. Анализ влияния оптического и метеорологического состояния атмосферы на статистические характеристики качества связи на $\lambda = 510,6$ нм показал, что в схемах загоризонтной связи, когда лазерный луч приемной системой перехватывается в приземном слое атмосферы, качество связи определяется рассеянием излучения, которое зависит в основном от содержания в атмосфере аэрозоля. Максимальная база, при которой возможна устойчивая связь с вероятностью ошибок на уровне 0,1, может превышать 70 км. Это согласуется с результатами численных экспериментов.

Полевые эксперименты подтвердили возможность создания и качественного функционирования многоадресных ОЭСС в УФ-диапазоне длин волн с дальностью действия, превышающей сотни метров [28, 29]. Эти эксперименты были проведены с установкой, соответствующей схеме на рис. 1, но при включении в ее состав ВВО кристалла для преобразования видимого излучения в УФ.

Представляет интерес сравнение качества связи в видимом и УФ-диапазонах длин волн. Для этого обратимся к работам [25–27], в которых приведены примеры оценок вероятностей ошибок и их СКО, полученных в полевых условиях в видимом диапазоне длин волн. Из сравнения этих результатов с приведенными в [28, 29] следует, что дальность действия связи в видимом диапазоне существенно выше, чем в УФ. Казалось бы, УФ-диапазон предпочтительнее для качественной связи, так как помехи солнечного излучения в этом случае существенно ниже. Однако если учесть, что эксперименты проводились в сумерках, мощность лазерного излучения в видимом диапазоне превосходила более чем в 15 раз мощность УФ-источника и применялись различные ФЭУ, то результат сравнения не может вызывать особых сомнений. Тем не менее удалось реализовать NLOS-связь на базовых расстояниях до 3 км при $P \leq 300$ мВт. Оптико-электронная связь в УФ-диапазоне возможна как при ориентации оптической оси приемной системы в направлении на источник с углами к горизонту более 10° , так и в направлении от источника до углов наклона оси оптической приемной системы к горизонту до $30\text{--}40^\circ$ при базовых расстояниях до десятков километров (при соответствующей мощности источника излучения).

2.2. Некомпланарные схемы связи. Лабораторные и полевые эксперименты

В 2020 г. мы провели подводные эксперименты, в которых связь осуществлялась по компланарной и некомпланарной схемам. Будем считать некомпланарными схемами связи не только те, в которых оптические оси лазерного пучка и поля зрения приемника не лежат в одной плоскости, но и те, в которых регистрируемый сигнал не содержит однократно рассеянного излучения. Обращение к некомпланарной схеме позволяет оценить условия, при которых связь возможна, и насколько ее качество ухудшается, если реализовать компланарную связь невозможно.

Полевые эксперименты были проведены на оз. Боярское в окрестности г. Томска с макетом подводной NLOS-системы, описанной в [36]. Время проведения — зима и весна, когда толщина льда достигала 50 см. Цель экспериментов состояла в том, чтобы по уровню ошибок связи и их СКО оценить влияние некомпланарности на качество связи, в том числе при ее осуществлении через лед. В качестве источника лазерного излучения на $\lambda = 450$ нм использовался полупроводниковый модуль В2000, который был переведен в управляемый импульсный режим с частотой модуляции 14 кГц, $P = 13\text{--}20$ мВт. Он погружался на глубину 5,8 м. Приемный телескоп размещался на поверхности льда на расстоянии L от лунки, в которую опускался источник, и ориентировался перпендикулярно верхней границе льда или погружался в лунку на глубину 10–120 см от нижней кромки льда. Ориентация оптической оси приемника при этом задавалась ази-

мутальным углом φ и углом θ (угол между осью и горизонтальной линией). Угол φ отсчитывается от плоскости, перпендикулярной поверхности льда, проходящей через центры лунок, в которые погружались источник и приемник. При $\varphi = 0^\circ$ оптическая ось приемника ориентировалась на лазерный луч и реализовывалась компланарная схема организации связи.

Результаты экспериментов показали, что с увеличением L и φ вероятность ошибок связи p возрастает, и тем быстрее, чем больше L . При $L = 5$ м связь «пропадает» уже при $\varphi > 90^\circ$. Причина такой зависимости $p = p(\varphi, L)$ в том, что с увеличением расстояния от оси лазерного пучка интенсивность рассеянного излучения, как отмечено выше, уменьшается из-за его поглощения в воде. Однако только этим объяснить такую зависимость, видимо, нельзя, если учесть, что в нашем случае приемник располагался близко к нижней поверхности льда ($h = 10$ см) и его оптическая ось была параллельна ей ($\theta = 0^\circ$). Поэтому следует учитывать влияние отражения и переотражения излучения ото льда на регистрируемые световые потоки — эта одна из задач, которая может быть решена теоретически.

У ИОА СО РАН есть возможность проводить лабораторные эксперименты по оптической связи в Большой аэрозольной камере (БАК) объемом 1860 м^3 . Геометрические схемы экспериментов, выполненных в камере в 2020 г., совпадают со схемами, использованными в полевых экспериментах. В камере можно создавать различные модельные рассеивающие и поглощающие среды. Мы использовали водно-глицериновую смесь, создаваемую с помощью генератора частиц тумана LEXOR LM50003. В экспериментах с помощью измерителя [37] контролировалось значение коэффициента ослабления среды.

На рис. 7 приведены геометрические схемы экспериментов в аэрозольной камере.

Фиксированные характеристики геометрической схемы экспериментов: $\nu_0 = 1^\circ$; $\varphi_s = 0^\circ$; $\nu_d = 2^\circ$; $L = 23,3$ м; $\theta_s = 15^\circ$. Варьируемые параметры: $\varphi_d = 0; 7,5; 15^\circ$; $\theta_d = 0; 10; 20^\circ$. Высоты расположения источника и приемника излучателя относительно пола аэрозольной камеры были различны, что исключало реализацию LOS-связи (рис. 7, б).

Если сравнить результаты полевых подводных экспериментов с полученными в БАК с модельной рассеивающей средой, то основное их различие состоит в том, что базовые расстояния, при которых устанавливалась связь под водой, значительно меньше тех, что были реализованы в БАКе. Это можно объяснить тем, что поглощение оптического излучения в воде существенно выше, чем в водно-глицериновой смеси. В то же время зависимости ошибок связи $p = p(\theta_d, \varphi_d)$ для этих сред аналогичны.

Эксперименты показали, что при $\theta_d = 0^\circ$ и $\varphi_d = 0^\circ$ вероятности ошибок связи значительно выше, чем при других углах. С нашей точки зрения, объяснить это можно следующим образом. Источником полез-

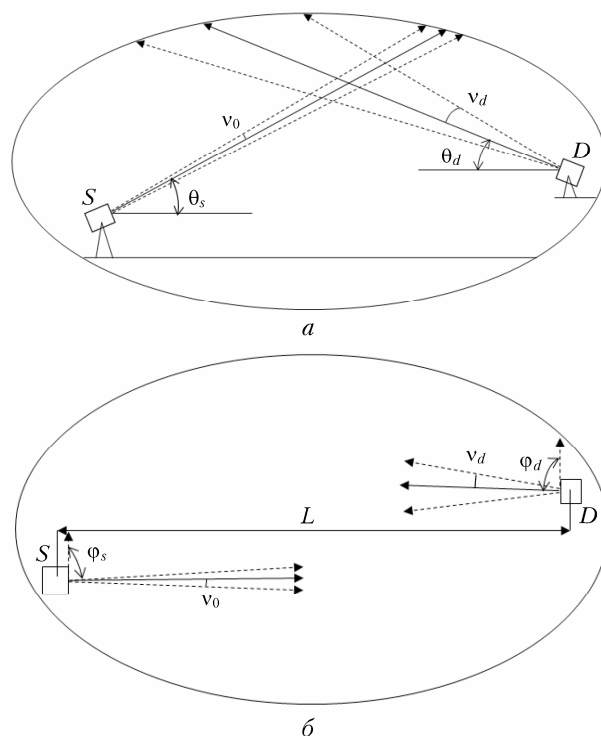


Рис. 7. Геометрические схемы лабораторных экспериментов, выполненных в БАК ИОА СО РАН: а — вид сбоку; б — вид сверху; θ_s — угол между направлением оптической оси источника и горизонталью; θ_d — угол между направлением оптической оси приемника и горизонталью; φ_s — азимутальный угол оптической оси источника; φ_d — азимутальный угол оптической оси приемника; L — расстояние между проекциями точек S и D на горизонтальную ось

ного сигнала в NLOS коммуникационных схемах является рассеянное, в том числе многократно, излучение. Объемное «тело» яркости этого излучения формируется вокруг лазерного пучка. Для простоты рассуждений предположим, что рассеивающая и поглощающая среды однородны. Тогда форма этого «тела» яркости будет представлять собой конус вращения с размытой внешней поверхностью. Приемник регистрирует излучение, исходящее из некоторой области этого объемного источника. Оно будет зависеть не только от поля зрения приемника, но и от интенсивности излучения, исходящего из объемного источника, рассеянного вокруг лазерного пучка в направлении на приемник. Из экспериментов в полевых условиях в воде следует, что увеличение азимутального угла φ (переход от компланарной к некомпланарной схеме связи) и угла места θ приводит к нелинейному возрастанию ошибок связи. Связь через лед возможна, но ее качество нелинейно ухудшается при увеличении расстояния между оптическими осями источника и приемника излучения. Лабораторные эксперименты подтверждают вывод о том, что устойчивая некомпланарная связь возможна при ориентации оптических осей приемника и излучателя в пределах $\theta = 10\text{--}15^\circ$ и $\varphi < 15^\circ$.

2.3. Подводная и подледная NLOS-связь

Основные подводные эксперименты были выполнены на искусственном водоеме и оз. Боярское в окрестностях г. Томска весной, летом, осенью и зимой (включая случай связи через лед). Их результаты описаны в работе [38].

В искусственном открытом водоеме (бассейн) размером $6 \times 3 \times 2$ м эксперименты проводились в апреле с мобильным лазером на парах бромида меди (рис. 8) и в октябре с использованием лазерного модуля В2000. Во время экспериментов варьировались глубина погружения в воду лазерного луча (от 0,1 до 1,0 м) и ориентация оси приемной ОЭС на «облако» рассеянного излучения. Вариации этих параметров приводили к изменению протяженности линий связи в бассейне от 6 до 9 м. Под геометрической протяженностью l линии связи понимаем сумму отрезков осей приемной и передающей оптических систем до точки их пересечения. Эксперименты осуществлялись как в невозмущенной водной среде, так и при ее интенсивном механическом перемешивании, приводящем к появлению волн на ее поверхности и турбулентному перемешиванию воды. При перемешивании воды заметного визуального повышения мутности не наблюдалось.

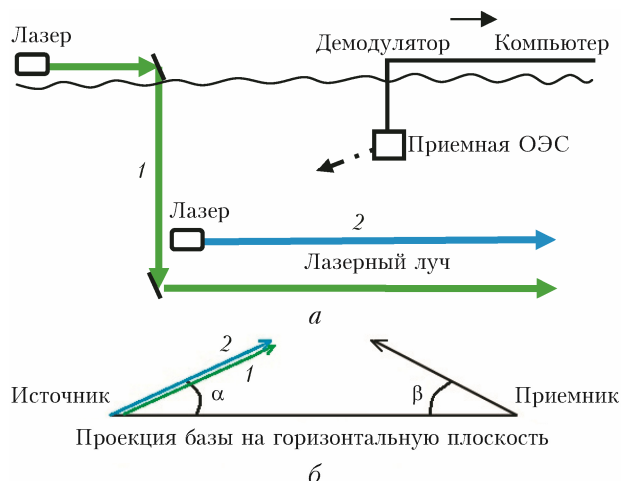


Рис. 8. Геометрические схемы подводной NLOS-связи: а — вид сбоку; б — вид сверху; зеленый лазер (1) размещался на берегу озера; синий лазер (2) — в воде

Для оценки оптических условий проведения экспериментов в воде необходимо знать характеристики, определяющие процесс взаимодействия оптического излучения с водой, в частности спектральную прозрачность воды. Авторы [10] обращают внимание на тот факт, что в научной отечественной литературе обсуждаются результаты исследований этой характеристики на основе определения относительной прозрачности по белому диску Секки. Эта методика характеризуется значительной погрешностью измерений (20% и более). В литературе приведено мало информации об оптических свойствах водных объектов (в частности озер) в Сибири. В работе [10] исследована спектральная прозрачность озер Алтайского края с помощью объективного спек-

трофотометрического метода. На основе информации из этой работы можно предположить, что характеристики оз. Боярское в Томской области близки к таковым в оз. Лапа Алтайского края (озеро-старица, расположено в окрестности г. Барнаула, непроточное). Можно предполагать, что оз. Боярское тоже имеет эвтрофный трофический статус.

Результаты измерений спектральных коэффициентов ослабления воды оз. Лапа [10, 39] использовались для грубой оценки уровня оптических протяженностей линий связи, которые реализовывались и исследовались в наших экспериментах. Оптическая длина линий связи в искусственном водоеме находилась в пределах $25 < \tau < 70$. В экспериментах на оз. Боярском геометрическая протяженность линий связи варьировалась от 11 до 15 м, что соответствовало оптическим длинам $88 < \tau < 120$. Полевые эксперименты, выполненные в 2015 г. по NLOS-схеме с источниками излучения средней мощностью до 20 мВт на искусственном и естественном водоемах с целью оценок качества связи (на основе контроля вероятностей ошибок связи и их СКО), позволяют сделать следующий вывод. При размещении источников и приемников излучения в воде реализовывались наиболее благоприятные (по сравнению с вариантами приемник в воде/источник вне и наоборот) условия для передачи информации с наименьшими вероятностями ошибок, не превышающими 1–2%; механическое перемешивание воды не приводило к существенным изменениям вероятностей ошибок.

Отметим, что возможности оптической подводной связи ограничены оптическим состоянием водной среды. Например, наши попытки осуществления связи с тем же лабораторным макетом ОЭСС на оз. Березовское на базовом расстоянии 5 м не удалось из-за очень мутной воды.

Результаты экспериментов позволяют предполагать, что возможно создание NLOS ОЭСС, эффективно функционирующих в воде и смешанных средах (вода — атмосфера, атмосфера — вода, в том числе через лед) с длиной линий связи от нескольких десятков до сотен метров.

3. Повышение надежности, устойчивости и эффективности аппаратных реализаций NLOS-связи

Параллельно исследованию влияния оптико-геометрических параметров атмосферных и подводных каналов связи на рассеянном оптическом излучении на качество работы ОЭСС (в рассмотренных выше в работах [13, 15, 20–29, 36, 38]) в России в 2012–2022 гг. достаточно интенсивно велся поиск методов и средств повышения надежности, устойчивости и эффективности аппаратных реализаций этих ОЭСС [40–50]. Наиболее значимые, с нашей точки зрения, результаты опубликованы в работах сотрудников Института лазерной физики СО РАН в соавторстве с коллегами из Новосибирского технического университета и Института кинетики

и горения СО РАН [40–45]. Если в работах до 2013 г. [41, 42] в основном рассматривались теоретические предпосылки соответствующих разработок, то в последние годы [43–49] были предложены оригинальные инженерные решения, особенно касающиеся обеспечения устойчивой и надежной связи с движущимися БПЛА и космическими аппаратами.

Работы [43, 44] посвящены исследованию фотостойчивости планарно-волоконных структур в виде пленок толщиной 600–800 мкм из особо чистого полиметилметакрилата и акриловой смолы, в том числе при длительном УФ-облучении. К торцам пленок присоединялись волоконные световоды, с выходов которых измерялась мощность излучения люминесценции в зависимости от мощности и времени УФ-облучения. Показана перспективность применения люминофоров типа Coimagin в планарно-волоконных структурах в УФ-информационных системах в качестве приемных антенн для оптических телекоммуникаций. Подчеркивается, что полимерные пленочные и волоконные люминофорные преобразователи — люминесцентные антенны — открывают значительные перспективы для построения более совершенных УФ-информационных сенсорных и телекоммуникационных систем. В отличие от линзовых и рефлекторных оптических элементов они имеют большие площади и углы поля зрения и меньший вес. За счет полного внутреннего отражения УФ-излучений от люминофоров в пленке или волокне происходит концентрация сигнала на выходных торцах, которые могут быть подключены к фотоприемникам или оптическим кабелям.

В [45] приведены результаты исследования оптических характеристик многолучевого УФ-излучателя на матрице 3×3 УФ-светодиодов с углом расходимости луча $0,33^\circ$ и углом расходимости всех лучей 6° в условиях высокогорной атмосферы. Распределение УФ-импульсов на закрытой трассе оказалось близким к логнормальному. Эксперименты на трассах обсерватории «Кайтанак» в Республике Алтай показали, что с увеличением высоты расположения трассы связи увеличивается уровень прямого УФ-сигнала, а уровень рассеянного УФ-сигнала уменьшается.

Решения некоторых проблем, связанных с устойчивостью и надежностью систем связи на рассеянном оптическом излучении, предлагаются и в работах других авторов [46–52], но в них отсутствует информация о практической реализации ОЭСС, а содержатся предложения о способах и методах повышения эффективности их функционирования. Например, в публикации [46] с целью уменьшения влияния природных факторов на работу системы связи предлагается ввести в нее два пространственных канала с приемом рассеянного излучения от двух разнесенных в пространстве источников. Для увеличения мощности УФ-излучения в [47] (Дальневосточный федеральный университет) предлагается использовать в ОЭСС достаточно эффективные и малогабаритные полупроводниковые фотодиоды и светодиоды. В [48] авторы из АО «Южморгеология» и Южного государственного университета

анализируют возможности осуществления оптической связи в морской воде и приводят ее оптические характеристики. Авторы [49] обсуждают проблемы разработки методики масштабного физического моделирования системы УФ-С-связи, позволяющей оценить производительность системы в новых условиях с новыми компонентами на основе экспериментальных результатов, полученных с предыдущими компонентами. Выполненное моделирование системы УФ-связи при варьировании уровня освещенности и модели солнечно-слепого фильтра показало эффективность предложенной методики для упрощения реализации систем УФ-связи.

В работе [50] проанализированы возможности атмосферных и подводных оптических систем связи. Приводятся результаты моделирования NLOS-связи в водоеме, содержащем частицы диаметром 0,8 мкм в концентрации $2 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$. Показано, что на параметры импульсов в этих системах значительно влияют нанопузырьки в воде. В природных водоемах предпочтительнее использование систем связи в пределах прямой видимости. Наибольшим энергетическим потенциалом и минимальной межсимвольной интерференцией обладают системы связи, в которых приемный блок находится вне зоны прямой видимости излучателя и регистрирует поток молекулярного или аэрозольного рассеянного излучения. В природных водоемах возможно применение систем связи с частотой менее 20 МГц на расстояниях не более 20 м. В качестве рассеивающей области можно использовать дно водоема, поверхность воды или слои воды с более высокой мутностью. В [51] приведен краткий обзор работ, посвященный атмосферным (подводным) бистатическим системам связи. Рассмотрена ситуация, когда приемный блок находится вне зоны прямой видимости излучателя и регистрирует поток молекулярного или аэрозольного рассеянного излучения. Определены предельные возможности современных загоризонтных систем связи. В публикации [52] описаны методы построения телекоммуникационных и квантово-криптографической оптической спутниковой систем связи. В [53] обсуждаются характеристики УФ атмосферных линий связи.

Заключение

В 2012–2022 гг. в России выполнено множество теоретических и экспериментальных исследований, связанных с оценкой возможности реализации оптической связи на рассеянном излучении, определением ее качества, уточнением областей ее применения в атмосферных и подводных условиях. Методом Монте-Карло установлена зависимость дальности действия, качества NLOS-связи, скорости передачи информации от геометрических параметров компланарных и некомпланарных схем ее реализации в водной среде и приземном слое атмосферы. Исследовались варианты бистатической связи наземного источника с приемником, размещенным на БПЛА.

Полевыми и лабораторными экспериментами подтверждено, что в приземном слое атмосферы

загоризонтная связь возможна на базовых расстояниях до 70 км при средней мощности излучения источника 12 Вт, подводная — до 50 м при средней мощности источника до 20 мВт. Очевидно, что, увеличивая мощность излучения и спектральную чувствительность фотоприемников и используя узкополосные фильтры, можно осуществлять связь на рассеянном излучении в видимом и УФ-диапазонах спектра в атмосфере до сотен километров, а под водой в видимой области спектра — до сотен метров. Параллельно в этот период проводились работы, связанные с поиском путей повышения надежности оптической связи на рассеянном излучении. С этой целью рассматривались новые виды приемных антенн, ретрансляторы и системы с разными источниками и приемниками.

Основными центрами, где активно велись теоретические и экспериментальные исследования по различным рассмотренным выше направлениям, являются ИЛФ СО РАН и ИОА СО РАН. Также отметим работы, которые выполняются в Дальневосточном федеральном университете, Южном государственном университете, Новосибирском техническом университете, Институте химической кинетики и горения СО РАН, СибГУТИ, Национальном исследовательском Томском политехническом университете, Белгородском государственном национальном исследовательском университете, Владимирском государственном университете и других учреждениях и вузах России.

Список литературы

1. *Sunstein D.E.* A scatter communication link at ultraviolet frequencies: PhD thesis. Massachusetts: Massachusetts Institute of technology, 1968. P. 58–59.
2. *Di-yong Peng, Jun Shi, Guang-hui Peng, Sha-li Xiao, Shan-he Xu, Shan Wang, Feng Liu.* An ultraviolet laser communication system using frequency-shift keying modulation scheme // *Optoelectron. Lett.* 2015. V. 11. P. 65–68. DOI: 10.1007/s11801-015-4196-x.
3. *Renzhi Yuan, Jianshe Ma, Ping Su, Yuhang Dong, Julian Cheng.* Monte-Carlo integration models for multiple scattering based optical wireless communication // *IEEE Trans. Commun.* 2020. V. 68, N 1. P. 334–348.
4. *Пожидаев В.Н.* Осуществимость линий связи ультрафиолетового диапазона, основанных на эффекте молекулярного и аэрозольного рассеяния в атмосфере // *Радиотехника и электроника.* 1977. Т. 22, № 10. С. 2190–2192.
5. *Поллер Б.В.* Беспроводные локальные оптические сети с возможностями использования атмосферного канала связи с рассеянием // Сб. докл. 10 МНТК «Радиолокация навигация, связь». Воронеж, 2004. С. 150–158.
6. *Зуев В.Е., Креков Г.М.* Современные проблемы атмосферной оптики. Т. 2. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 256 с.
7. *Панченко М.В., Кабанов М.В., Пхалагов Ю.А., Белан Б.Д., Козлов В.С., Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Ужегов В.Н., Щелканов Н.Н., Полькин В.В., Терпугова С.А., Толмачев Г.Н., Яушева Е.П., Аршинов М.Ю., Симоненков Д.В., Шмаргунов В.П., Чернов Д.Г., Турчинович Ю.С., Полькин Вас.В., Жুরавлева Т.Б., Насртдинов И.М., Зенкова П.Н.* Комплексные исследования тропосферного аэрозоля в ИОА СО РАН (этапы развития) // *Оптика атмосфер. и океана.* 2019. Т. 32, № 9. С. 703–716; *Panchenko M.V., Kabanov M.V., Pkhalagov Yu.A., Belan B.D., Kozlov V.S., Sakerin S.M., Kabanov D.M., Uzhegov V.N., Shchelkanov N.N., Polkin V.V., Terpugova S.A., Tolmachev G.N., Yausheva E.P., Arshinov M.Yu., Simonenkov D.V., Shmargunov V.P., Chernov D.G., Turchinovich Yu.S., Pol'kin Vas.V., Zhuravleva T.B., Nasrtdinov I.M., Zenkova P.N.* Integrated studies of tropospheric aerosol at the Institute of Atmospheric Optics (development stages) // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 1. P. 27–41.
8. *Оптика океана и атмосферы* / под ред. К.С. Шифрина. М.: Наука, 1981. 231 с.
9. *Оптика океана.* Т. 2. Прикладная оптика океана / под ред. А.С. Моница. М.: Наука, 1983. 236 с.
10. *Суторихин И.А., Букатый В.И., Акулова О.Б.* Спектральная прозрачность воды в разнотипных озерах Алтайского края. Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2015. 145 с.
11. *Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назаралиев М.А., Дарбинян Р.А., Каргин Б.А., Еленов Б.С.* Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1976. 284 с.
12. *Зуев В.Е., Белов В.В., Веретенников В.В.* Теория систем в оптике дисперсных сред. Томск: Спектр, 1997. 402 с.
13. *Белов В.В., Тарасенков М.В.* Три алгоритма статистического моделирования в задачах оптической связи на рассеянном излучении и бистатистического зондирования // *Оптика атмосфер. и океана.* 2016. Т. 29, № 5. С. 397–403.
14. *Loboda G.Z.* Modification of the double local estimate of the Monte Carlo method in radiation transfer theory // *Rus. J. Numerical Analysis and Mathematical Modeling.* 2011. V. 26, N 5. P. 491–500.
15. *Belov V.V., Juwiler I., Blaunstein N., Tarasenkova M.V., Poznakharev E.S.* NLOS communication: Theory and experiments in the atmosphere and underwater // *Atmosphere.* 2020. V. 11, N 10. P. 1122–1137. DOI: 10.3390/atmos11101122.
16. *Тарасенков М.В., Белов В.В., Познахарев Е.С.* Моделирование процесса передачи информации по атмосферным каналам распространения рассеянного лазерного излучения // *Оптика атмосфер. и океана.* 2017. Т. 30, № 5. С. 371–376; *Tarasenkova M.V., Belov V.V., Poznakharev E.S.* Simulation of information transfer through atmospheric channels of scattered laser radiation propagation // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 5. P. 412–416.
17. *Тарасенков М.В., Пешков С.А., Познахарев Е.С.* Оценка вероятности регистрации ошибочных символов в канале атмосферной оптической связи на рассеянном излучении в УФ-диапазоне длин волн в условиях дня и ночи // *Фотоника.* 2023. Т. 17, № 1. С. 1–12.
18. *Сайт ОАО «Катод».* Новосибирск, 2023. URL: <https://katodnv.com>. (дата обращения: 15.05.2023).
19. *Kneizys F.X., Shettle E.P., Anderson G.P., Abreu L.W., Chetwynd J.H., Selby J.E.A., Clough S.A., Galleary W.O.* User Guide to LOWTRAN-7. ARGL-TR-86-0177. ERP 1010. Hanscom AFB, 1988. P. 13.
20. *Тарасенков М.В., Белов В.В., Познахарев Е.С.* Статистическое моделирование характеристик канала оптической связи на рассеянном излучении с беспилотным летательным аппаратом // *Оптика атмосфер. и океана.* 2022. Т. 35, № 10. С. 791–798.
21. *Тарасенков М.В., Белов В.В., Познахарев Е.С.* Статистическое моделирование характеристик подводной оптической связи на рассеянном излучении // *Оптика атмосфер. и океана.* 2019. Т. 32, № 4. С. 273–278; *Tarasenkova M.V., Belov V.V., Poznakharev E.S.* Statistical simulation of the characteristics of diffuse under-

- water optical communication // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 4. P. 387–392. DOI: 10.1134/S102485601904016X.
22. Белов В.В., Тарасенков М.В., Абрамочкин В.Н., Иванов В.В., Федосов А.В., Троицкий В.О., Шиянов Д.В. Атмосферные бистатистические каналы связи с рассеянием. Часть 1. Методы исследования // *Оптика атмосф. и океана*. 2013. Т. 26, № 4. С. 261–267.
 23. Белов В.В., Тарасенков М.В., Абрамочкин В.Н., Иванов В.В., Федосов А.В., Гриднев Ю.В., Троицкий В.О., Димаки В.А. Атмосферные бистатистические каналы связи с рассеянием. Часть 2. Полевые эксперименты 2013 г. // *Оптика атмосф. и океана*. 2014. Т. 27, № 8. С. 659–664.
 24. Абрамочкин В.Н., Белов В.В., Гриднев Ю.В., Кудрявцев А.Н., Тарасенков М.В., Федосов А.В. Оптико-электронная связь в атмосфере на рассеянном лазерном излучении. Полевые эксперименты // *Светотехника*. 2017. № 4. С. 24–30; Abramochkin V.N., Belov V.V., Gridnev Yu.V., Kudryavtsev A.N., Tarasenkova M.V., Fedosov A.V. Optoelectronic communication in the atmosphere using diffuse laser radiation. Experiments in the field // *Light & Engineering*. 2017. V. 25, N 4. P. 41–49.
 25. Belov V.V., Tarasenkova M.V., Abramochkin V.N. Bistatic atmospheric optoelectronic communication systems (field experiments) // *Tech. Phys. Lett.* 2014. V. 40, N 10. P. 871–874.
 26. Belov V.V., Tarasenkova M.V., Abramochkin V.N., Troitskii V.O. Over-the-horizon optoelectronic communication systems // *Russ. Phys. J.* 2014. V. 57, N 7. P. 202–208.
 27. Белов В.В. Оптическая связь на рассеянном или отраженном лазерном излучении // *Светотехника*. 2018. № 6. С. 6–12.
 28. Белов В.В., Гриднев Ю.В., Кудрявцев А.Н., Тарасенков М.В., Федосов А.В. Оптико-электронная связь в УФ-диапазоне длин волн на рассеянном лазерном излучении // *Оптика атмосф. и океана*. 2018. Т. 31, № 7. С. 559–562.
 29. Белов В.В., Абрамочкин В.Н., Гриднев Ю.В., Кудрявцев А.Н., Кулаев С.П., Тарасенков М.В., Троицкий В.О., Федосов А.В. Бистатистическая оптико-электронная связь в УФ-диапазоне длин волн. Полевые эксперименты в 2016 г. // *Оптика атмосф. и океана*. 2017. Т. 30, № 2. С. 111–114. DOI: 10.15372/AOO20170201.
 30. Димаки В.А., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Филонов А.Г., Шестаков Д.Ю. Лазер на бромиде меди с компьютерным управлением импульсно-периодического, цугового и ждущего режимов // *Приборы и техника эксперимента*. 2008. № 6. С. 119–122.
 31. Арсентьев В.Г., Берестяк А.С., Криволапов Г.И. Об эффективности импульсного метода передачи информации в автономных системах мониторинга // *Материалы II Всероссийской научно-технической конференции «Научное и техническое обеспечение исследований и освоения шельфа Северного Ледовитого океана»*. Новосибирск: ИНФОСФЕРА, 2012. С. 178–180.
 32. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ивлева Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Покровский Е.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В. Посты для мониторинга парниковых и окисляющих атмосферу газов // *Оптика атмосф. и океана*. 2007. Т. 20, № 1. С. 53–61.
 33. Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н. Статистический метод разделения коэффициентов общего ослабления ИК-радиации на компоненты // *Оптика атмосф. и океана*. 1988. Т. 1, № 10. С. 3–11.
 34. Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н., Щелканов Н.Н. Автоматизированный многоволновой измеритель спектральной прозрачности приземной атмосферы // *Оптика атмосф. и океана*. 1992. Т. 5, № 6. С. 667–671.
 35. Ужегов В.Н., Ростов А.П., Пхалагов Ю.А. Автоматизированный трассовый фотометр // *Оптика атмосф. и океана*. 2013. Т. 26, № 7. С. 590–594.
 36. Белов В.В., Познахарев Е.С., Тарасенков М.В., Федосов А.В. Некомпланарные коммуникационные бистатистические системы. Полевые и лабораторные эксперименты // *Оптика атмосф. и океана*. 2022. Т. 35, № 1. С. 63–66. DOI: 10.15372/AOO20220109.
 37. Белов В.В., Абрамочкин В.Н., Кудрявцев А.Н., Тарасенков М.В., Федосов А.В., Познахарев Е.С. Измеритель коэффициента ослабления водной среды в лабораторных и полевых условиях // *Оптика атмосф. и океана*. 2019. Т. 32, № 12. С. 983–985. DOI: 10.15372/AOO20191206.
 38. Белов В.В., Абрамочкин В.Н., Гриднев Ю.В., Кудрявцев А.Н., Тарасенков М.В., Федосов А.В. Оптико-электронные бистатистические коммуникационные системы. Полевые эксперименты на искусственном и естественном водоемах // *Оптика атмосф. и океана*. 2017. Т. 30, № 1. С. 82–87; Belov V.V., Abramochkin V.N., Gridnev Yu.V., Kudryavtsev A.N., Tarasenkova M.V., Fedosov A.V. Bistatic optoelectronic communication systems: Field experiments in artificial and natural water reservoirs // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 4. P. 366–371. DOI: 10.1134/S1024856017040042.
 39. Суторихин И.А., Букатый В.И., Литвих М.Е., Эккердт К.Ю. Влияние взвешенного вещества на спектральную прозрачность озер Алтайского края // *Оптика атмосф. и океана. Физика атмосферы: Тез. докл. XXII Междунар. симп.* Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2016. С. 93.
 40. Поллер Б.В., Клементьев В.М., Бритвин А.В., Колмоников Ю.Д., Поллер А.Б. Экспериментальные параметры терагерцовых полимерных фотонно-кристаллических волноводов // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2012. Т. 1, № 5. С. 246–249.
 41. Бритвин А.В., Поллер А.Б., Поллер Б.В., Кусякина А.Е. Характеристики преобразования оптических сигналов в полимерных пленках с люминофорами, с наночастицами железа // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2012. Т. 2, № 4. С. 22–26.
 42. Поллер Б.В., Бритвин А.В., Кусякина А.Е. Экспериментальные характеристики распространения лазерных сигналов на горизонтальной и наклонной трассах на Горном Алтае // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2013. Т. 5, № 3. С. 108–110.
 43. Бритвин А.В., Никитенко Н.С., Плюснин В.Ф., Поллер Б.В., Поллер А.Б., Шахов Н.В. О фотостабильности акрилатных и полиметилметакрилатных планарно-волоконных структур с люминофорами COUMARIN 7, 47, 120; ROPOR; NOL8 для ультрафиолетовых информационных систем // *Опт. и спектроскоп.* 2022. Т. 130, № 2. С. 311–316.
 44. Бритвин А.В., Никитенко Н.С., Поллер А.Б., Поллер Б.В., Шахов Н.В. Характеристики трендов в динамике излучения полимерных планарно-волоконных структур с люминофорами для ультрафиолетовых информационных систем при длительных натурных испытаниях // *Проблемы информатики*. 2022. Т. 56, № 3. С. 5–13.
 45. Бритвин А.В., Месенцова И.С., Павлов Н.А., Поважаев А.В., Поллер Б.В. Экспериментальные характеристики распространения ультрафиолетовых многолучевых сигналов на трассах обсерватории «КАЙТАНАК» в Республике Алтай // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2018. Т. 2, № 5. С. 134–140.

46. Марчук В.С. Использование технологии ММО в открытых оптических системах связи не прямой видимости для повышения надежности передачи информации // Проблемы телекоммуникаций. 2019. Т. 24, № 1. С. 90–103.
47. 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.
48. Семерник И.В., Бендер О.В., Тарасенко А.А., Самонова К.В. Особенности распространения оптического излучения в морской среде для обеспечения подводной беспроводной оптической связи // Тенденции развития науки и образования. 2022. № 92–9. С. 110–116.
49. Васильев Г.С., Кузичкин О.Р., Суржик Д.И., Константинов И.С. Метод масштабного физического моделирования системы связи УФ–С-диапазона // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2020. № 6. С. 141–147.
50. Абрамова Е.С., Мышкин В.Ф., Хан В.А., Баландин С.Ф., Еремеев Р.С., Павлова М.С., Хорохорин Д.М. Об использовании бистатистических подводных оптических систем связи // Т-COMM: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14, № 8. С. 4–12.
51. Абрамова Е.С., Мышкин В.Ф., Павлова М.С., Абрамов С.С., Павлов И.И. Развитие бистатистической связи в России // Электросвязь. 2019. № 10. С. 36–40.
52. Поллер Б.В., Бритвин А.В., Борисов Б.Д., Коломников Ю.Д., Коняев С.И., Кусакина А.Е., Шергунова Н.А., Курочкин В.Л., Зверев А.В., Курочкин Ю.В., Плюснин В.Ф. Характеристики энергоинформационной модели и методов построения телекоммуникационной и квантово-криптографической лазерной системы спутниковой связи // Проблемы информатики. 2013. № 1. С. 69–75.
53. Бритвин А.В., Коняев С.И., Никитенко Н.С., Поважаев А.В., Поллер Б.В., Щетинин Ю.И. Методы построения и экспериментальные характеристики ультрафиолетовых атмосферных линий связи // Успехи современной радиоэлектроники. 2019. № 1. С. 25–28.

V.V. Belov, M.V. Tarasenkova, E.S. Poznakharev, A.V. Fedosov, V.N. Abramochkin. Optical non-line-of-sight communication: field, laboratory, and numerical experiments in Russia in 2012–2022.

Experimental and theoretical studies of optical non-line-of-sight communication in air and water media performed in Russia in 2012–2022 are reviewed. The main results of field, laboratory, and numerical experiments in the IR, visible, and UV wavelength ranges are given. In the laboratory experiments, a water-glycerine and atmospheric air mixture were used as a scattering medium. In the field experiments, communication was implemented in the near-surface air layer, as well as in artificial and natural water reservoirs (including through ice). Investigations were performed for coplanar and non-coplanar schemes of communication channels.