

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 621.391.63; 535.361; 621.373.826

Оптико-электронные бистатические коммуникационные системы. Полевые эксперименты на искусственном и естественном водоемах

**В.В. Белов^{1,2}, В.Н. Абрамочкин¹, Ю.В. Гриднев¹,
А.Н. Кудрявцев¹, М.В. Тарасенков^{1,2}, А.В. Федосов^{1*}**

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

² *Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

Поступила в редакцию 25.08.2016 г.

Обсуждаются результаты полевых экспериментов, выполненных в 2015 г. по схеме бистатических оптико-электронных коммуникационных систем на искусственном и естественном водоемах. Цель экспериментов состояла в оценке качества связи на основе контроля вероятностей ошибок связи и их среднеквадратических отклонений. Результаты экспериментов позволяют предполагать, что возможно создание таких оптико-электронных систем связи, которые будут эффективно функционировать в воде и в смешанных средах (вода–атмосфера, атмосфера–вода и в том числе через лед) с длиной линий связи от нескольких десятков до сотен метров.

Ключевые слова: NLOS системы связи, рассеяние лазерного излучения в воде и в атмосфере, вероятности ошибок; NLOS communication systems, laser radiation scattering in water and in the atmosphere, communication error probability

Введение

Оптико-электронные системы связи (ОЭСС), в которых оптические оси приемного и передающего блоков лежат на одной линии, т.е. работающие в пределах прямой видимости и называемые в зарубежной литературе системами LOS (line of sight), достаточно широко распространены, изучены и развиваются в том числе с целью их применения в водной или смешанных (вода–атмосфера, атмосфера–вода) средах [1–5]. В этих системах полезным сигналом является нерассеянное оптическое излучение.

Интерес к развитию теоретических и экспериментальных исследований, связанных с ОЭСС, в которых источником информации и полезным сигналом является рассеянное оптическое излучение (лазерное, в частности) в атмосфере, водной и смешанной средах, обусловлен тем, что существуют условия, при которых только эти системы могут обеспечить устойчивую многоадресную связь, которую невозможно реализовать в радио или акустическом диапазоне длин волн. Подобными условиями могут быть, например, необходимость обеспечения режима радио (акустического) молчания или требования к скорости передачи данных и т.п.

Этим можно объяснить возрастающую в последнее десятилетие публикационную активность в этих направлениях исследований (например, [6–20]). Подчеркнем, что возможности таких ОЭСС обсуждались в научной литературе еще в прошлом веке (например, [21]).

Проблемы теоретических исследований, связанных с изучением передаточных свойств внешних каналов ОЭСС с рассеянием или с бистатическим лазерным зондированием рассеивающих и поглощающих сред, во многом преодолены или продолжают обсуждаться, например, в работах [6–15, 19–27]. Существенно меньше можно найти публикаций, в которых обсуждаются результаты полевых испытаний бистатических или, иначе, загоризонтных, или non line of sight (сокращенно NLOS) ОЭСС. Эти примеры имеют отношение к испытаниям в атмосфере [16–18].

В этой работе сообщается о первых результатах, полученных авторами при испытаниях этих коммуникационных систем в водной и смешанных средах, в искусственном и естественном водоемах.

Содержание, аппаратура, геометрические схемы экспериментов

Смысл и содержание экспериментов состояли в следующем. Тестовая информация вводится в лазерное излучение, которое направляется в среду, принимается оптико-электронной системой (ОЭС),

* Владимир Васильевич Белов (belov@iao.ru); Владимир Николаевич Абрамочкин (ya.wna@yandex.ru); Юрий Владимирович Гриднев (yurigi@iao.ru); Андрей Николаевич Кудрявцев; Михаил Викторович Тарасенков (tmv@iao.ru); Андрей Васильевич Федосов.

ориентированной на рассеянный фон, декодируется и сравнивается с переданной для оценки вероятности ошибки передачи символов и среднеквадратичного отклонения. Ввод информации в лазерное излучение в описываемых экспериментах осуществлен через управление временем генерации импульсов (т.е. использована время-импульсная модуляция). Длительность каждого сеанса связи при фиксированной геометрии эксперимента варьировалась от 7 до 30 мин. При этом передавалась и записывалась на компьютер информация, содержащая от 7000 до 90000 символов. Каждый эксперимент длился от 1 до 3 ч.

В экспериментах в качестве базовой основы была использована аппаратная реализация ОЭСС NLOS, которая испытывалась в атмосфере и подробно описана в [16–18]. В ней заменялись стационарный лазер на бромиде меди на мобильный (длина волны $\lambda = 510,6$ нм при средней мощности 800 мВт) или на полупроводниковый малогабаритный лазерный модуль В2000 с преобразованием непрерывного излучения в импульсное ($\lambda = 445,0$ нм при средней мощности 450 мВт).

Для ввода лазерного излучения на длине волны $\lambda = 510,6$ нм в водную среду созданы соответствующие устройства, их фотографии приведены на рис. 1. Источник лазерного излучения на длине волны $\lambda = 445,0$ нм помещался в герметический бокс и мог быть установлен как над водной поверхностью, так и под ней. Приемопередающая ОЭС помещалась в герметический бокс и также могла устанавливаться под водой или над ее поверхностью.

Частота следования импульсов лазеров фиксировалась на уровне 11 кГц при длительности импульсов $20 < \Delta t < 40$ нс. В состав приемного блока входит ФЭУ-84, угол поля зрения приемной оптики не превышал 2° .

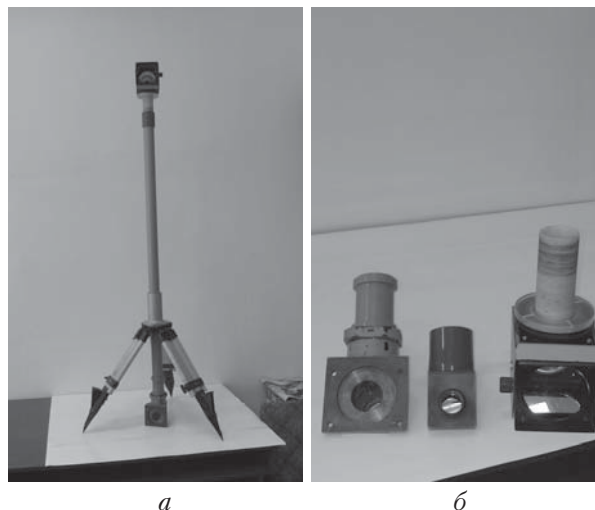


Рис. 1. Устройство ввода излучения в воду (и вывода из нее) (а); боксы для размещения лазера, приемной ОЭС, отражателя под водой (б)

На рис. 2 приведены геометрические схемы экспериментов, проведенных в 2015 г. в пригороде г. Томска на искусственном и естественном водоемах (открытый бассейн и о. Боярское).

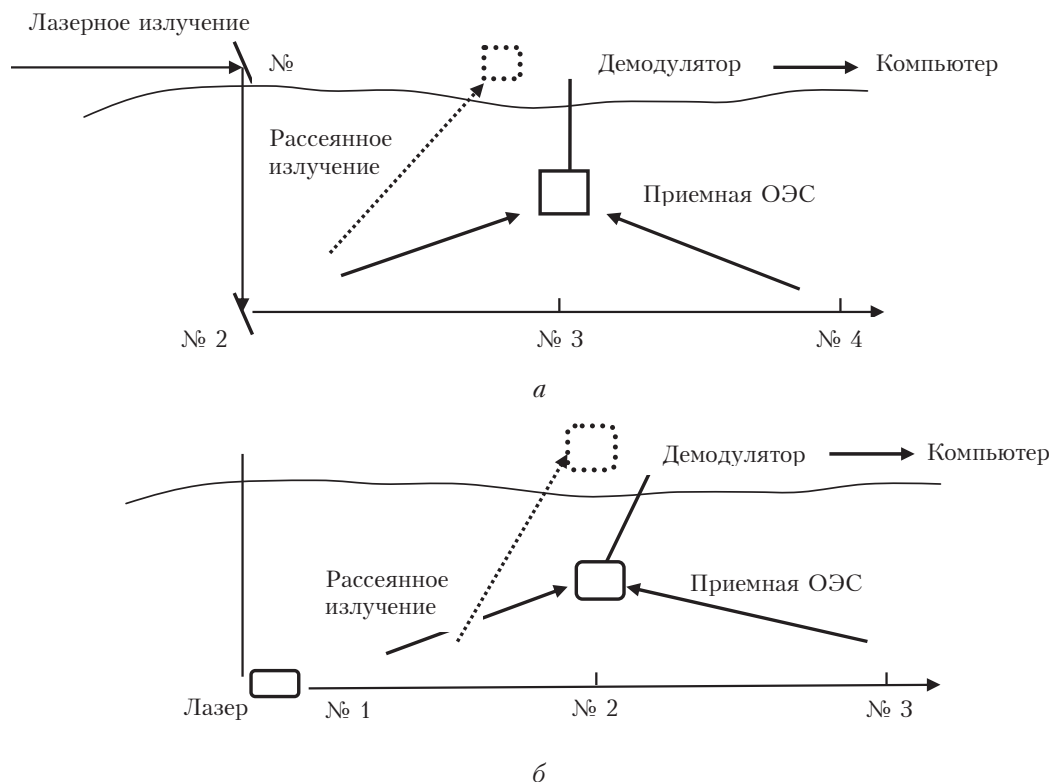


Рис. 2. Геометрические схемы экспериментов: с лазером на бромиде меди (а), приемная ОЭС под водой и над ней (штриховые линии); с полупроводниковым лазером в воде (б); приемная ОЭС под водой и над ней (штриховые линии)

Результаты экспериментов и их обсуждение

В искусственном открытом водоеме эксперименты проводились в апреле с лазером на парах бромида меди по схеме на рис. 2, *а* и в октябре с лазером на основе лазерного модуля В2000 по схеме на рис. 2, *б*. Размеры искусственного водоема в метрах: $6 \times 3 \times 2$ (глубина). При проведении экспериментов варьировались глубина погружения в воду лазерного луча от 0,1 до 1,0 м и ориентация оси приемной ОЭС на «облако» рассеянного излучения от направления на зеркало № 2 до направлений, соответствующих индикатрисе первичного рассеяния в заднюю полусферу. То есть если оптическая ось приемной ОЭС ориентирована вдоль вектора \mathbf{n}_1 , а нерассеянное лазерное излучение распространяется в направлении \mathbf{n}_2 , то вариации вектора \mathbf{n}_1 лежали в пределах $-0,2 < (\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2) < 0,8$ (в точки № 2, № 3 и № 4). Аналогичные вариации этих параметров имели место и в экспериментах, выполненных в октябре по схеме на рис. 2, *б*).

Вариации перечисленных выше геометрических параметров схем экспериментов приводили к изменениям 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 пересечения этих осей. Эксперименты проводились как в невозмущенной водной среде, так и при ее интенсивном механическом перемешивании, приводящем к появлению волн на ее поверхности без заметного визуального повышения мутности воды.

Для оценки оптических условий в воде, при которых проводились эксперименты, необходимо знать значения характеристик, определяющих процесс взаимодействия оптического излучения с водой. К такой характеристике, в частности, относится ее спектральная прозрачность. Авторы работ [28, 29] 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 практически отсутствуют результаты даже этих исследований водных объектов (озер, в частности) в Сибири. В этих же работах [28, 29] приведены результаты исследований спектральной прозрачности озер Алтайского края с помощью объективного спектрофотометрического метода. На основе информации, приведенной в этих работах, можно предположить, что характеристики о. Боярское в Томской области, где проводились обсуждаемые здесь эксперименты, близки к таковым в о. Лапа Алтайского края (озеро—старича, расположено в окрестности г. Барнаула, непроточное). Можно предполагать, что о. Боярское тоже относится к эвтрофному трофическому статусу. Используем результаты измерений спектральных коэффициентов ослабления воды о. Лапа [28, 29]

для грубой оценки уровня оптических протяженностей линий связи, которые реализовывались и исследовались в наших экспериментах.

Оптическая протяженность линий связи в искусственном водоеме лежала в пределах $25 < \tau < 70$. В экспериментах на о. Боярском геометрическая протяженность линий связи варьировалась от 11 до 15 м что соответствовало оптическим протяженностям $88 < \tau < 120$.

Алгоритм расчетов вероятностей P и среднеквадратичных отклонений (СКО) ошибок передачи символов в экспериментах в реальном масштабе времени подробно описаны в [16]. Табл. 1–5 приведены в качестве примеров значений этих характеристик (с нарастанием выборки по времени), полученных в экспериментах в искусственном водоеме в апреле 2015 г. (источник излучения — лазер на парах бромида меди, схема наблюдения на рис. 2, *а*). В столбце время указано местное время проведения экспериментов.

Таблица 1

Луч в воде. Приемник над водой. Направление наблюдения на точку №2. Перемешивание есть

Время	P	СКО	Время	P	СКО
20:37	0,469298	0,460383	20:55	0,331582	0,421299
20:39	0,548800	0,448663	20:56	0,293597	0,402588
20:40	0,382365	0,436850	20:58	0,259927	0,387069
20:49	0,430860	0,439410	20:59	0,233852	0,372421
20:50	0,351557	0,424872	21:00	0,212386	0,359187

Таблица 2

Луч в воде. Приемник над водой. Направление наблюдения на точку №2. Перемешивания нет

Время	P	СКО	Время	P	СКО
21:02	0,026263	0,022856	21:08	0,027778	0,029540
21:03	0,026768	0,027352	21:09	0,026984	0,028731
21:04	0,027946	0,028311	21:10	0,027146	0,029151
21:05	0,029293	0,030437	21:11	0,026375	0,028365
21:06	0,027273	0,029650	21:12	0,027374	0,028806

Таблица 3

Луч в воде. Приемник над водой. Направление наблюдения на точку №2. Перемешивания нет

Время	P	СКО	Время	P	СКО
21:18	0,018182	0,021852	21:23	0,028620	0,049010
21:19	0,022727	0,026053	21:24	0,028283	0,046301
21:20	0,021886	0,025585	21:25	0,028030	0,043872
21:21	0,026515	0,039937	21:27	0,027722	0,042092
21:22	0,028889	0,052996	21:28	0,028485	0,040908

Таблица 4

Луч и приемник в воде. Направление наблюдения сбоку (параллельно горизонту) на точку №4. Перемешивание есть

Время	P	СКО	Время	P	СКО
21:34	0,049495	0,034933	21:39	0,039057	0,035782
21:35	0,050000	0,035415	21:40	0,038961	0,036331
21:36	0,045455	0,035281	21:41	0,037374	0,036360
21:37	0,041919	0,036381	21:43	0,037598	0,035620
21:38	0,040606	0,034830	21:44	0,037273	0,035599

Таблица 5

Луч и приемник в воде. Направление наблюдения вниз на точку №3. Перемешивание есть

Время	P	СКО	Время	P	СКО
21:47	0,034343	0,051565	21:53	0,014141	0,029241
21:48	0,022727	0,040684	21:54	0,013420	0,028048
21:49	0,017508	0,034926	21:55	0,013131	0,027296
21:50	0,015404	0,032152	21:56	0,012570	0,026362
21:52	0,015152	0,031022	21:57	0,011515	0,025334

Аналогичные эксперименты были выполнены на этом же водоеме по схеме на рис. 2, б в ноябре с лазерным импульсным источником на длине волны излучения $\lambda = 445,0$ нм. Существенных изменений в значениях вероятностей P и СКО не отмечается, когда лазерный луч и приемная ОЭС расположены в воде, хотя средняя мощность этого излучения почти в два раза меньше, чем у «зеленого» лазера. Это можно объяснить тем, что вода в водоемах этого типа, географического положения и в это время года становится более прозрачной, чем в весенний период времени [28, 29]. Иная ситуация наблюдалась при проведении тестовых сеансов бистатических систем (или иначе – NLOS) связи при регистрации рассеянного в воде излучения приемной ОЭС, расположенной над водой. Это обусловлено тем, что при проведении экспериментов поверхность водоема 27 октября была частично (примерно 50% площади) покрыта ледяным рыхлым слоем толщиной 1–2 см. Это привело к существенному повышению вероятностей ошибок в отдельных случаях более чем в два раза, особенно при перемешивании воды, что несложно объяснить тем, что кроме волнения поверхности раздела вода–воздух на ней и в глубине воды появлялись достаточно большие фрагменты рыхлого льда, в значительной степени или даже полностью экранирующие приемник от распространяющихся вверх рассеянных световых потоков.

В ноябре 2015 г. была проведена серия полевых экспериментов по передаче информационных потоков через воду на о. Боярском (56°27'7" с.ш., 84°54'59" в.д.) в пригороде г. Томска. В этот период поверхность озера была покрыта льдом толщиной до 15–20 см. В качестве источника лазерного излучения использован «синий» лазер (модуль В2000, $\lambda = 445,0$ нм).

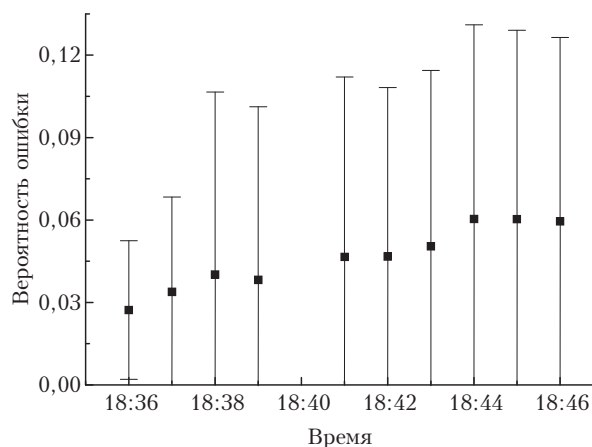
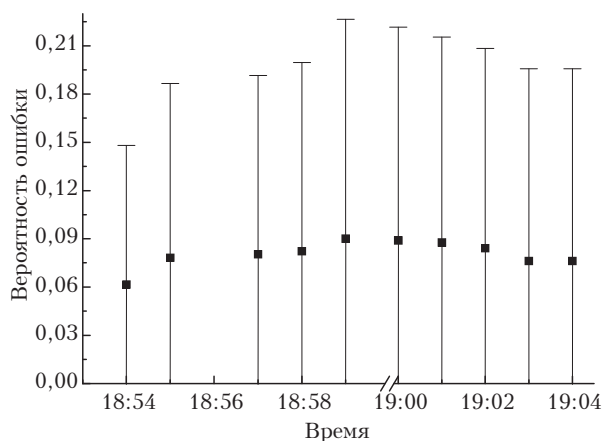
Эксперимент организовывался следующим образом. Фиксировалась его геометрическая схема. Осуществлялась последовательная передача 30 «пачек», каждая из которых содержала 30 символов. Вычислялись текущие значения вероятности ошибок P и СКО (для текущего сеанса) и по нарастающему количеству «пачек» (от первой до текущей включительно). За один эксперимент передавалось 300 «пачек» или 9000 символов.

Варьируемые параметры: база (расстояние между источником и приемником излучения по прямой линии), углы между оптическими осями приемного β и передающего α блоков относительно проекции базы на горизонтальную плоскость (рис. 3), глубина погружения лазера и приемной ОЭС.



Рис. 3. Геометрическая схема экспериментов. Вид сверху

На рис. 4–7 приведены примеры оценок в этих экспериментах вероятностей ошибок и СКО для различных вариантов размещения и ориентации приемопередающих блоков бистатической ОЭСС. По оси абсцисс отложено текущее реальное время начала очередного сеанса связи.

Рис. 4. Вероятности ошибок и интервал СКО (вертикальные линии). Лазер и приемник в воде на уровне 10 см от нижней кромки льда. База 10 м. $\alpha = 3^\circ$, $\beta = 2^\circ$ Рис. 5. Вероятности ошибок и интервал СКО (вертикальные линии). Лазер и приемник в воде на уровне 10 см от нижней кромки льда. База 10 м. $\alpha = 10^\circ$, $\beta = 20^\circ$

Вероятности ошибок связи и СКО в зависимости от геометрических параметров схем экспериментов на о. Боярском изменялись в широких пределах, соответствующих ситуациям, когда связь практически невозможна, до почти идеальных условий ее реализации. Она возможна по NLOS-схеме и при размещении приемника и излучателя в водной среде, и при передаче информации через лед и ее прием в воде, и при размещении импульсного

лазерного источника в воде и приеме на внешней поверхности льда или на некоторой высоте над ней. Однако в каждом из этих случаев существуют ограничения на дальность действия NLOS ОЭСС. Эти ограничения связаны с мощностью излучения, спектральной энергетической чувствительностью приемника, стабильностью работы электронных блоков системы, включая ФЭУ и лазерного источника. Другой ограничивающий фактор — спектральная прозрачность воды и наличие или отсутствие в ней в живых организмов или нестационарных (течение, перемешивание) неорганических взвесей, способных частично или полностью перекрывать поле зрения оптической приемной системы.

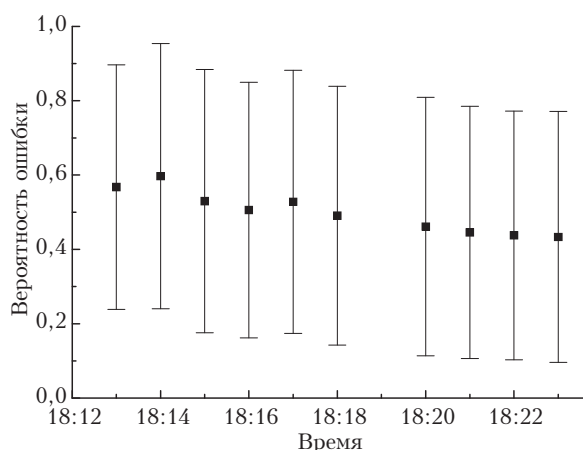


Рис. 6. Вероятности ошибок и интервал СКО (вертикальные линии). Лазерный луч входит в воду через лед под углом 45° , приемник в воде на уровне 10 см от нижней кромки льда. База 6 м. $\alpha = 10^\circ$, $\beta = 20^\circ$

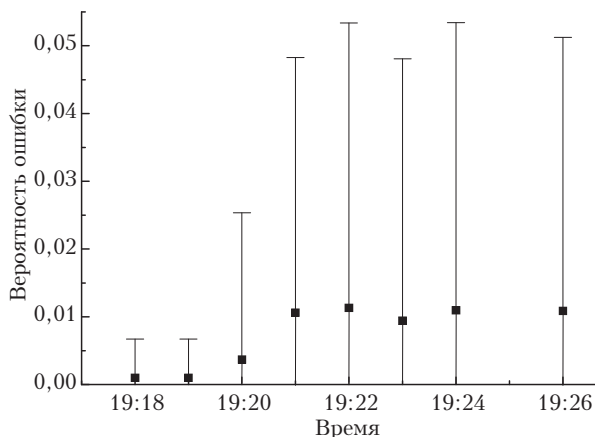


Рис. 7. Вероятности ошибок и интервал СКО (вертикальные линии). Лазер под водой, излучение параллельно поверхности льда на расстоянии 10 см от нижней его поверхности. Приемник расположен на внешней поверхности льда, ориентирован перпендикулярно в воду. База 6 м. $\alpha = 10^\circ$

Наиболее благоприятные условия для качественной связи из рассмотренных NLOS схем ее организации реализовывались при размещении приемника и передатчика под водой, когда вероятности ошибок P не превышали уровня 0,06 (рис. 2). Ис-

ходя из рис. 4 этому утверждению можно возразить, так как при приеме информации через лед уровень этих вероятностей был зафиксирован еще меньше (0,05). Однако следует учесть, что в этом случае расстояние приемника от лазерного пучка было существенно меньше, чем то, которому соответствуют данные на рис. 2. Из рис. 2 и 3 следует достаточно очевидный вывод, что увеличение протяженности линий связи приводит к ухудшению ее качества. Наименее благоприятные условия (с точки зрения ошибок P и СКО) реализовывались при передаче информации в воду через лед. Это связано, возможно, с дополнительным уширением лазерного пучка при прохождении через лед, с его поглощательной способностью и с другими факторами и причинами, которые предстоит установить.

Заключение

Полевые эксперименты, выполненные в 2015 г. по бистатической схеме на искусственном и естественном водоемах с целью оценок качества связи (на основе контроля вероятностей ошибок связи и СКО), позволяют сделать следующие выводы и предположения.

При размещении источников и приемников излучения в воде реализовывались наиболее благоприятные (по сравнению с вариантами, когда приемник в воде, источник вне, и наоборот) условия для передачи информации с наименьшими вероятностями ошибок, не превышающими уровень 1–2%. В этом случае механическое перемешивание воды не приводило к существенным изменениям вероятностей ошибок.

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

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (Соглашение № 14.604.21.0100 — уникальный идентификатор RFMTFI60414X0100).

1. Кузнецов С., Огнев Б., Поляков С. Система оптической связи в водной среде // Первая миля. 2014. № 2. С. 46–51.
2. Hanson F., Radic S. High bandwidth underwater optical communication // Appl. Opt. 2008. V. 47. N 2. P. 277–283.
3. Jaruwatanadilok S. Underwater Wireless Optical Communication Channel Modeling and Performance Evaluation using Vector Radiative Transfer Theory // IEEE J. Sel. Areas Commun. 2008. V. 26, N 9. P. 1620–1627.
4. Воронцов М.А., Дудоров В.В., Зырянова М.О., Колосов В.В., Филимонов Г.А. Частота появления ошибочных битов в системах беспроводной оптической связи с частично когерентным передающим пучком. // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 11. С. 936–940; Vorontsov M.A., Dudorov V.V., Zyryanova M.O., Kolosov V.V., Filimonov G.A. Bit error rate in free-space optical communication systems with a partially coherent transmitting beam // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 3. P. 185–189.

5. Полянский С.В., Игнатов А.Н. Определение дистанции атмосферного канала связи с заданным коэффициентом готовности для г. Новосибирска // Вестн. СибГУТИ. 2009. № 4. С. 73–82.
6. Yin H., Chang S., Jia H., Yang Ji., Yang Ju. Non-line-of-sight multiscatter propagation model // JOSA. A. 2009. V. 26, N 11. P. 2466–2469.
7. Ding H., Chen G., Majumdar A.K., Sadler B.M., Xu Z. Modeling of non-line-of-sight ultraviolet scattering channels for communication // IEEE J. Sel. Areas Commun. 2009. V. 27, N 9. P. 1535–1544.
8. Yin H., Jia H., Zhang H., Wang X., Chang S., Yang J. Vectorized polarization-sensitive model of non-line-of-sight multiple-scatter propagation // JOSA. A. 2011. V. 28, N 10. P. 2082–2085.
9. Han D., Fan X., Zhang K., Zhu R. Research on multiple-scattering channel with Monte Carlo model in UV atmosphere communication // Appl. Opt. 2013. V. 52, N 22. P. 5516–5522.
10. Xiao H., Zuo Y., Wu J., Li Y., Lin J. Non-line-of-sight ultraviolet single-scatter propagation model in random turbulent medium // Opt. Lett. 2013. V. 38, N 17. P. 3366–3369.
11. Belov V.V., Tarasenkov M.V., Abramochkin V.N., Ivanov V.V., Fedosov A.V., Troitskii V.O., Shiyonov D.V. Atmospheric bistatic communication channels with scattering. Part 1. Methods of study // Atmos. Ocean. Optics. 2013. V. 26, N 5. P. 364–370.
12. Jagadeesh V.K., Choudhary Arpita, Fransis M. Bui., Muthuchidambaranathan P. Characterization of Channel Impulse Responses for NLOS Underwater Wireless Optical Communications // Conf.: Advances in Computing and Communications (ICACC), 2014 Fourth Int. Conf. on Cochin, 27–29 Aug. 2014. IEEE. 2014. P. 77–79.
13. Choudhary Arpita, Jagadeesh V.K., Muthuchidambaranathan P. Pathloss analysis of NLOS Underwater Wireless Optical Communication channel // Electronics and Communication Systems (ICECS), 2014 International Conference on Coimbatore, 13–14 Feb. 2014. IEEE. 2014. P. 1–4.
14. Gabriel C., Khalighi M., Bourennane S., Léon P., Rigaud V. Monte-Carlo-Based Channel Characterization for Underwater Optical Communication Systems // J. Opt. Commun. and Networking. 2013. V. 5, N 1. P. 1–12.
15. Arnon S., Kedar D. Non-line-of-sight underwater optical wireless communication network // JOSA. A. 2009. V. 26, N 3. P. 530–539.
16. Belov V.V., Tarasenkov M.V., Abramochkin V.N., Ivanov V.V., Fedosov A.V., Gridnev Yu.V., Troitskii V.O., Dimaki V.A. Atmospheric Bistatic Communication Channels with Scattering. Part 2. Field Experiments in 2013 // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 3. P. 202–208.
17. Belov V.V., Tarasenkov M.V., Abramochkin V.N., Troitskii V.O. Over-the-horizon Optoelectronic Communication Systems // Russian Phys. J. 2014. V. 57, N 7. P. 202–208.
18. Belov V.V., Tarasenkov M.V., Abramochkin V.N. Bistatic Atmospheric Optoelectronic Communication Systems (Field Experiments) // Techn. Phys. Lett. 2014. V. 40, N 10. P. 871–874.
19. Yin H., Chang S., Wang X., Yang Ji., Yang Ju., Tan J. Analytical model of non-line-of-sight single-scatter propagation // JOSA. A. 2010. V. 27, N 7. P. 1505–1509.
20. Elshimy M.A., Hranilovic S. Non-line-of-sight single-scatter propagation model for noncoplanar geometries // JOSA. A. 2011. V. 28, N 3. P. 420–428.
21. Пожидаев В.Н. Осуществимость линий связи ультрафиолетового диапазона, основанных на эффекте молекулярного и аэрозольного рассеяния в атмосфере // Радиотехн. и электрон. 1977. Т. 22, № 10. С. 2190–2192.
22. Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назарлиев М.А., Дарбинян Р.А., Каргин Б.А., Елепов Б.С. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, 1976. 283 с.
23. Каблукова Е.Г., Каргин Б.А. Эффективные дискретно-стохастические модификации локальных оценок метода Монте-Карло для задач лазерного зондирования рассеивающих сред // Вычисл. технол. 2012. Т. 17, № 3. С. 70–82.
24. Lotova G.Z. Modification of the double local estimate of the Monte Carlo method in radiation transfer theory // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modeling. 2011. V. 26, N 5. P. 491–500
25. Михайлов Г.А., Лотова Г.З. Численно-статистическая оценка потока частиц с конечной дисперсией // Докл. АН. 2012. Т. 447, № 1. С. 18–21.
26. Белов В.В., Тарасенков М.В. Три алгоритма статистического моделирования в задачах оптической связи на рассеянном излучении и бистатистического зондирования // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 5. С. 397–403; Belov V.V., Tarasenkov M.V. Three algorithms of statistical modeling in problems of optical communication on scattered radiation and bistatic sensing // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 6. P. 533–540.
27. Белов В.В., Тарасенков М.В. Алгоритмы статистического моделирования импульсных реакций бистатистических каналов связи // Труды Международной конференции «Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики – 2015», посвященной 90-летию со дня рождения академика Гурия Ивановича Марчука. Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук. Новосибирск. 19–23 октября 2015 г. Новосибирск: Абвей, 2015. С. 95–101.
28. Суторихин И.А., Букатый В.И., Акулова О.Б. Спектральная прозрачность воды в разнотипных озерах Алтайского края. Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2015. 145 с.
29. Суторихин И.А., Букатый В.И., Лутих М.Е., Эккердт К.Ю. Влияние взвешенного вещества на спектральную прозрачность озер Алтайского края // Оптика атмосф. и океана. Физика атмосф.: Тезисы докл. XXII Междунар. симп. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2016. С. 93.

V.V. Belov, V.N. Abramochkin, Yu.V. Gridnev, A.N. Kudryavtsev, M.V. Tarasenkov, A.V. Fedosov.
Bistatic optoelectronic communication systems. Field experiments in artificial and natural water reservoirs.

Results of field experiments performed with bistatic optoelectronic communication systems in artificial and natural water reservoirs in 2015 are discussed in the present paper. The experiments were aimed at estimation of the communication quality based on the control of communication error probabilities and their standard deviations. Results of experiments suggest that the OECS can be developed that effectively operate in water and complex media (water-atmosphere and atmosphere-water including ice interface) with communication path lengths from several ten to several hundred meters.