

Оптико-электронная связь в УФ-диапазоне длин волн на рассеянном лазерном излучении

В.В. Белов, Ю.В. Гриднев, А.Н. Кудрявцев,
М.В. Тарасенков, А.В. Федосов*

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

Поступила в редакцию 12.04.2018 г.

Обсуждаются результаты, полученные в Институте оптики атмосферы СО РАН, по проблемам оптической связи на рассеянном лазерном излучении в УФ-диапазоне длин волн. Приведены примеры ее осуществления в полевых экспериментах в ночных и дневных условиях в 2017 и 2018 гг.

Ключевые слова: рассеяние лазерного излучения, полевые эксперименты, оптическая связь; laser radiation scattering, field experiments, optical communication.

Результаты теоретических исследований, связанных с изучением передаточных свойств атмосферных каналов оптико-электронных систем связи (ОЭСС) на рассеянном излучении, опубликованы в [1–19]. Существенно меньше работ, в которых обсуждаются результаты полевых испытаний бистатических систем связи в атмосфере [20–22].

Для осуществления полевых экспериментов по проблемам бистатической (загоризонтной) связи в Институте оптики атмосферы СО РАН создан лабораторный макет, который описан подробно в [20–23]. Результаты, полученные ранее в УФ-диапазоне в темное время суток, представлены в [23–25] и сводятся к следующему.

Полевыми экспериментами подтверждена возможность создания и качественного функционирования бистатических многоадресных ОЭСС в УФ-диапазоне длин волн с дальностью действия, превышающей сотни метров. Оптико-электронная связь в УФ 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 $30\text{--}40^\circ$. Результаты получены при базовом расстоянии 300 м.

В 2017 г. в лабораторный макет ОЭСС были внесены следующие изменения и дополнения. Излучение лазерного источника переведено с длины волны 289,1 нм на 255,3 нм, приемный блок дополнен фильтром Semrock FF01-257/12-25, усилитель оптического излучения ФЭУ-142 заменен на УФК-4Г-4

(ООО «КАТОД», г. Новосибирск). Это позволило выполнять эксперименты в светлое время суток.

Геометрическая схема экспериментов в 2017 и 2018 гг. изображена на рис. 1. Высота источника – 186 м, высота приемника над уровнем моря – 101 м; $\varphi = 3^\circ$, $\alpha = 3^\circ$, $\beta = 2^\circ$. База (расстояние между источником и приемником) составляла 1300 м.

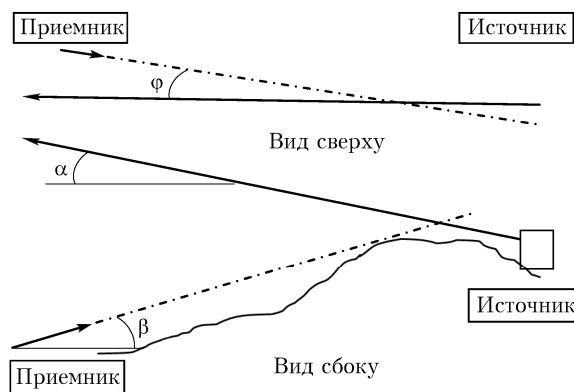


Рис. 1. Схема ориентации оптических осей лазерного пучка (сплошные прямые линии со стрелкой) и приемной оптики (штрихпунктирные линии со стрелкой). В нижней части рисунка кривой, соединяющей источник и приемник, показан условный профиль рельефа местности с проекцией на вертикальную плоскость

На рис. 2 показаны вариант размещения (рис. 2, а) и ориентация (белая стрелка на рис. 2, б) приемной системы ОЭСС на импульсный источник лазерного излучения средней мощностью 150–275 мВт. Источник размещен на четвертом этаже здания института, которое экранируется от приемной системы рельефными характеристиками местности и лесным массивом в районе Академгородка г. Томска.

* Владимир Васильевич Белов (belov@iao.ru); Юрий Владимирович Гриднев (yurigi@iao.ru); Андрей Николаевич Кудрявцев (zoxu1@iao.ru); Михаил Викторович Тарасенков (tmv@iao.ru); Андрей Васильевич Федосов (fean.2010@yandex.ru).



Рис. 2. Мобильный вариант ОЭСС (а) и направление (б, стрелка) оптической оси приемной системы

На рис. 3 приведен пример результатов «зондирования» качества канала связи (оценки в реальном масштабе времени вероятностей и СКО ошибок связи), полученных в светлое время суток в условиях сплошной облачности, без осадков.

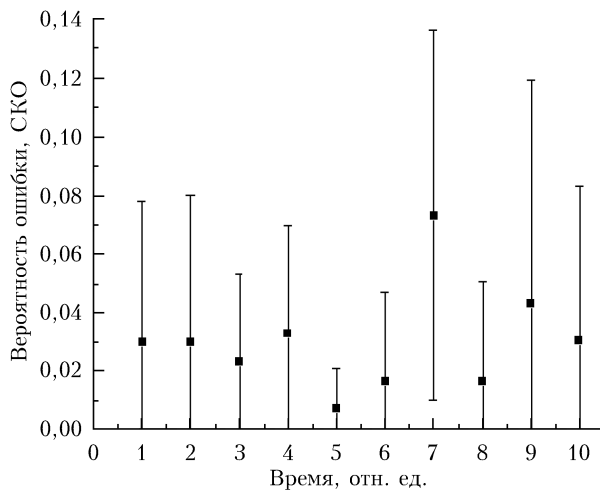


Рис. 3. Временная зависимость вероятности ошибки и СКО в светлое время суток в 2018 г.

На рис. 4 для сравнения воспроизведен результат аналогичного эксперимента, выполненного в 2017 г. ночью с ФЭУ-142, без фильтра FF01-257/12-25.

Как видим, модернизация лабораторного макета бистатической ОЭСС привела не только к возможности функционирования коммуникационной системы в светлое время суток, но и к улучшению характеристик качества канала связи почти на порядок.

В дополнение к предыдущим экспериментам в 2018 г. была осуществлена передача текстовой информации и изображений объектов в виде секторных мир. Пример результатов одного из этих экспериментов приведен на рис. 5.

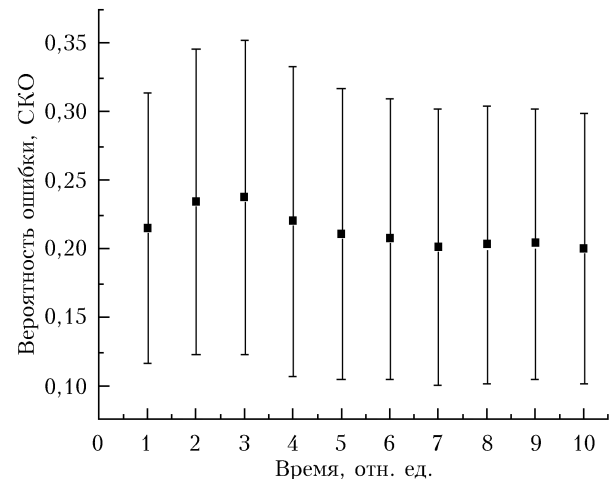


Рис. 4. Временная зависимость вероятности ошибки и СКО в темное время суток в 2017 г.

В экспериментах, проведенных в апреле 2018 г., также выявлено влияние снегопада на качество связи. Этот результат иллюстрирует рис. 6. В первые моменты времени погодные условия были следующие. Над местом расположения лазерного источника шел слабый снег, а над приемной системой (см. рис. 2) он отсутствовал. Затем, начиная с 5-го момента времени (рис. 6), его интенсивность над местом приема сигналов стала нарастать и достигла уровня, при котором связь прекратилась. Попытаемся найти причину такой зависимости. По данным ТОР-станции контроля метеопараметров [26], состава и состояния приземного слоя атмосферы, отмечаем, что для светлого времени суток содержание аэрозоля было незначительным. Появление слабого снегопада привело к росту рассеянного излучения и уверенной его регистрации приемной аппаратурой. Появление снега и его усиление в области, удаленной от источника и включающей в себя область

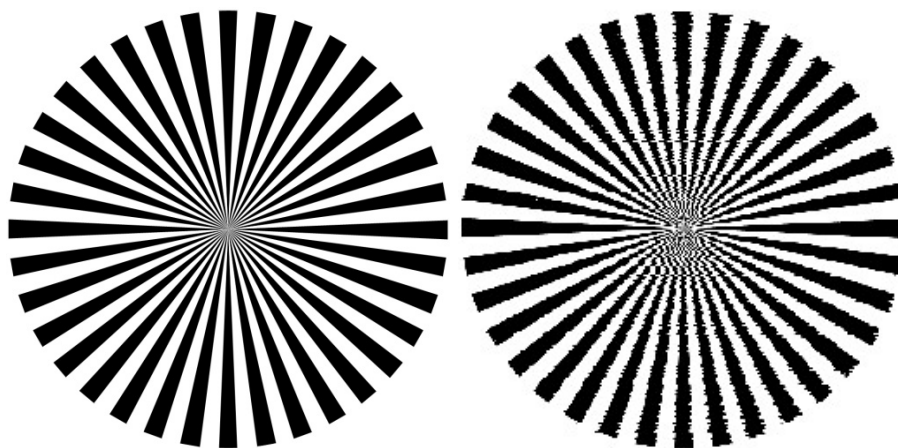


Рис. 5. Переданное (слева) и принятое (справа) изображения секторной миры в дневное время суток в 2018 г. Геометрические условия проведения эксперимента те же, что на рис. 1–4

размещения приемника, привело к росту ослабления принимаемого сигнала до уровня, превышающего шум ФЭУ, и прекращению приема полезного сигнала.

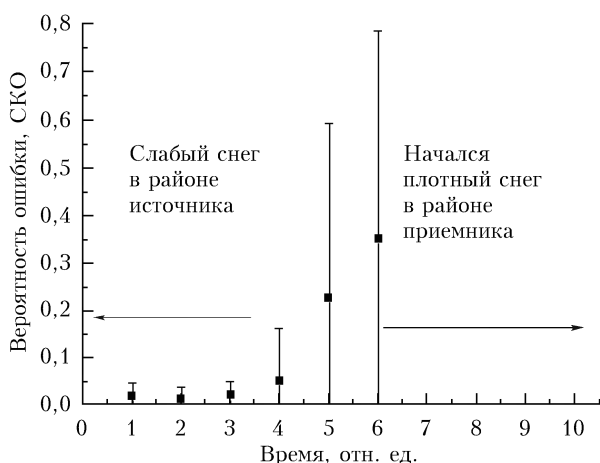


Рис. 6. Влияние снегопада на качество канала связи

Таким образом, экспериментально доказано, что загоризонтная оптическая связь на рассеянном лазерном излучении возможна круглосуточно.

Качество канала загоризонтной оптической связи в УФ-диапазоне зависит от оптического состояния атмосферы и пространственного распределения интенсивности и уровня снегопада в зимний, весенний и осенний периоды.

Применение отечественных современных фотоэлектронных умножителей приводит к улучшению качества каналов загоризонтной связи практически на порядок.

Результаты экспериментальных исследований позволяют предполагать, что предельная дальность действия этих коммуникационных систем может составлять десятки километров.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках Приоритетного направления П.10, проект П.10.3.3 «Прямые и обратные задачи зондирования атмосферы и земной поверхности, атмосферная кор-

рекция и коммуникационные оптико-электронные системы на рассеянном лазерном излучении».

1. Yin H., Chang S., Jia H., Yang Ji., Yang Ju. Non-line-of-sight multiscatter propagation model // J. Opt. Soc. Am. A. 2009. V. 26, N 11. P. 2466–2469.
2. 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.
3. Yin H., Jia H., Zhang H., Wang X., Chang S., Yang J. Vectorized polarization-sensitive model of non-line-of-sight multiple-scatter propagation // J. Opt. Soc. Am. A. 2011. V. 28, N 10. P. 2082–2085.
4. 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.
5. 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.
6. 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; 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. Opt. 2013. V. 26, N 5. P. 364–370.
7. Jagadeesh V.K., Choudhary Arpita, Bui Fr.M., 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 August, 2014. IEEE, 2014 P. 77–79.
8. Choudhary Arpita, Jagadeesh V.K., Muthuchidambaranathan P. Pathloss analysis of NLOS underwater wireless optical communication channel // Electronics and Communication Systems (ICECS), 2014 Int. Conf. on Coimbatore, 13–14 February, 2014. IEEE, 2014. P. 1–4.
9. Gabriel C., Khalighi M., Bourenane S., Léon P., Rigaud V. Monte-Carlo-based channel characterization for underwater optical communication systems // J. Opt. Commun. Netw. 2013. V. 5, N 1. P. 1–12.

10. Arnon S., Kedar D. Non-line-of-sight underwater optical wireless communication network // J. Opt. Soc. Am. A. 2009. V. 26, N 3. P. 530–539.
11. Yin H., Chang S., Wang X., Yang Ji., Yang Ju., Tan J. Analytical model of non-line-of-sight single-scatter propagation // J. Opt. Soc. Am. A. 2010. V. 27, N 7. P. 1505–1509.
12. Elshimy M.A., Hranilovic S. Non-line-of-sight single-scatter propagation model for noncoplanar geometries // J. Opt. Soc. Am. A. 2011. V. 28, N 3. P. 420–428.
13. 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.
14. Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назаралиев М.А., Дарбинян Р.А., Каргин Б.А., Еленов В.С. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, 1976. 283 с.
15. Каблукова Е.Г., Каргин Б.А. Эффективные дискретно-стохастические модификации локальных оценок метода Монте-Карло для задач лазерного зондирования рассеивающих сред // Вычисл. техн. 2012. Т. 17, № 3. P. 70–82.
16. Lotova G.Z. Modification of the double local estimate of the Monte Carlo method in radiation transfer theory // Russ. J. Num. Analysis Math. Modeling. 2011. V. 26, N 5. P. 491–500.
17. Михайлов Г.А., Лотова Г.З. Численно-статистическая оценка потока частиц с конечной дисперсией // Докл. РАН. 2012. Т. 447, № 1. С. 18–21.
18. 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; Belov V.V., Tarasenkova M.V. Three algorithms of statistical modeling of optical communication on scattered and bistatic sensing // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 6. P. 533–540.
19. Белов В.В., Тарасенков М.В. Алгоритмы статистического моделирования импульсных реакций бистатистических каналов связи [Электронный ресурс] // Тр. Междунар. конф. «Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики – 2015», посвященной 90-летию со дня рождения академика Гурия Ивановича Марчука. Ин-т вычисл. математики и матем. геофизики СО РАН. 19–23 октября 2015 г. Новосибирск: Абвей, 2015. С. 95–101.
20. 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 атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 8. С. 659–664; Belov V.V., Tarasenkova 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.
21. 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.
22. 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.
23. Belov V.V. Optical communication on scattered laser radiation // Proc. SPIE. 2017. V. 10466. CID: 10466 0H. [10466-24].
24. 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 атмосфер. и океана. 2017. Т. 30, № 2. С. 111–114. DOI: 10.15372/AOO20170201; Belov V.V., Abramochkin V.N., Gridnev Yu.V., Kudryavtsev A.N., Kulaev S.P., Tarasenkova M.V., Troitskii V.O., 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.
25. 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.
26. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Покровский Е.В., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Посты для мониторинга парниковых и окисляющих атмосферу газов // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20, № 1. С. 53–61.

V.V. Belov, Yu.V. Gridnev, A.N. Kudryavtsev, M.V. Tarasenkova, A.V. Fedosov. **Optoelectronic communication on scattered laser radiation in the UV wavelength range.**

Previous and new results obtained at the Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, on problems of optical communication on scattered laser radiation in the UV wavelength range are discussed. Examples of implementation of field experiments on optoelectronic communication at night and in the day time in 2017 and 2018 are presented.