

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛН

УДК 621.391.63; 535.361; 621.373.826

Бистатическая оптико-электронная связь в УФ-диапазоне длин волн. Полевые эксперименты в 2016 г.

В.В. Белов^{1,2}, В.Н. Абрамочкин¹, Ю.В. Гриднев¹, А.Н. Кудрявцев¹,
С.П. Кулаев², М.В. Тарасенков^{1,2}, В.О. Троицкий¹, А.В. Федосов^{1*}

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

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

Поступила в редакцию 13.09.2016 г.

Рассматриваются итоги первых полевых экспериментов, выполненных в ИОА СО РАН по проблемам многоадресных бистатических (загоризонтных или non-line-of-sight, сокращенно NLOS) оптико-электронных систем связи в УФ-диапазоне длин волн. Приводятся результаты экспериментальных оценок вероятностей ошибок и их среднеквадратических отклонений.

Ключевые слова: УФ-излучение, бистатическая связь, полевые эксперименты, вероятности ошибок связи и их СКО; UV radiation, bistatic communication, field experiments, probabilities of communication errors and their SD.

Введение

Теоретическим и экспериментальным исследованиям, связанным с оценками дальности действия и эффективности оптико-электронных систем связи (ОЭСС), работающих в атмосфере в видимом диапазоне длин волн, посвящено достаточно много работ в отечественной и зарубежной печати (например, [1–12]). Внешними факторами, ограничивающими область применимости таких ОЭСС, являются помехи, связанные с естественными и искусственными источниками излучения в этом диапазоне длин волн. Поэтому их применение на атмосферных трассах может быть особенно затруднено в дневное время суток.

Эта проблема исчезает или становится менее значимой, если в качестве источников излучения в ОЭСС использовать, например, лазеры в УФ-и, прежде всего, в солнечно-слепом диапазоне длин волн, что объясняет активность теоретических исследований в этом направлении [13–16], заметно усилившуюся в последнее десятилетие.

Итоги экспериментальных исследований по проблемам оптико-электронной связи обсуждаются, например, в [13–16]. В настоящей статье приводятся результаты первых полевых экспериментов, выполненных в ИОА СО РАН по проблемам многоадресных бистатических (загоризонтных или non-line-of-sight, сокращенно NLOS) ОЭСС.

Аппаратура, геометрические схемы экспериментов

В экспериментах в качестве базовой была использована аппаратная реализация ОЭСС NLOS, которая испытывалась в атмосфере и подробно описана в [8–10]. В ней источником служил стационарный лазер на бромиде меди (длина волны $\lambda = 510,6$ нм при средней мощности до 10 Вт), излучение которого через нелинейный кристалл ВВО преобразовывалось на длины волн $\lambda = 255,3; 272,1$ и 289,1 нм. В обсуждаемых ниже экспериментах использовано излучение на длине волны 289,1 нм (средняя мощность до 0,3 Вт), с частотой повторения импульсов 14 кГц, длительностью импульсов 30 нс, квадратным сечением пучка на входе в атмосферу (со стороной 2 мм) с полной угловой расходимостью по сторонам $2,5^\circ$. Выбор этой длины волны сделан на основе анализа рассеивающих и поглощающих свойств атмосферы в приземном слое. Приемная оптическая система собрана по схеме телескопа-рефрактора. Некоторые его характеристики:

* Владимир Васильевич Белов (belov@iao.ru); Владимир Николаевич Абрамочкин (ya.wna@yandex.ru); Юрий Владимирович Гриднев (yuri@iao.ru); Андрей Николаевич Кудрявцев; Сергей Павлович Кулаев; Михаил Викторович Тарасенков (tmv@iao.ru); Владимир Олегович Троицкий (qel@asd.iao.ru); Андрей Васильевич Федосов.

световой диаметр объектива — 94 мм, материал стекла — кварцевое КУ-1, класс однородности — 1, фокусное расстояние — 300 мм. Поле зрения приемной системы — 2°. В качестве преобразователя оптического излучения в электрический сигнал использован ФЭУ 142. В экспериментах измерялся интервал времени между синхроимпульсом и регистрацией информационного импульса (по максимальной его величине). Именно этот вид модуляции излучения (время-импульсная) использован в лабораторном макете ОЭСС.

Направления излучения в экспериментах показаны цифрами 1 и 2 на спутниковом снимке корпусов ИОА СО РАН (рис. 1). Стационарный лазерный источник располагался на 4-м этаже северной башни корпуса А Института (справа на рис. 1). В первой серии экспериментов излучение направлялось в сторону приемника, размещенного в главном корпусе Института (направление 1 на рис. 1). Стрелки 1 и 2 на рис. 1 — проекции на горизонтальную плоскость оптических осей лазерных пучков.

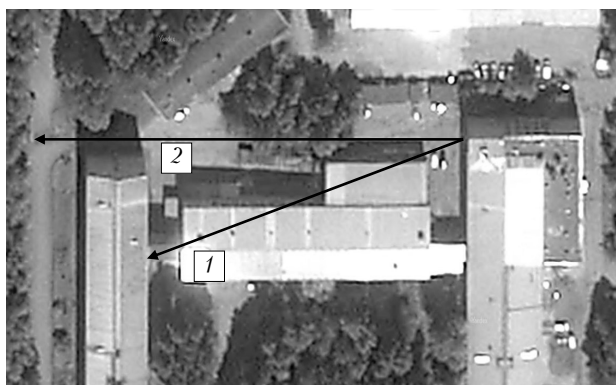


Рис. 1. Спутниковый снимок корпусов ИОА СО РАН и направления излучения стационарного лазерного УФ-источника

На рис. 2 приведены геометрические схемы трех серий этих экспериментов (вид сбоку).

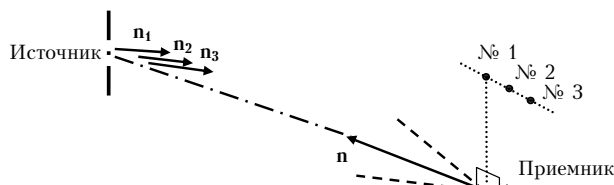


Рис. 2. Геометрические схемы первых экспериментов

Приемный телескоп размещался в помещении на третьем этаже и ориентировался стационарно на источник излучения. Излучение направлялось последовательно в точки № 1, 2 и 3. Точка № 1 соответствовала вектору направления \mathbf{n}_1 и находилась на расстоянии 3 м над приемником. Точкам № 2 и 3 соответствовали вектора направлений \mathbf{n}_2 и \mathbf{n}_3 , и они отстояли от точки № 1 на расстояния 4 и 8 м. Эта геометрия исключала попадание нерассеянного из-

лучения в объектив приемного телескопа. Длина линий связи составляла 96,2; 96,26 и 96,5 м.

Вторая серия экспериментов была проведена, когда лазерное излучение направлялось в свободную атмосферу над главным корпусом ИОА под углом 2° к горизонту. Приемный телескоп размещался на площадке за главным корпусом Института на земной поверхности под лучом 2 на рис. 1. Оптическая ось приемника направлялась под углами от 15° к горизонту (в сторону источника) до 135° (в сторону от источника). Длина линий связи в этих экспериментах варьировалась от 100 до 108 м.

Эксперименты состояли в следующем: тестовая информация вводилась в лазерное излучение, которое направлялось в среду, принималось оптико-электронной системой, ориентированной на рассеянный фон, декодировалось и сравнивалось с исходной для оценки вероятности ошибки передачи символов и среднеквадратичного отклонения ошибок. Ввод информации в лазерное излучение в описываемых экспериментах осуществлен через управление временем генерации импульсов.

Цели и результаты экспериментов

Цели экспериментов состояли в аппаратурной реализации и оценках качества оптико-электронной связи на рассеянном лазерном излучении в УФ-диапазоне длин волн с использованием тестовых информационных графических объектов. Качество связи определялось на основе расчетов в реальном масштабе времени вероятностей ошибок и их среднеквадратичных отклонений (подробно изложено, например, в [9, 17]).

На рис. 3 приведены в качестве примера зависимости вероятностей ошибок P и СКО от номера серии экспериментов, выполненных 20 мая 2016 г. по схеме на рис. 2 для точек № 1 и 3. Квадратами и треугольниками обозначены вероятности ошибок, а горизонтальными отрезками разных размеров — верхние и нижние границы СКО для точек № 1 и 3 соответственно.

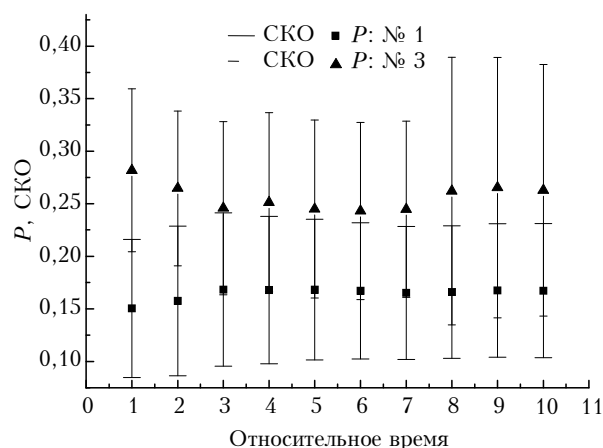


Рис. 3. Пример результатов оценивания качества связи в экспериментах по схеме на рис. 2 для точек № 1 и 3

Вероятности P и СКО, соответствующие точке № 2 на рис. 2 у всех серий экспериментов, лежат между значениями для точек № 1 и 3. Из сравнения этих результатов следует, что качество связи незначительно ухудшается при увеличении протяженности линии связи (последовательный переход от точки № 1 к точке № 3). Этот вывод становится достаточно очевидным, если учесть, что за 2 ч, в течение которых проводились эксперименты, оптические условия в приземной атмосфере по данным станции ТОР [18] существенно не изменились.

Уровни полученных в экспериментах 15 июня 2016 г. вероятностей ошибок связи и их СКО (ось лазерного излучения показана цифрой 2 на рис. 1) представлены на рис. 4. Для иллюстрации полученных результатов в этих экспериментах выбраны две ситуации: А — оптическая ось приемной системы ориентирована в полусферу направлений на источник под углом 45° к горизонту; Б — эта ось ориентирована в полусферу направлений от источника под углом 135° к горизонту. На рис. 4 по оси абсцисс приведено относительное время, соответствующее номеру серии экспериментов для ситуаций А и Б.

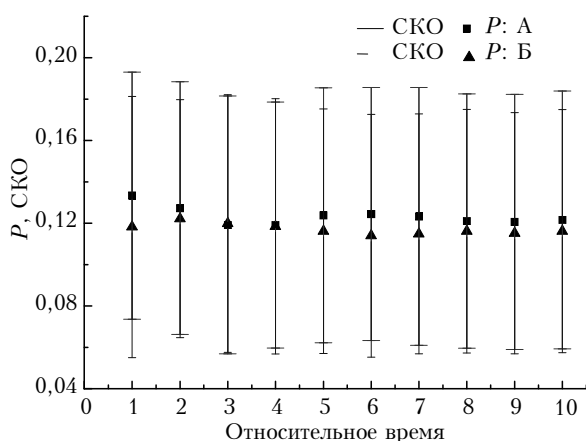


Рис. 4. Пример результатов оценивания качества связи в экспериментах на рис. 1 (ось лазерного излучения обозначена цифрой 2)

Из сравнения вероятностей P и СКО на рис. 4 можно сделать следующие выводы. Ситуации А и Б характеризуются достаточно близкими их значениями. Это можно объяснить тем, что преобладающим источником рассеяния излучения на центральной длине волны излучения $\lambda = 289,1$ нм является молекулярная, а не аэрозольная составляющая атмосферы, для которой индикатриса рассеяния симметрична относительно направлений в переднюю и заднюю полусферы. Это приводит к тому, что при геометрических параметрах линий связи для ситуаций А и Б рассеянные молекулами воздуха потоки становятся сравнимыми.

Причиной этого может быть то, что эксперименты, проведенные для ситуации Б, выполнялись на 1,5 ч позже. Все эксперименты были проведены с 21:00 до 23:00 местного времени. Можно предположить, и это подтверждают данные станции ТОР

[18], что за это время концентрация аэрозоля уменьшилась и, начиная со времени проведения 6-й серии экспериментов для ситуации А, оставалась почти постоянной. Поэтому и вариации значений P и СКО на рис. 4 для ситуации Б несколько меньше. В частности, изменения вероятности P в ситуации А не превышали 0,014, модуля СКО — 0,018, а в ситуации Б изменения вероятности P не превышали значений 0,009, модуля СКО — значения 0,006.

Представляет интерес сравнить качество связи в видимом и УФ-диапазонах длин волн. Для этого обратимся к работе [8], в которой приведены примеры оценок вероятностей ошибок и их СКО, полученных в полевых экспериментах с лабораторным макетом бистатической ОЭСС в видимом диапазоне длин волн ($\lambda = 510,6$ нм) при протяженности линий связи более 10 км. Из этого сравнения следует, что качество 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 сумеречное время суток, что мощность лазерного излучения в видимом диапазоне была выше более чем в 15 раз, что применялись различные ФЭУ, то результат сравнения не может вызывать особых сомнений.

Заключение

Эксперименты, выполненные в ИОА СО РАН с помощью созданного лабораторного макета многоадресной бистатической (загоризонтной) оптико-электронной системы связи в УФ-диапазоне длин волн ($\lambda = 289,1$ нм), позволяют сделать следующие предварительные выводы.

1. Существует возможность создания и качественного функционирования бистатических многоадресных ОЭСС в УФ-диапазоне длин волн с дальностью действия, превышающей сотни и, возможно, тысячи метров.

2. Оптико-электронная связь в УФ возможна как при ориентации оптической оси приемной системы в полусферу направлений на источник с углами к горизонту более 10° , так и в полусферу направлений от источника до углов наклона оси оптической приемной системы к горизонту до $150\text{--}160^\circ$.

3. Для повышения качества связи и увеличения дальности действия систем бистатической ОЭСС необходимо повышение стабильности параметров излучения лазера и ФЭУ, повышение мощности и уменьшение спектральной полосы лазерного излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 15-01-00783-А, 15-07-06811-А, проекта № 8.1.27.2015 в рамках Программы «Научный фонд им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета» в 2016 г.

1. 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.

2. 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.
3. 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.
4. Yin H., Chang S., Jia H., Yang Ji., Yang Ju. Non-line-of-sight multiscatter propagation model // J. Opt. Soc. Amer. A. 2009. V. 26, N 11. P. 2466–2469.
5. 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. Amer. A. 2011. V. 28, N 10. P. 2082–2085.
6. Belov V.V., Tarasenkov M.V., Abramochkin V.N., Ivanov V.V., Fedosov A.V., Troitskii V.O., Shiyarov 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. Menglong Wu, Dahai Han, Xiang Zhang, Feng Zhang, Min Zhang, Guangxin Yue. Experimental research and comparison of LDPC and RS channel coding in ultraviolet communication systems // Opt. Express. 2014. V. 22, N 5. P. 5422–5430.
8. 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 бистатические каналы связи с рассеянием. Часть 2. Полевые эксперименты 2013 г. // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 8. С. 659–664; 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. 202–209.
9. Belov V.V., Tarasenkov M.V., Abramochkin V.N. Bistatic atmospheric optoelectronic communication systems (Field experiments) // Techn. Phys. Lett. 2014. V. 40, iss. 10. P. 871–874.
10. Belov V.V., Tarasenkov M.V., Abramochkin V.N., Troitskii V.O. Over-the-horizon optoelectronic communication systems // Rus. Phys. J. 2014. V. 57, N 7. P. 202–208.
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. Amer. A. 2010. V. 27, N 7. P. 1505–1509.
12. Белов В.В., Тарасенков М.В. Три алгоритма статистического моделирования в задачах оптической связи на рассеянном излучении и бистатического 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.
13. Пожидаев В.Н. Осуществимость линий связи ультрафиолетового диапазона, основанных на эффекте молекулярного и аэрозольного рассеяния в атмосфере // Радиотех. и электрон. 1977. Т. XXII, № 10. С. 2190–2192.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Программа для коррекции сигналов, принимаемых по оптическому каналу связи. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2014617199 от 22.05.2014. Димаки В.А., Гриднев Ю.В. Правообладатель: ИОА СО РАН (RU).
18. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Иглев 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 атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 1. С. 53–61.

V.V. Belov, V.N. Abramochkin, Yu.V. Gridnev, A.N. Kudryavtsev, S.P. Kulaev, M.V. Tarasenkov, V.O. Troitskii, A.V. Fedosov. **Bistatic optoelectronic communication in the UV wavelength range. Field experiments 2016.**

In the report results of the first field experiments on multiple-address bistatic (over-the-horizon, non-line-of-sight (NLOS)) optoelectronic communication systems in the UV wavelength range performed at the IAO SB RAS are considered. Experimental estimates of the error probabilities and their standard deviations are presented.