

11

Бистатистические атмосферные оптико-электронные системы связи (полевые эксперименты)

© В.В. Белов^{1,2}, М.В. Тарасенков^{1,2}, В.Н. Абрамочкин¹

¹ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск

² Национальный исследовательский Томский государственный университет

E-mail: Belov@iao.ru, TMV@iao.ru

Поступило в Редакцию 30 апреля 2014 г.

Рассмотрены некоторые результаты полевых экспериментов по атмосферной оптико-электронной связи, осуществленных в весенне-летне-осенний период в 2013 г. Эксперименты проведены с целью оценки возможности передачи тестовой информации по бистатистическим каналам связи в условиях безоблачной, облачной атмосферы. Длина волны излучения 510.6 nm, протяженность каналов связи до 17 km.

Оптико-электронные системы связи (ОЭСС), содержащие атмосферный канал, можно разделить условно на следующие [1]: а) системы связи в пределах прямой видимости (line-of-sight); б) системы связи, работающие на рассеянном и отраженном излучении, т. е. бистатистические или, как частный случай, загоризонтные (over-the-horizon). Говоря о бистатистической связи, мы подчеркиваем, что она осуществляется вне прямой видимости источника излучения и при этом не обязательно приемник размещается за горизонтом.

Современные, иногда называемые „открытые оптические системы связи“ (т. е. не использующие в качестве канала распространения оптическое волокно), построенные на лазерах, применяются для передачи информации именно в пределах прямой видимости передатчика приемником.

Теоретические и экспериментальные исследования ведутся с целью развития 2 типов ОЭСС (line-of-sight и over-the-horizon). Так, в [2] методом статистического моделирования исследовано влияние отражающих свойств поверхности, над которой осуществляется связь, на импульсную переходную характеристику канала связи line-of-sight при условии

существенной загруженности атмосферного канала аэрозолем. Для надежного приема сигнала в различных погодных условиях применен ряд перспективных вариантов систем связи, работающих по схеме line-of-sight (например, [3]).

Исследования в области загоризонтной связи выполнены в существенно меньшем объеме. В частности, в работе [4] рассмотрено влияние метеорологической дальности видимости и параметров приемной системы на полосу пропускания внешнего канала связи; в [5] приведены результаты оценок дальности действия загоризонтных систем связи для набора длин волн излучения лазера и условий их функционирования (ночное, дневное время); в [6] дан анализ возможности осуществления связи по загоризонтной схеме в УФ-диапазоне длин волн. Там же приведены оценки предельной дальности ее осуществления, которая на длинах волн в области $0.290 \mu\text{m}$ может достигать нескольких километров и т. д.

Существует ли необходимость в продолжении исследований и в создании бистатических ОЭСС, учитывая, что существуют и хорошо развиты системы связи в радиодиапазоне (в том числе спутниковые), которые в отличие от оптических обладают явным преимуществом — они всепогодные. Совершенно очевидно, что оптические системы связи не в состоянии их заменить, но они востребованы, если радиосвязь нежелательна, затруднена или невозможна. Различные аспекты исследования характеристик таких систем и возможности их создания рассмотрены в таких работах как, например, [5–8]. Однако они не дают исчерпывающего ответа на вопросы, связанные с влиянием оптико-геометрических параметров и особенностей схем формирования атмосферных каналов связи на характеристики, определяющие эффективность и дальность действия бистатических ОЭСС.

В работе [9] нами рассмотрены вопросы выбора метода теоретических исследований и аппаратной реализации лабораторного макета бистатической оптико-электронной системы связи, приведены примеры ее осуществления в полевых условиях в 2011 и 2012 гг. в схеме трансляции информации через водно-аэрозольный шлейф от трубы тепловой электростанции и в схеме отражения от нее. Эксперименты были выполнены при импульсном источнике лазерного излучения на длине волны 510.6 nm , с частотой $f = 11 \text{ kHz}$, при угловой расходимости пучка $\Delta\nu = 0.06 \text{ mrad}$ и его диаметре $\varnothing = 15 \text{ mm}$, длительности импульса $\Delta t = 30 \text{ ns}$, мощности в импульсе $P = 1.5 \text{ W}$.

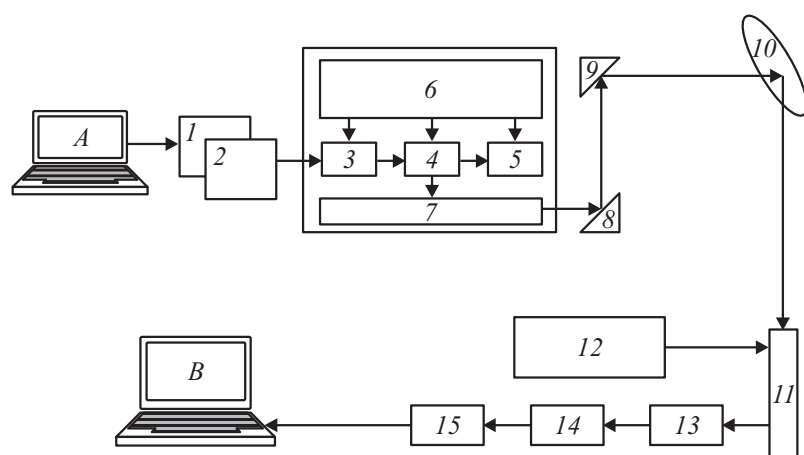


Рис. 1. Блок-схема лабораторного макета бистатической лазерной системы связи: *A* — „передающий“ компьютер; *1* — интерфейс; *2* — устройство кодирования данных; *3* — задающий генератор лазера; *4* — модулятор; *5* — тиратрон лазера; *6* — источник питания лазера; *7* — лазерная трубка; *8, 9* — юстировочные узлы; *10* — рассеивающий объем, поверхность; *11* — телескоп + ФЭУ; *12* — блок питания ФЭУ; *13* — усилитель сигнала; *14* — устройство декодирования; *15* — интерфейс; *B* — „принимающий“ компьютер.

Протяженность канала связи в этих экспериментах достигала 10 km. Структурная блок-схема экспериментальной бистатической ОЭСС, на основе которой выполнены эксперименты, приведена на рис. 1.

Цель исследований в 2013 г. состояла в экспериментальном подтверждении возможности осуществления бистатической оптико-электронной связи на рассеянном излучении в условиях безоблачной и облачной атмосферы. Эксперименты были выполнены в весенне-летне-осенний период. Они были проведены с этим же макетом ОЭСС, но при мощности лазерного источника, достигавшей значения $P = 10 \text{ W}$ в импульсе. Геометрическая схема организации связи приведена на рис. 2. Протяженность канала связи достигала 17 km.

Для оценки качества связи использовались среднее значение и среднеквадратичное отклонение ошибки за сеанс связи, при котором фиксировались все геометрические параметры схемы эксперимента

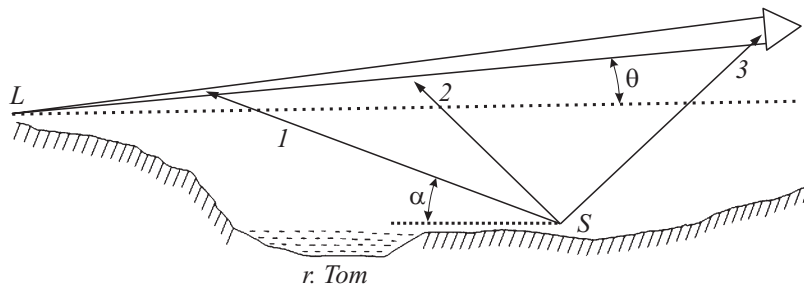


Рис. 2. Геометрическая схема экспериментов 2013 г. Обозначения: L — источник излучения, S — приемная система, 1, 2 и 3 — варианты направления оптической оси приемного телескопа на информационный лазерный луч, α и θ — углы места (элевации) оптической оси приемного телескопа и оси лазерного пучка соответственно.

(рис. 2). Пусть Z_i — переданный символ, z_i — принятый. Будем считать, что

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

Пусть в сеансе связи передано N символов, причем

$$N = \sum_{j=1}^m n_j, \quad (2)$$

т. е. принятый ряд символов разбит на m пачек по n_j символов в каждой. Будем считать за случайную величину среднее количество ошибочно принятых символов:

$$y_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} x_i. \quad (3)$$

Тогда средняя вероятность ошибки при передаче информации по каналу за сеанс связи определяется как:

$$\bar{y} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_j, \quad (4)$$

а среднее квадратичное отклонение:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}. \quad (5)$$

Из статистических характеристик качества передачи информации, определенных соотношениями (1)–(5), следует, что причинами ошибок могут быть как атмосферные искажения, так и изменения характеристик приемо-передающих оптико-электронных блоков (например, мощность лазерного излучения, шумы ФЭУ и т. п.).

Анализ полученных в экспериментах статистических характеристик (4) и (5) показал, что они зависят от мощности лазерного излучения (уменьшаясь пропорционально при ее росте) и от чувствительности ФЭУ. Охлаждение использованного в экспериментах ФЭУ 84 в одном из экспериментов с $+6.7$ до -17°C привело к уменьшению вероятности ошибок почти на порядок. Для исключения или уменьшения влияния аппаратных причин возникновения сбоев в работе загоризонтных ОЭСС методика проведения полевых экспериментов должна предусматривать гарантированную стабильность мощности передатчика излучения и постоянную температуру ФЭУ.

Некоторые сеансы связи характеризовались идеальным качеством, т. е. $\bar{y} = 0$ и $\bar{\sigma} = 0$ (например, 04 сентября) или близким к нему (например, 11 сентября); в других ситуациях значения \bar{y} достигали уровня 0,8, а $\bar{\sigma} = 0.9$ (например, 29 сентября). Примеры оценок \bar{y} и $\bar{\sigma}$ приведены на рис. 3.

На длине волны 510,6 nm, когда перехват лазерного луча приемной системой осуществляется в безоблачной атмосфере, качество связи определяется рассеянием излучения на аэрозоле. Этот вывод следует из сравнения коэффициентов аэрозольного и молекулярного рассеяния в приземном слое атмосферы. Однако не удалось установить устойчивые корреляционные связи между вероятностью ошибок и измеренными значениями метеопараметров, концентрацией аэрозоля и коэффициентом аэрозольного ослабления у земной поверхности.

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность осуществления бистатистической оптико-электронной связи на эффекте рассеяния лазерного излучения как в условиях безоблачной, так и облачной атмосферы. Для установления корреляционных связей между вероятностью ошибок \bar{y} и метеорологическими параметрами или оптическими

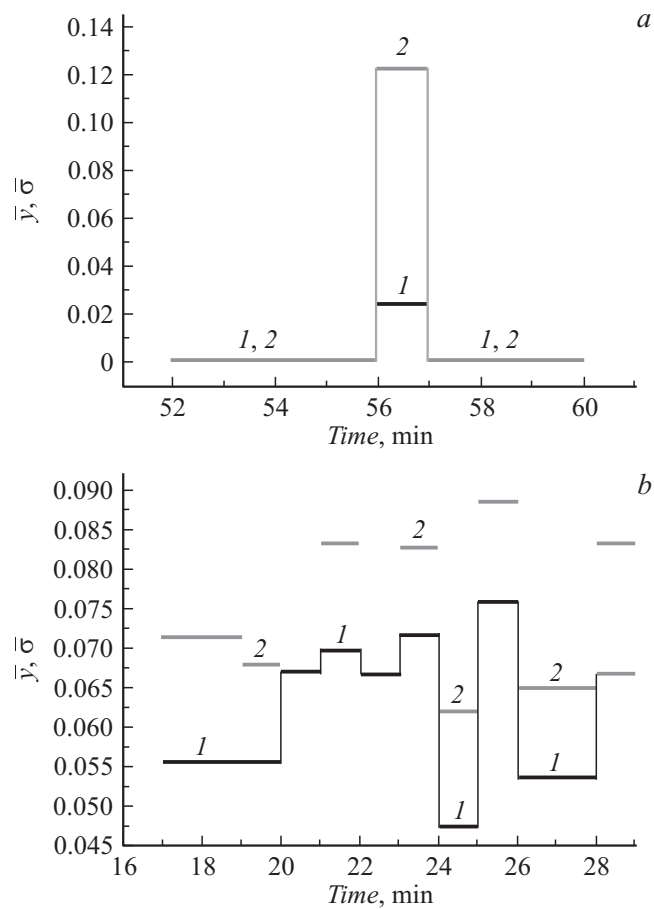


Рис. 3. Примеры оценок характеристик качества связи, осуществленной: *a* — с 21 ч 52 мин до 22 ч 11 сентября, *b* — с 21 ч 17 мин до 21 ч 28 мин 25 сентября. 1 — средние значения ошибок, 2 — среднеквадратичное отклонение.

характеристиками атмосферы необходимо либо проведение экспериментальных исследований с гарантированной стабильностью всех параметров приемо-передающей ОЭС и с комплексным контролем состояния атмосферы, либо осуществление теоретических исследований,

выполненных с учетом всех физических процессов, сопровождающих распространение оптического излучения по атмосферному каналу связи.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного контракта 14.515.11.0030, гранта РФФИ № 14-01-00211_А, интеграционного проекта СО РАН № 131а и гранта президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-4714.2014.5.

Список литературы

- [1] *Украинцев Ю.Д., Цветов М.А.* История связи и перспективы развития телекоммуникаций. Ульяновск: УлГТУ, 2009. 128 с.
- [2] *Белов В.В., Борисов Б.Д., Серебренников А.Б.* // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т.12. № 8. С. 669–673.
- [3] *Мирошниченко И., Сизов В.* // Фотоника. 2009. Т 16. № 4. С. 22–24.
- [4] *Милютин Е.Р.* // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. № 6. С. 673–675.
- [5] *Пожидает В.Н.* // Радиотехника и электроника. 1977. Т. 22. № 11. С. 2265–2271.
- [6] *Пожидает В.Н.* // Радиотехника и электроника. 1977. Т. 22. № 10. С. 2190–2192.
- [7] *Милютин Е.Р.* // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. № 6. С. 673–675.
- [8] *Mooradian G.C., Geller M., Levine P.H., Stotts L.B., Stephens D.H.* // Appl. Opt. 1980. V. 19. N 1. P. 11–30.
- [9] *Белов В.В., Тарасенков М.В., Абрамочкин В.Н., Иванов В.В., Федосов А.В., Троицкий В.О., Шиянов Д.В.* // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 4. С. 261–267.