

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛН

УДК 621.391.63; 535.361; 621.373.826

Атмосферные бистатические каналы связи с рассеянием. Часть 2. Полевые эксперименты 2013 г.

**В.В. Белов^{1,2}, М.В. Тарасенков^{1,2}, В.Н. Абрамочкин¹, В.В. Иванов¹,
А.В. Федосов¹, Ю.В. Гриднев¹, В.О. Троицкий¹, В.А. Димаки^{1*}**

¹*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

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

Поступила в редакцию 19.02.2014 г.

Рассмотрены результаты полевых экспериментальных исследований влияния атмосферных условий и некоторых аппаратных характеристик на качество передачи информации в бистатической оптико-электронной системе связи (ОЭСС) в видимом диапазоне длин волн. Длина атмосферного канала достигала 17 км. В качестве источника сигналов использовалось излучение лазера на парах бромида меди на длине волны 510,6 нм.

Показано, что бистатическая, или загоризонтная, ОЭСС может осуществляться в условиях как облачной, так и безоблачной атмосферы. Оценены средние значения и среднеквадратичные отклонения ошибок связи в различных атмосферно-оптических условиях и при вариациях некоторых характеристиках отдельных блоков аппаратуры.

Ключевые слова: бистатические оптико-электронные системы связи, полевые эксперименты, оптическое, метеорологическое состояние атмосферы; bistatic opto-electronic communication systems, field experiments, optical and meteorological state of the atmosphere.

Введение

В работе [1] мы рассмотрели общие вопросы организации бистатических (загоризонтных) оптико-электронных систем связи (ОЭСС), обосновали выбор метода Монте-Карло для теоретического исследования области их применимости в зависимости от оптико-геометрических схем и условий их функционирования, привели описание лабораторной реализации экспериментальной установки и пример ее испытания в 2012 г. в реальных атмосферных условиях. В 2013 г. в летне-осенний период была проведена серия полевых экспериментов с целью оценки возможности и качества приема информации по бистатическим оптическим каналам связи при различных атмосферных условиях и вариациях геометрических параметров приемопередающей схемы ОЭСС.

В настоящей статье описаны аппаратура и условия этих экспериментов, а также их результаты.

Аппаратура и оптико-геометрические условия экспериментов

Блок-схема лабораторного макета бистатической ОЭС приведена в [1, рис. 3]. В качестве источника излучения использовался лазер на парах бромида меди [2], созданный в ИОА СО РАН и имеющий характеристики: длина волны излучения $\lambda = 510,6$ нм, частота повторения импульсов $f = 11$ кГц, длительность импульса $\Delta t = 30$ нс, мощность $P = 4 \cdot 10$ Вт, диаметр пучка на входе в атмосферу $\varnothing = 15$ мм; расходимость излучения $\Delta v = 0,06$ мрад.

Угол поля зрения приемного телескопа FOV составлял 2° , в качестве фотоприемника использовался ФЭУ-84. Оптическая ось приемного телескопа пересекала оптическую ось лазерного пучка, и ее наклон относительно горизонтальной плоскости задавался углом α (рис. 1).

Передающая ОЭС располагалась в северной башне блока «А» ИОА СО РАН на высоте $h_0 = 13$ м от поверхности Земли, или 173 м над ур. м., направление оси лазерного пучка определялось углом места θ , который варьировался от 5 до 15° , и азимутальным углом φ , который мог изменяться в пределах $\pm 10^\circ$ в горизонтальной плоскости от направления на приемную ОЭС, расположенную на расстоянии

* Владимир Васильевич Белов (belov@iao.ru); Михаил Викторович Тарасенков (tmv@iao.ru); Владимир Николаевич Абрамочкин (ya.wna@yandex.ru); Владимир Васильевич Иванов (ilvlvltomsk@mail.ru); Андрей Васильевич Федосов; Юрий Владимирович Гриднев (yuri@iao.ru); Владимир Олегович Троицкий (qel@asd.iao.ru); Виктор Анатольевич Димаки.

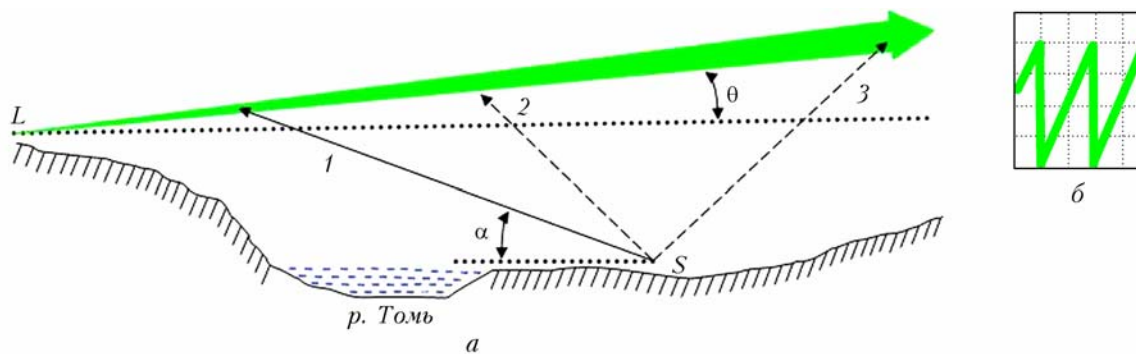


Рис. 1. Геометрическая схема экспериментов (а) и фрагмент тестового графического сигнала (б)

$Y_N = 8,73$ км от передающей ОЭС (по прямой линии). Лазерный информационный пучок проходил последовательно над городом, над р. Томь, над пригородной зоной, включающей в себя последовательно поле сельскохозяйственных культур, жилой поселок, лесные массивы. Мобильная приемная оптико-электронная система могла размещаться в любой доступной для автотранспорта точке. Основные эксперименты были проведены для фиксированной точки расположения приемной системы в поле, отмеченной точкой S на рис. 1, а (высота над уровнем моря 80 м), на котором также приведены общие черты профиля рельефа земной поверхности под лазерным пучком, исходящим из точки L . Протяженность оптической трассы для позиции 2 (см. рис. 1) составляла до 11 км, для позиции 3 – до 17 км.

Эксперименты проводились в период с августа по октябрь 2013 г. в темное время суток, в условиях облачной (отдельные облачные образования, сплошная облачность) и безоблачной атмосферы и при осадках (дождь). В качестве информации, передаваемой по атмосферному бистатистическому каналу, для оценки качества связи использовалось изображение графического тестового сигнала в виде периодической структуры (см. рис. 1, б).

Каждый эксперимент осуществлялся по следующей схеме. Фиксировалась одна из двух ориентаций передающего лазерного пучка с углами $\theta \approx 5$ и 15° при $\varphi \approx 0^\circ$. Приемный телескоп ориентировался

в направлениях 1 или 2 (см. рис. 1), соответствующих значениям угла α от 15 до 85° . Ориентация телескопа в направлении 3 (см. рис. 1) осуществлялась только в тех случаях, когда рассеяние из этих точек фиксировалось визуально. Ориентация передающего излучения при $\varphi \approx \pm 10^\circ$ осуществлялась выборочно для контроля функционирования связи. Длительность каждого сеанса связи при фиксированной геометрии эксперимента зависела от атмосферных условий и варьировалась от 7 до 30 мин. При этом передавалась и записывалась на компьютер информация (графический тест), содержащая от 7000 до 40000 символов. В каждом эксперименте сеанс длился от 30 мин до 3 ч.

На рис. 2 в качестве примеров приведены отдельные кадры видеоизображений рассеянного в атмосфере лазерного излучения, регистрируемого приемной системой при различных оптических условиях в атмосфере. В случае (рис. 2, а) прием информации осуществлялся при ориентации регистрирующей ОЭС на конкретную область луча и атмосферная ситуация была безоблачной. На рис. 2, б связь осуществлялась на рассеянном излучении на нижней границе облака, на рис. 2, в – на аэрозольных неоднородностях безоблачной, но сильно замутненной атмосферы. Видеозапись осуществлена с помощью активно-импульсной высокочувствительной ОЭС ЗОНД+, работавшей в пассивном режиме. Система ЗОНД+ создана в ИОА СО РАН и является модификацией ОЭС ЗОНД [3].

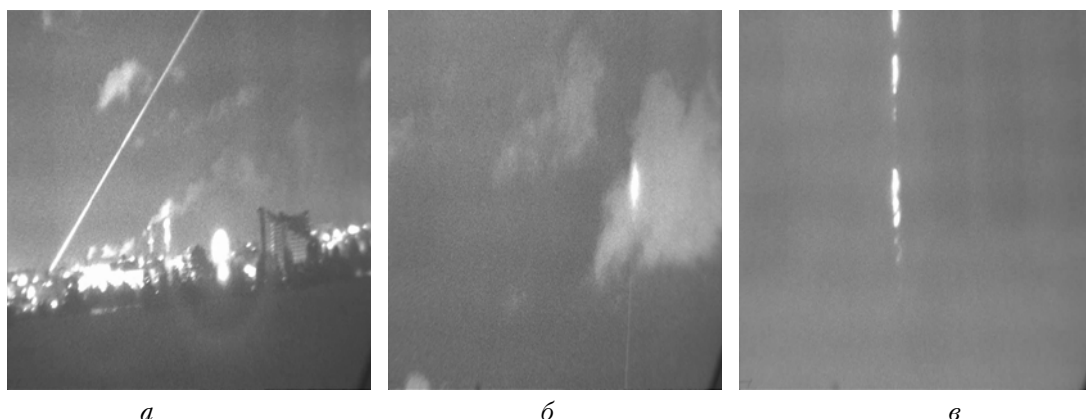


Рис. 2. Кадры из видеозаписей информационного лазерного луча, рассеянного над городом (а); рассеянного от облачного образования в поле зрения приемной системы (б) и рассеянного на аэрозольных неоднородностях в поле зрения приемной системы (в)

Контроль состояния атмосферного канала бистатической связи осуществить в полевых условиях невозможно, поэтому для анализа влияния оптических и метеорологических условий на качество работы ОЭСС использовались следующие параметры и источники их измерения. Метеорологическая дальность видимости S_M измерялась с интервалом 1 ч на территории Большого экспериментального комплекса ИОА СО РАН [4], удаленного от точки S (см. рис. 1) на расстояние 12 км. Диапазон измерений S_M ограничивался сверху значением $S_M = 30$ км. Давление, влажность, концентрация аэрозоля (с размерами частиц более 0,3 мкм) измерялись на ТОР-станции [5], размещенной на Высотной станции ИОА СО РАН, которая находится на расстоянии 400 м от излучателя бистатической ОЭСС. Коэффициент аэрозольного ослабления β_{ext}^a атмосферы на длине волны $\lambda = 510,6$ нм определялся на горизонтальной трассе, исходящей из здания, где размещен передающий лазер ОЭСС, с помощью аппаратуры и по методике, описанных в [6–8].

Результаты экспериментов

Для оценки качества связи использовались среднее значение и среднеквадратическое отклонение ошибки за сеанс связи, при котором фиксировались все геометрические параметры схемы эксперимента (см. рис. 1). 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, т.е.

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

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 среднеквадратическое отклонение

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

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

Анализ средних значений ошибок и их среднеквадратических отклонений показал, что некоторые сеансы связи характеризовались идеальным качеством связи, т.е. $\bar{y} = 0$ и $\bar{\sigma} = 0$ (например, 4 сентября) или близком к нему (например, 11 сентября), в других ситуациях значения \bar{y} достигали уровня 0,8, а $\bar{\sigma} = 0,9$ (например, 29 сентября). Примеры этих ситуаций приведены на рис. 3.

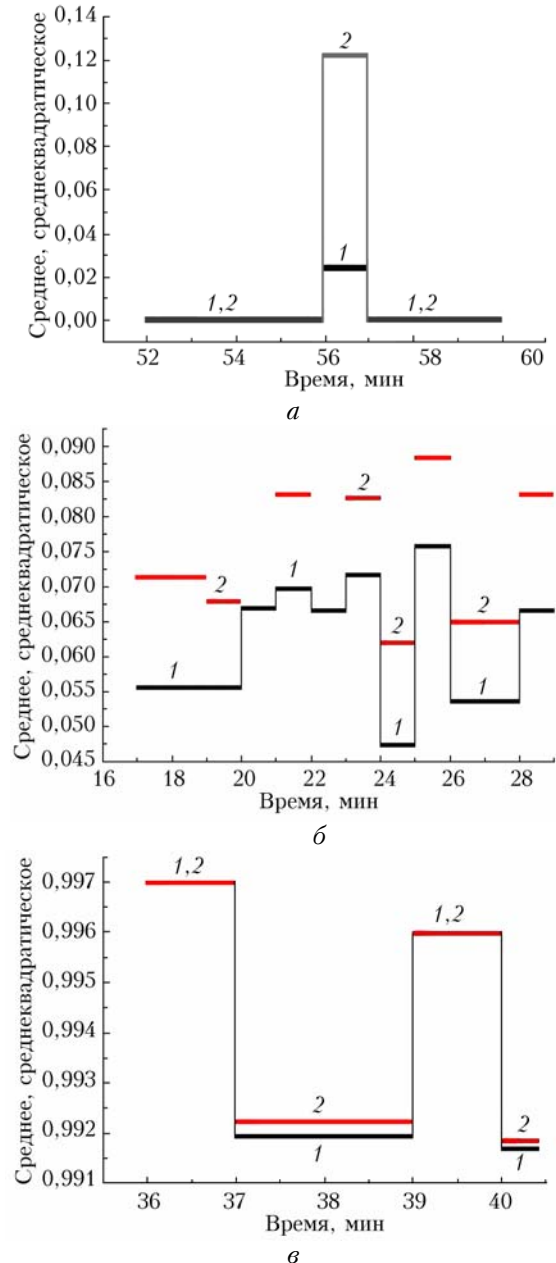


Рис. 3. Примеры характеристик качества связи: *a* – сеанс связи 21:52–22:00 11 сентября; *b* – 21:17–21:28 25 сентября; *v* – 20:36–20:40 29 сентября; 1 – средние значения ошибок, 2 – среднеквадратическое отклонение

Для выяснения причин вариаций средних ошибок \bar{y} обратимся к результатам изменений концентрации аэрозоля, коэффициентов пропускания, метеорологической дальности видимости, температуры,

влажности и давления в приземном слое атмосферы. Результаты этих измерений приведены на рис. 4.

Поскольку физическая основа бистатической связи – эффект рассеяния, а в нем участвуют как аэрозольная, так и молекулярная составляющие атмосферы, то прежде всего нужно выяснить, какой из этих процессов определяет ее качество или они в одинаковой мере влияют на качество связи в проведенной серии экспериментов. С этой целью сравним значения коэффициентов молекулярного β_{sct}^m и аэрозольного β_{sct}^a рассеяния. Коэффициенты молекулярного рассеяния рассчитаны по формулам, приведенным в [9] с использованием данных о температуре и давлении, измеренных на ТОР-станции [5]. Учитывая, что коэффициенты аэрозольного ослабления и рассеяния на длине волны 510,6 нм с точностью порядка 90% совпадают (табл. 1), в табл. 2 приведены не β_{sct}^a , а измеренные значения β_{ext}^a .

Таблица 1

Коэффициенты аэрозольного рассеяния и ослабления в зависимости от метеодальности видимости

S_M , км	β_{sct}^a , км ⁻¹	β_{ext}^a , км ⁻¹
1	4,1058	4,3317
2	2,0474	2,1603
5	0,81258	0,85747
10	0,39992	0,42206
15	0,26041	0,27485
25	0,14884	0,15712
50	0,06824	0,072029
99	0,02834	0,029914

Из табл. 2 следует, что коэффициенты аэрозольного ослабления (рассеяния) значительно (почти на порядок) превышают коэффициенты молекулярного рассеяния, т.е. можно предполагать, что на безоблачных трассах именно аэрозольная составляющая атмосферы определяет качество передачи информации в бистатических ОЭСС, по крайней мере на длине волны 510,6 нм.

Другими источниками ошибок при передаче информации по атмосферным каналам связи, как уже отмечалось, могут быть изменения характеристик отдельных блоков аппаратуры. При выбранном способе информационной модуляции (временным импульсом) на качество приема информации прежде всего влияет мощность лазерного излучения, которая в эксперименте изменялась в диапазоне 4–10 Вт и измерения выполнялись эпизодически. При уменьшении мощности P можно ожидать ухудшения ка-

чества связи, т.е. увеличения вероятности ошибок \bar{y} . Это подтверждается, например, сравнением значений \bar{y} , полученных для экспериментов, выполненных 16 сентября, когда $P = 6$ Вт, и 25 сентября, когда $P = 2$ Вт. В этих экспериментах $\bar{y} = 0,01$ и 0,572 соответственно, температура воздуха 25 сентября была + 14,7 °С, а 16 сентября – 4,3 °С, метеодальность видимости $S_M > 30$ км 25 сентября и 7 км 16 сентября, восстановленный из измерений коэффициент аэрозольного ослабления в 21 ч 16 сентября $\beta_{ext}^a = 0,102$ км⁻¹, 25 сентября $\beta_{ext}^a = 0,260$ км⁻¹.

Таблица 2

Коэффициенты аэрозольного ослабления из измерений (индекс a) и рассчитанные по формулам в [10] коэффициенты молекулярного рассеяния (индекс m) в зависимости от номера дня в году

Номер дня года	β_{ext}^a , км ⁻¹	β_{sct}^m , км ⁻¹
213	0,430	0,014857
214	0,224	0,015022
247	0,193	0,014923
248	0,083	0,01541
253	0,123	0,015305
254	0,084	0,015401
255	0,186	0,015836
259	0,102	0,015948
260	0,058	0,016009
262	0,103	0,015946
263	0,108	0,01605
265	0,105	0,016032
268	0,260	0,015224
272	0,106	0,016095
273	0,063	0,01591
275	0,163	0,015799

В связи с этим прежде чем назвать основную причину резкого изменения ошибок \bar{y} (температура, мощность излучения лазера или аэрозольное ослабление), рассмотрим влияние температуры ФЭУ на качество связи в полевых экспериментах, выполненных в 2013 г. Ответ на этот вопрос содержится в табл. 3, где приведены значения \bar{y} и $\bar{\sigma}$ в зависимости от времени осуществления сеансов связи.

Первый сеанс проведен без принудительного охлаждения ФЭУ, и его температура соответствовала температуре окружающей среды, т.е. $T = +6,7$ °С (2 октября 2014 г.). Второй и следующие сеансы проведены при включенной холодильной установке, которая охлаждала ФЭУ до температуры –17 °С в течение 30 мин. Как видим, температура ФЭУ

Таблица 3

Выборочные средние и среднеквадратические отклонения ошибок связи в экспериментах 01.10.2013 г.

Время	\bar{y}	$\bar{\sigma}$	Время	\bar{y}	$\bar{\sigma}$	Время	\bar{y}	$\bar{\sigma}$
20:35	0,538	0,565	20:55	0,053	0,065	21:08	0,043	0,060
20:36	0,277	0,308	20:56	0,046	0,059	21:09	0,035	0,069
20:37	0,221	0,252	20:57	0,054	0,065	21:11	0,030	0,041
20:38	0,143	0,163	20:58	0,089	0,103	21:12	0,041	0,054
20:39	0,114	0,135	20:59	0,103	0,120	21:13	0,033	0,051
20:48	0,043	0,061	21:02	0,064	0,082	21:14	0,026	0,035
20:49	0,060	0,079	21:03	0,055	0,063	21:15	0,026	0,039
20:50	0,068	0,086	21:04	0,041	0,054	21:16	0,029	0,043
20:51	0,083	0,106	21:05	0,039	0,060	21:17	0,031	0,049
20:53	0,069	0,081	21:06	0,040	0,054	21:18	0,030	0,047
20:54	0,039	0,054	21:07	0,035	0,046	21:20	0,024	0,040

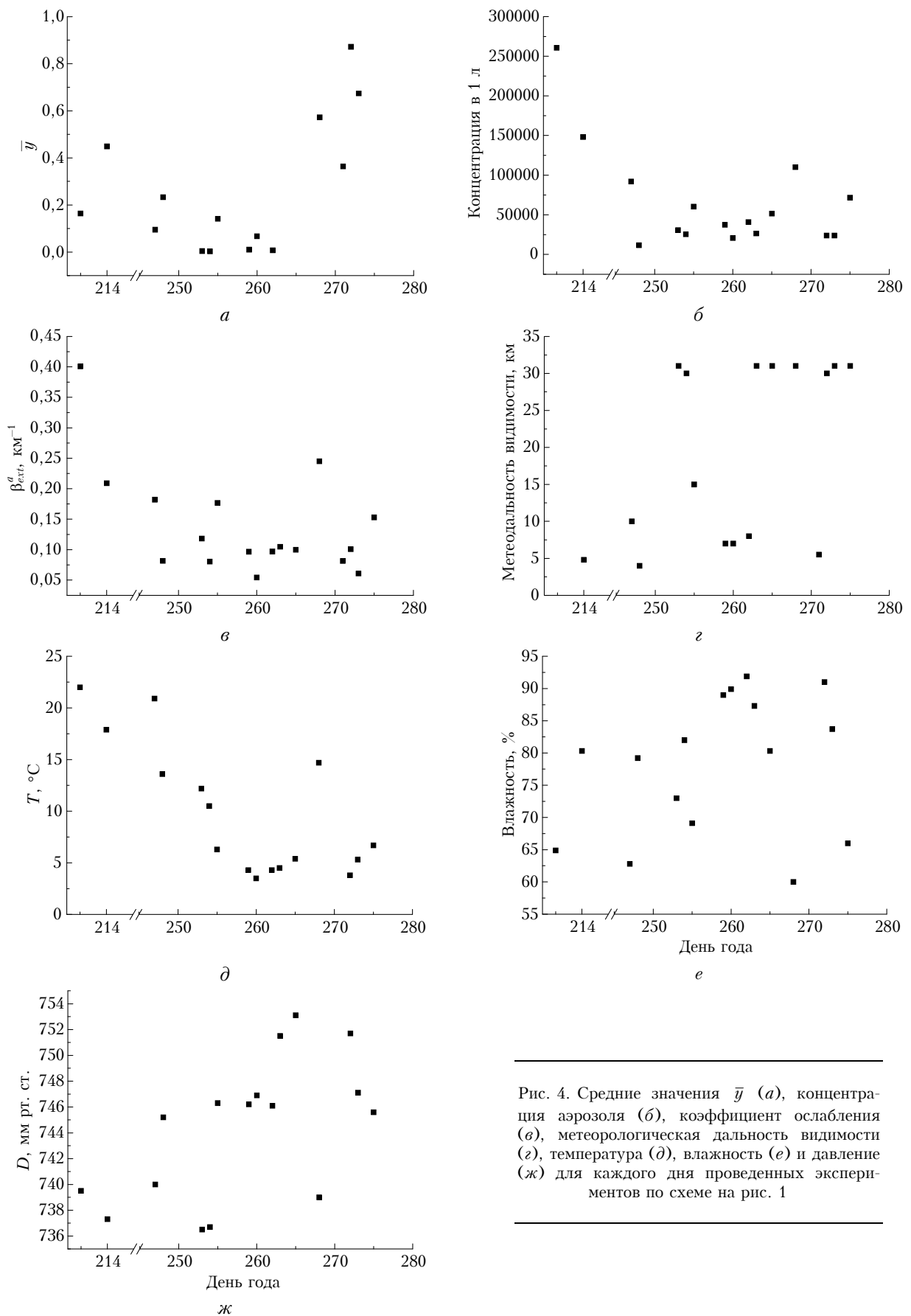


Рис. 4. Средние значения \bar{y} (а), концентрация аэрозоля (б), коэффициент ослабления (в), метеорологическая дальность видимости (г), температура (д), влажность (е) и давление (ж) для каждого дня проведенных экспериментов по схеме на рис. 1

существенно влияет на качество связи и при изменении ее от +6,7 °С до –17 °С приводит к уменьшению ошибок связи почти на порядок. Этот результат не совсем просто интерпретируется и требует уточнения, хотя о связи температуры с характеристиками (в частности, с отношением сигнал-шум) известно достаточно давно [11].

Заключение

Полевые эксперименты 2013 г., выполненные в ИОА СО РАН с целью оценки возможности и качества передачи информации по бистатическим ОЭСС, позволяют сформулировать следующие общие и частные выводы.

1. Качественная бистатическая оптико-электронная связь в видимом диапазоне длин волн может осуществляться в условиях как облачной (см. рис. 3, б), так и безоблачной атмосферы (см. рис. 2, а, в).

2. 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, или в области выхода излучения из облака (полупрозрачная облачность, см. рис. 2, б).

3. Статистические характеристики качества передачи информации по бистатическим атмосферным каналам (средние значения ошибок и их среднеквадратическое отклонение) 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 °С привело к уменьшению вероятности ошибок почти на порядок.

4. Анализ влияния на статистические характеристики качества связи на длине волны 510,6 нм оптического и метеорологического состояния атмосферы показал, что в схемах бистатической связи, когда перехват лазерного луча приемной системой осуществляется в приземном слое атмосферы, определяется рассеянием излучения, которое зависит в основном от содержания в атмосфере аэрозоля (см. рис. 4).

5. 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.

Полученные нами результаты требуют дальнейшего уточнения в последующих экспериментальных и теоретических исследованиях с целью установления основных причин, влияющих на качество связи и области дальности действия бистатиче-

ских ОЭСС по оптико-геометрическим характеристикам и параметрам схем ее реализации.

Авторы благодарны Б.Д. Белану, М.В. Панченко, В.Н. Ужegovу, Т.К. Складневой за предоставленные данные об оптическом и метеорологическом состоянии атмосферы, Д.В. Белову за участие в экспериментах и решение проблемы охлаждения ФЭУ, А.Н. Кудрявцеву за видеосъемку вариантов схем регистрации информационных потоков (см. рис. 2) и В.П. Протасовой за техническое оформление работы.

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.

1. Белов В.В., Тарасенков М.В., Абрамочкин В.Н., Иванов В.В., Федосов А.В., Троицкий В.О., Шиянов Д.В. Атмосферные бистатические каналы связи с рассеянием. Часть 1. Методы исследования // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 4. С. 261–267.
2. 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 техн. эксперим. 2008. № 6. С. 119–122.
3. Белов В.В., Матвиенко Г.Г., Пак Р.Ю., Шиянов Д.В., Курпиченко Р.Ю., Курячий М.И., Пустынский И.Н., Шурыгин Ю.А. Активные ТВ-системы видения с селекцией фонов рассеяния // Датчики и системы. 2012. № 3. С. 25–30.
4. Зуев В.Е., Белан Б.Д., Задде Г.О. Оптическая погода. Новосибирск: Наука, 1990. 192 с.
5. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ивлев 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.
6. Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н. Статистический метод разделения коэффициентов общего ослабления ИК-радиации на компоненты // Оптика атмосф. 1988. Т. 1, № 10. С. 3–11.
7. Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н., Щелканов Н.Н. Автоматизированный многоволновый измеритель спектральной прозрачности приземной атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 1992. Т. 5, № 6. С. 667–671.
8. Ужegov В.Н., Ростов А.П., Пхалагов Ю.А. Автоматизированный трассовый фотометр // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 7. С. 590–594.
9. Kneizys F.X., Shettle E.P., Anderson G.P., Abreu L.W., Chetwynd J.H., Selby J.E.A., Clough S.A., Gallery W.O. User Guide to LOWTRAN-7. ARGL-TR-86-0177. ERP 1010. Hansom AFB. MA 01731.
10. Bucholtz A. Rayleigh-scattering calculations for the terrestrial atmosphere // Appl. Opt. 1995. V. 34, iss. 15. P. 2765–2773.
11. Соболева Н.А., Меламид А.Е. Фотоэлектронные приборы // М.: Высш. школа, 1974. 376 с.

V.V. Belov, M.V. Tarasenkov, V.N. Abramochkin, V.V. Ivanov, A.V. Fedosov, Yu.V. Gridnev, V.O. Troitskii, V.A. Dimaki. Atmospheric bistatic communication channels with scattering. Part 2. Field experiments of 2013.

Results of field experiments on the influence of atmospheric conditions and some instrumental characteristics on the quality of information transfer in a bistatic opto-electronic communication system (OECS) operating in the visible range of wavelengths are considered. The length of the atmospheric channel reaches 17 km. Radiation of a copper bromide vapor laser with a wavelength of 510.6 nm is used as a signal source.

It is demonstrated that bistatic or over-the-horizon OECSs can operate under conditions of both cloudy and cloudless atmosphere. Average values and standard deviations of communication errors are estimated under various atmospheric-optical conditions considering variations of some characteristics of individual system units.