

# Оптико-электронная связь в атмосфере на рассеянном лазерном излучении. Полевые эксперименты

В.Н. АБРАМОЧКИН, В.В. БЕЛОВ, Ю.В. ГРИДНЕВ, А.Н. КУДРЯВЦЕВ, М.В. ТАРАСЕНКОВ, А.В. ФЕДОСОВ

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск  
E-mail: belov@iao.ru

## Аннотация

В работе обсуждаются результаты полевых экспериментов с бистатистическими оптико-электронными системами связи (ОЭСС) в атмосфере на рассеянном лазерном излучении, выполненных 2013–2016 гг. Эксперименты проведены с целью оценок качества связи (на основе контроля вероятностей и ошибок и их среднеквадратичных отклонений) и позволяет сделать следующее предположение: возможно создание бистатистических ОЭСС, эффективно функционирующих в атмосфере при базах до сотен метров в УФ и до сотен километров в видимом диапазоне длин волн при ориентациях оси приёмника как в полусфере, содержащей направление на источник, так и в полусфере, содержащей направление распространения нерассеянного лазерного излучения.

**Ключевые слова:** оптико-электронная связь, рассеянное в атмос-

фере лазерное излучение, время-импульсная модуляция, вероятности ошибок.

## 1. Введение

В [1] были рассмотрены общие вопросы организации бистатистических (загоризонтных) оптико-электронных систем связи (ОЭСС) на рассеянном лазерном излучении, обосновали выбор метода Монте-Карло для моделирования передаточных характеристик атмосферных бистатистических каналов. Там же привели описание лабораторной реализации экспериментальной установки и пример её испытания в 2012 г. в реальных атмосферных условиях.

В 2013–2016 гг. в летне-осенний период была проведена серия полевых экспериментов с целью оценки возможности и качества приёма информации по бистатистическим оптическим каналам связи при различных атмос-

ферных условиях и вариациях геометрических параметров приёма-передающей схемы ОЭСС.

В работе приводятся новые и обобщаются предыдущие результаты этих исследований, выполненных на атмосферных трассах в Томской области.

## 2. Аппаратура и оптико-геометрические условия экспериментов

Блок-схема лабораторного макета бистатистической ОЭСС, которая подробно описана в [1], приведена на рис. 1.

В качестве источника излучения использовались лазеры на парах бромида меди [2], созданные в ИОА СО РАН и имеющие следующие характеристики: длина волны излучения  $\lambda = 510,6$  нм, частота повторения импульсов 11–14 кГц, длительность импульса  $\Delta t = 30$  нс, средняя мощность  $P = 4$ –14 Вт, диаметр пучка на входе в атмосферу  $\varnothing = 15$  мм; расходимость излучения  $\Delta n = 0,06$  мрд.

Угол поля зрения приёмного телескопа составлял  $FOV = 2^\circ$ , в качестве фотоприёмника использовался ФЭУ-84. Оптическая ось приёмного телескопа пересекала оптическую ось лазерного пучка, и её наклон относительно горизонтальной плоскости задавался углом  $\alpha$ . Передающая ОЭСС располагалась в северной башне блока «А» ИОА СО РАН на высоте  $h_0 = 13$  м от поверхности земли или 173 м над уровнем моря. Направление оси лазерного пучка определялось углом места  $5^\circ < \theta < 15^\circ$  и азимутальным углом  $-10^\circ < \varphi < +10^\circ$  в горизонтальной плоскости от направления на приёмную ОЭСС. Во время проведения экспериментов в 2013 г. средняя мощность лазерного источника составляла 4 или 6 Вт, в 2016 г. – 8,5 или 14 Вт.

Лазерный пучок проходил (в зависимости от расположения приёмной оптической системы) над г. Томском и р. Томью (рис. 2, направление 1), над г. Томском, р. Томью и пригородной зоной (рис. 2, направление 2), над г. Томском, р. Томью и жилым посёлком Березкино (рис. 2, направление 3), и над г. Томском, р. Томью, лесными массивами, р. Обью и фрагментами Обского болота (рис. 2 направление 4).

В экспериментах измерялся интервал времени между излучаемым лазерным и синхроимпульсом. Именно этот вид модуляции излучения (время-импульсная) используется в лабора-

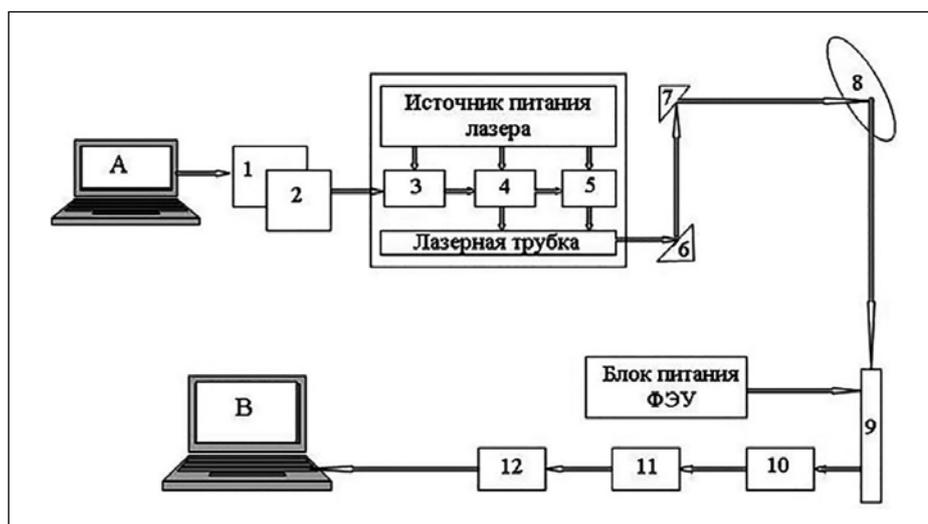


Рис. 1. Блок-схема лабораторного макета бистатистической лазерной системы связи. Обозначения: А – «передающий» компьютер, 1 – интерфейс, 2 – устройство кодирования данных, 3 – задающий генератор лазера, 4 – модулятор, 5 – тиратрон лазера, 6,7 – юстировочные узлы, 8 – рассеивающий объём, поверхность, 9 – телескоп + фотозлектронный умножитель (ФЭУ), 10 – усилитель сигнала, 11 – устройство декодирования, 12 – интерфейс, В – «принимающий» компьютер

торном макете бистатической ОЭСС. Во время экспериментов с помощью активно-импульсной высокочувствительной ОЭСС «ЗОНД М» [3], работавшей в пассивном режиме, выборочно осуществлялась видеозапись рассеянного следа луча в атмосфере. На рис. 3 приведены примеры этих изображений.

Мобильная приёмная ОЭСС могла размещаться в любой доступной для автотранспорта точке. Первые успешные полевые эксперименты были проведены в 2013 г. при размещении приёмной ОЭСС на расстоянии 9,9 км от источника лазерного излучения и высоте приёмника над уровнем моря 79 м. Основные эксперименты были проведены в 2013 г. при расположении приёмной системы в поле за р. Томью в направлении излучения, отмеченного на рис. 1 цифрой 2. База источник-приёмник составляла 8,77 км, высота приёмника над уровнем моря – 77 м. Максимальная протяжённость отрезков линий от источника до приёмника через точку пересечения оптических осей приёмника и лазерного пучка составляла 11 км (назовём это расстояние протяжённостью линии связи).

Эксперименты проводились с августа по октябрь 2013 г. в тёмное время суток в условиях облачной (отдельные облачные образования, сплошная облачность) и безоблачной атмосферы и при осадках (дождь). В качестве информации, передаваемой по атмосферному бистатическому каналу для оценки качества связи, использовалось изображение графического тестового сигнала в виде периодической треугольной (без горизонтального катета) структуры.

Каждый эксперимент осуществлялся по следующей схеме (рис. 4). Фиксировалась одна из двух ориентаций передающего лазерного пучка с углом места  $\alpha \approx 5$  и  $15^\circ$  при азимутальном угле  $\varphi \approx 0^\circ$ . Приёмный телескоп ориентировался в направлениях, соответствующих значениям угла  $\alpha$  от  $15$  до  $85^\circ$ . Для контроля функционирования связи дополнительно осуществлялась соответствующая  $\varphi \approx \pm 10^\circ$  ориентация передающего лазерного пучка. Длительность каждого сеанса связи при фиксированной геометрии эксперимента зависела от атмосферных условий и составляла от 7 до 30 мин. При этом передавалась и записывалась на компьютер информация (графический тестовый сигнал), содержа-

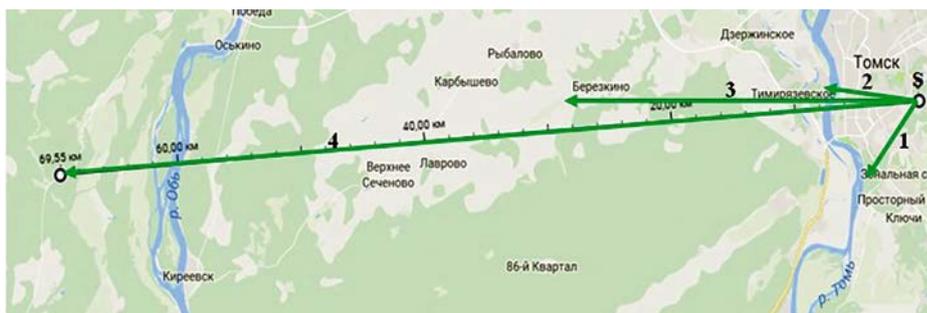


Рис. 2. Схема направлений лазерного луча на точки размещения приёмной ОЭСС (зелёные стрелки) в 2013–2016 гг.

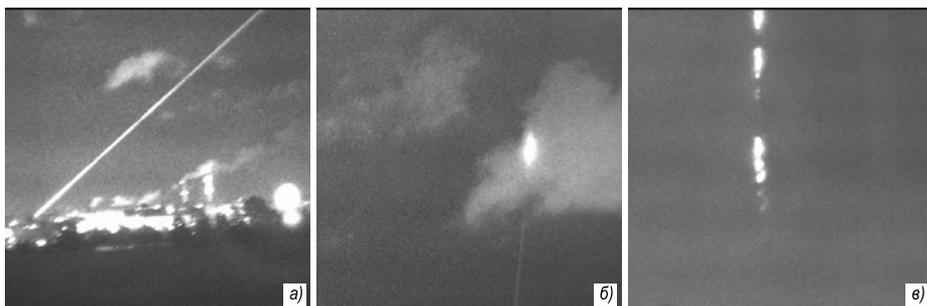
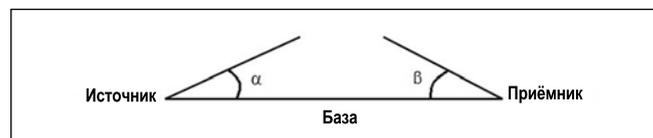


Рис. 3. Кадры из видеозаписей: (а) – информационного лазерного луча, рассеянного на безоблачной трассе в атмосфере, (б) – рассеянного излучения, прошедшего облачное образование, и (в) – излучения, рассеянного на аэрозольных неоднородностях

Рис. 4. Геометрическая схема экспериментов



щая от 7 000 до 40 000 символов. Каждый эксперимент длился от 1 до 3 ч.

Контроль состояния атмосферного канала бистатической связи осуществить в полевых условиях практически невозможно. Поэтому для анализа влияния оптических и метеорологических условий на качество работы ОЭСС использовались следующие параметры:

- Метеорологическая дальность видимости  $S_M$ , которая измерялась с интервалом в 1 ч на территории Базового экспериментального комплекса ИОА СО РАН [4], удалённого от точки  $S$  (рис. 2) на расстоянии 12 км. Диапазон измерений  $S_M$  ограничивался сверху значением  $S_M = 30$  км.

- Давление, влажность, концентрация аэрозоля (с размерами частиц более  $0,3$  мкм), которые измерялись на ТОР-станции [5], размещённой на Высотной станции ИОА СО РАН (находится на расстоянии 400 м от излучателя бистатической ОЭСС).

- Коэффициент аэрозольного ослабления  $\beta_{ext}^a$  атмосферы на длине волны  $\lambda = 0,5$  мкм, который определялся

на горизонтальной трассе (исходящей из здания, где был размещён передающий лазер ОЭСС) с помощью аппаратуры и по методике, описанными в [6–8].

### 3. Результаты экспериментов

Для оценки качества связи использовались вероятность  $p$  и её среднеквадратичное отклонение (СКО)  $\sigma$  ошибок за сеанс связи, при котором фиксировались все геометрические параметры схемы эксперимента. В [18] подробно описан алгоритм расчётов этих статистических характеристик в реальном масштабе времени (т.е. в момент проведения экспериментов).

Из статистических характеристик качества передачи информации следует, что причинами ошибок могут быть как атмосферные искажения, так и изменения характеристик приёмо-передающих оптико-электронных блоков (например, мощность лазерного излучения, шумы фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) и т.п.).

Анализ вероятностей ошибок и их СКО показал, что некоторые сеансы связи характеризовались идеальным качеством связи, т.е.  $p = 0$  и  $\sigma = 0$  (например, 4 сентября) или близким к нему (например, 11 сентября), в других ситуациях значения  $p$  и  $\sigma$  достигали, соответственно, значений 0,8 и 0,9 (например, 29 сентября).

Для выяснения причин вариаций вероятностей ошибок  $p$  контролировались концентрация аэрозоля, коэффициенты пропускания, метеорологическая дальность видимости, температура, влажность и давление в приземном слое атмосферы.

Поскольку физическая основа бистатической связи – это эффект рассеяния, а в нём участвуют как аэрозольная, так и молекулярная составляющая атмосферы, то, прежде всего, нужно определить, какой из этих процессов определяет качество связи, или в проведённой серии экспериментов они в одинаковой мере влияли на качество связи. С этой целью сравнивались значения коэффициентов молекулярного рассеяния  $\beta_{sc}^m$  и коэффициентов аэрозольного рассеяния  $\beta_{sc}^a$ . Коэффициенты аэрозольного рассеяния определялись с помощью пакета *LOWTRAN-7* [9], коэффициенты молекулярного рассеяния рассчиты-

вались по формулам, приведённым в [10] с использованием данных о температуре и давлении, измеренных на ТОР-станции [5].

Из сравнения этих данных следует, что коэффициенты аэрозольного 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. Анализ показал, что устойчивой корреляционной связи между значениями вероятностей ошибок и оптическими и метеорологическими характеристиками атмосферы вблизи передающей ОЭСС не установлено.

Другими источниками ошибок при передаче информации по атмосферным каналам связи, как уже отмечалось, может быть, изменение характеристик отдельных блоков аппаратуры. При выбранном способе информационной модуляции (время-импульсном) на качество приёма информации, прежде всего, влияет мощность лазерного излучения  $P$ , которая в эксперименте изменялась в диапазоне 4–6 Вт. При уменьшении  $P$  можно

ожидать ухудшения качества связи, т.е. увеличения вероятности ошибок  $p$ . Это подтверждается, например, сравнением значений  $p$ , полученных для экспериментов, выполненных 16 ( $P = 6$  Вт) и 25 ( $P = 2$  Вт) сентября 2013 г. В этих экспериментах  $p = 0,01$  и  $0,572$ , соответственно, температура воздуха 25 сентября была равна  $+14,7$  °С, а 16 сентября она была равна  $-4,3$  °С, метеорологическая дальность видимости  $S_M$  16 и 25 сентября превышала, соответственно, 30 и 7 км, а восстановленный из измерений коэффициент аэрозольного ослабления  $\beta_{ext}^a$  в 21:00 был равен  $0,102$  км<sup>-1</sup> 16 сентября и  $0,260$  км<sup>-1</sup> 25 сентября.

Поэтому, прежде чем назвать основную причину резкого изменения ошибок  $p$  (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. 1, где приведены значения  $p$  и  $\sigma$  в зависимости от времени осуществления сеансов связи в 2013 г. Первый сеанс был проведён без принудительного охлаждения ФЭУ (начало сеанса – в 20:35), и его температура  $T$  соответствовала температуре окружающей

Таблица 1

Выборочные значения вероятностей ошибок связи и их СКО в экспериментах 01.10.2013 г.

| Время | $p$   | $\sigma$ | Время | $p$   | $\sigma$ | Время | $p$   | $\sigma$ |
|-------|-------|----------|-------|-------|----------|-------|-------|----------|
| 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    |

среды, т.е.  $T = +6.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Второй и следующие сеансы были проведены при включённой холодильной установке, которая постепенно охлаждала ФЭУ до температуры  $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 30 минут. Как видим, температура ФЭУ существенно влияет на качество связи, и изменение её от  $+6,7$  до  $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$  приводит к уменьшению ошибок связи почти на порядок. Этот результат подтверждает известный результат влияния температурного режима на качество работы ФЭУ[11].

Первая серия экспериментов в 2016 г. была проведена при средней мощности лазерного источника 8,5 Вт и при установке приёмного телескопа в районе п. Березкино в 26 км от источника лазерного излучения (рис. 2, направление 3, протяжённость линии связи – 26,12 км). Эксперименты проводились при безоблачном небе (вдоль линии распространения лазерного пучка). Угол места оптической оси телескопа и угол места оси лазерного излучения составляли, соответственно,  $\alpha \approx 5^{\circ}$  и  $\beta \approx 10^{\circ}$ . На рис. 5 приведён пример результатов оценок в реальном масштабе времени вероятностей ошибок  $p$  и  $s$  в этой серии экспериментов.

29 сентября 2016 г. была осуществлена загоризонтная оптико-электронная связь на рассеянном лазерном излучении при базе 69,5 км и протяжённости линии связи в 69,83 км. Средняя мощность источника лазерного излучения составляла 14 Вт, приёмник располагался в непосредственной близости от автомобильной трассы Томск-Новосибирск между посёлками Нашеково и Десятово (рис. 2, направление 4). Приёмником перехватывалось излучение, которое распространялось над г. Томском, р. Томью, р. Обью, Обским болотом и лесным массивом между ним и автомобильной трассой. Углы места оптической оси приёмника и оси излучения составляли, соответственно,  $\alpha \approx 10^{\circ}$  и  $\beta \approx 7^{\circ}$ .

На рис. 6 приведены результаты оценок вероятностей ошибок и их СКО в этом эксперименте. Отсутствие на рис. 6 результатов во временном интервале 5–7 обусловлено тем, что в этот отрезок времени по трассе проходила колонна автотранспортных средств с включёнными яркими фарами дальнего света, рассеянное излучение которых (отсекающие фильтры отсутствовали) регистрировалось ФЭУ.

Рис. 5. Вероятности ошибок и их среднеквадратичные отклонения (СКО) в экспериментах 13 сентября 2016 г.

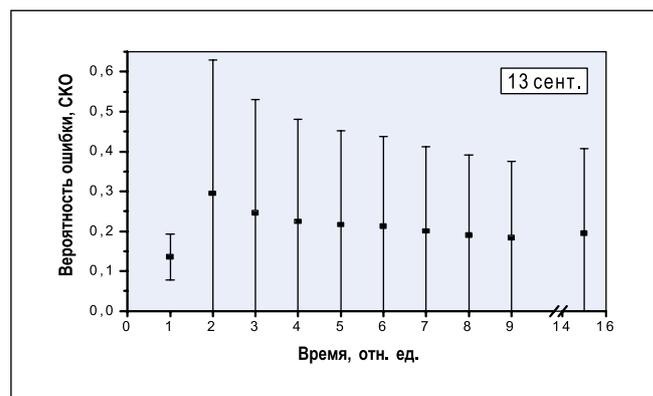


Рис. 6. Вероятности ошибок и их СКО в экспериментах 29 сентября 2016 г.

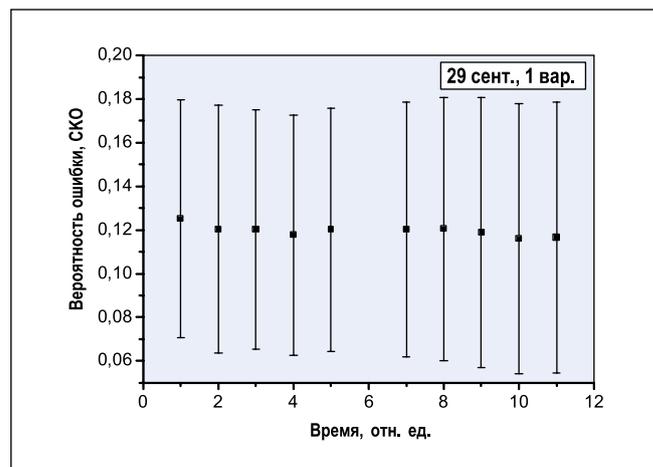
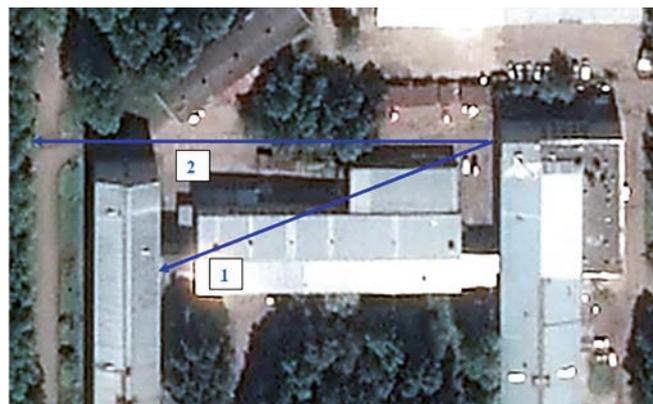


Рис. 7. Спутниковый снимок корпусов ИОА СО РАН и направления излучения стационарного лазерного УФ источника (стрелки 1, 2)



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 или в ночное время при интенсивных искусственных источниках (см. рис. 6, временной интервал 5–7).

Эта проблема исчезает или становится менее значимой, если в качестве источников излучения в ОЭСС использовать лазеры в УФ диапазоне длин волн и, прежде всего, в солнеч-

но-слепом диапазоне длин волн. Этим можно объяснить активность теоретических исследований в этом направлении [12–15], заметно усилившуюся в последнее десятилетие.

В экспериментах 2016 г. в качестве базовой была использована аппаратная реализация бистатической ОЭСС, которая испытывалась в видимом диапазоне длин волн и подробно описана в [16–18]. В ней в качестве первичного источника использовался стационарный лазер на бромиде меди (длина волны  $\lambda = 510,6\text{ нм}$  при средней мощности 10 Вт), излучение которого через нелинейное преобразование на основе оптического кристал-

Рис. 8. Геометрические схемы первых экспериментов

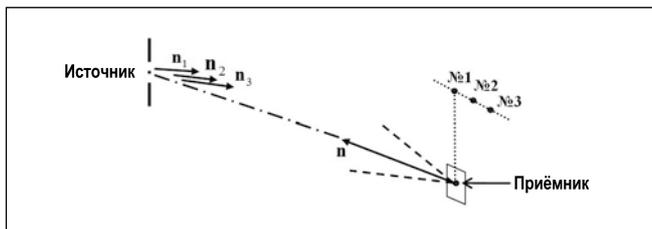


Рис. 9. Пример результатов оценивания качества связи в экспериментах по схеме на рис. 8 для точек 1 и 3

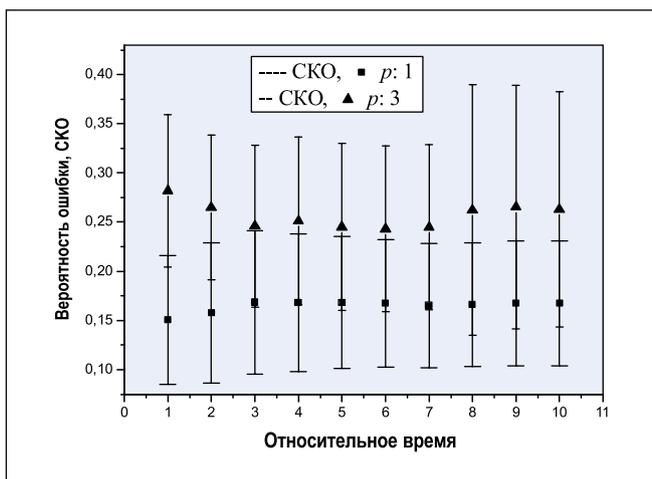
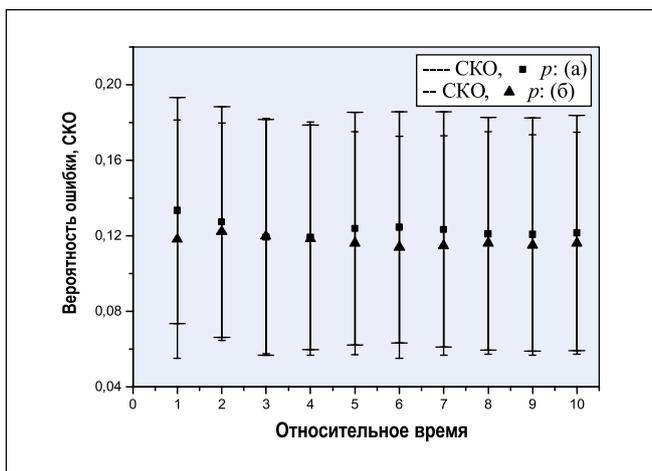


Рис. 10. Пример результатов оценки качества связи в экспериментах для направления излучения лазера, обозначенного на рис. 7 цифрой 2



ла ВВО ( $BaB_2O_4$ ) преобразовывалось в излучение с длинами волн  $\lambda = 255,3; 272,1$  и  $289,1$  нм. В обсуждаемых ниже экспериментах использовались излучение на длине волны  $289,1$  нм (средняя мощность  $0,3$  Вт), частота повторения импульсов  $14$  кГц, длительность импульсов  $30$  нс, а сечение пучка на входе в атмосферу представляло собой квадрат со стороной  $2$  мм с равной  $2,5^\circ$  полной угловой расходимостью по сторонам. Выбор этой длины волны был сделан на основе анализа рассеивающих и поглощающих свойств атмосферы в приземном слое. Приёмная оптическая система была собрана по схеме телескопа-рефрактора. Некоторые его характеристики: световой диаметр объектива  $94$  мм, материал – кварцевое стекло КУ-1, класс

однородности – 1, фокусное расстояние –  $300$  мм. Поле зрения приёмной системы –  $2^\circ$ . В качестве преобразователя оптического излучения в электрический сигнал использован ФЭУ 142. Эксперименты были проведены вдоль трасс 1 и 2, изображённых на спутниковом снимке корпусов ИОА СО РАН, приведённом на рис. 7. Стационарный лазерный источник располагался на 4 этаже северной башни корпуса А института (справа на рис. 7). В первой серии экспериментов излучение направлялось в сторону приёмника, размещённого в главном корпусе института (направление 1 на рис. 8). Стрелки 1 и 2 на рис. 7 – проекции на горизонтальную плоскость оптических осей лазерных пучков, использовавшихся в экспериментах.

На рис. 8 приведены геометрические схемы трёх серий этих экспериментов (вид сбоку). Приёмный телескоп размещался в помещении на третьем этаже корпуса ИОА и ориентировался на источник излучения. Излучение направлялось последовательно в точки 1, 2 и 3. Точка 1 соответствовала вектору направления  $n_1$  и находилась на расстоянии  $3$  м над приёмником. Точкам 2 и 3 соответствовали вектора направлений  $n_2$  и  $n_3$ , и они отстояли от точки 1 на расстоянии, соответственно,  $4$  и  $8$  м. Эта геометрия исключала попадание нерассеянного излучения в объектив приёмного 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  $2^\circ$  к горизонту. Приёмный телескоп размещался на площадке за главным корпусом института под лучом 2 на рис. 7. Оптическая ось приёмника направлялась под углами от  $15$  до  $110^\circ$  к горизонту относительно направления на источник. Длина линий связи в этих экспериментах варьировалась от  $100$  до  $108$  м.

На рис. 9 приведены в качестве примера зависимости вероятностей ошибок и их СКО от номера серии экспериментов, выполненных 20 мая 2016 г. по схеме на рис. 8 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 2 соответственно.

Вероятности и их СКО, соответствующие точке 2 на рис. 8, у всех серий экспериментов лежат между значениями для точек 1 и 3. Из сравнения этих результатов следует, что качество связи ухудшается при увеличении протяжённости 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 TOP [5] существенно не изменились.

Уровни полученных в экспериментах вероятностей ошибок связи и их СКО для направления распространения лазерного излучения, соответствующего цифре 2 на рис. 7, представлены на рис. 10. Для иллюстра-

ции полученных результатов в этих экспериментах выбраны две ситуации: (а) – оптическая ось приёмной системы ориентирована в полусферу направлений на источник под углом в  $45^\circ$  к горизонту, и (б) – эта ось ориентирована в полусферу направлений от источника под углом в  $135^\circ$  к горизонту. На рис. 10 по оси абсцисс приведено относительное время, соответствующее номеру серии экспериментов для ситуаций (а) и (б).

Из сравнения вероятностей ошибок и их СКО на рис. 9 и 10 можно сделать следующие выводы. Ситуации (а) и (б) характеризуются достаточно близкими значениями этих параметров. Это можно объяснить тем, что преобладающим источником рассеяния излучения на длине волны  $\lambda = 289,1$  нм является молекулярная, а не аэрозольная составляющая атмосферы, для которой индикатриса рассеяния симметрична относительно направлений в переднюю и заднюю полусферу. Это приводит к тому, что при соответствующих ситуациях (а) и (б) геометрических параметрах линий связи рассеянные молекулами воздуха потоки становятся сравнимыми.

Возможной причиной этого может быть то, что эксперименты, проведённые для серии (б), выполнялись на 1,5 часа позже. Все эксперименты были проведены с 21 до 23 ч местного времени. Можно предположить, и это подтверждают данные станции ТОР [5], что за это время концентрация аэрозоля уменьшилась и, начиная со времени проведения серии экспериментов для ситуации (а), оставалась почти постоянной. Поэтому и вариации значений вероятностей ошибок и их СКО на рис. 10 (кривая б) несколько меньше. В частности, изменения вероятности  $p$  в ситуации (а) не превышали 0,014141, модуля СКО – 0,01829, а в ситуации (б) – изменения  $p$  не превышали 0,008889, модуля СКО – 0,005541.

Представляет интерес сравнить качество связи в видимом и УФ диапазонах длин волн. Для этого обратимся к [16], где приведены примеры оценок вероятностей ошибок и их СКО, полученных в полевых экспериментах с лабораторным макетом бистатической ОЭСС на рассеянном лазерном излучении в видимом диапазоне длин волн ( $\lambda = 510,6$  нм) при протяжённости линий связи более 10 км. Из этого сравнения следует, что качество свя-

зи в видимом диапазоне существенно выше, чем в УФ. Казалось бы УФ диапазон предпочтительнее для качественной связи, т.к. помехи от солнечного излучения в этом случае существенно ниже. Однако, если учесть, что эксперименты проводились в сумеречное время суток, что мощность лазерного излучения в видимом диапазоне превосходила мощность в УФ диапазоне более чем в 15 раз и что применялись различные ФЭУ, то результат сравнения не может вызывать особых сомнений.

#### 4. Выводы

Полевые эксперименты, выполненные в 2013–2016 гг. с целью оценки возможности и качества передачи информации по бистатическим ОЭСС на рассеянном лазерном излучении, позволяют сформулировать следующие общие и частные выводы.

1. Качественная бистатическая оптико-электронная связь в видимом диапазоне длин волн может осуществляться в условиях как облачной, так и безоблачной атмосферы.

2. При наличии облачности связь осуществима через области вхождения и рассеяния лазерного излучения на нижней границе сплошной облачности или на нижней и боковой границе одиночных облаков.

3. Статистические характеристики качества передачи информации по бистатическим атмосферным каналам (вероятности ошибок и их среднеквадратичные отклонения) зависят от мощности лазерного излучения (уменьшаясь пропорционально при её росте) и от чувствительности ФЭУ. Охлаждение использованного в экспериментах ФЭУ 84 с  $+6,7$  до  $-17^\circ\text{C}$  привело к уменьшению вероятности ошибок почти на порядок.

4. Анализ влияния оптического и метеорологического состояния атмосферы на статистические характеристики качества связи на длине волны 510,6 нм показал, что в схемах бистатической связи, когда перехват лазерного луча приёмной системой осуществляется в приземном слое атмосферы, оно определяется рассеянием излучения, которое зависит, в основном, от содержания в атмосфере аэрозоля и что максимальная база, при которой возможна устойчивая связь с вероятностями ошибок на уровне 0,1, может превышать 70 км.

5. Для исключения или уменьшения влияния аппаратных причин возникновения сбоев в работе загоризонтных ОЭСС условия проведения полевых экспериментов должны предусматривать гарантированную стабильность мощности передатчика излучения и постоянную температуру ФЭУ.

6. Полевыми экспериментами подтверждена возможность создания и качественного функционирования бистатических многоадресных ОЭСС в УФ диапазоне длин волн с дальностью действия, превышающей сотни метров.

7. При базовых расстояниях до сотен и более метров оптико-электронная связь в УФ диапазоне возможна как при ориентации оптической оси приёмной системы в направлении на источник с углами к горизонту более  $10^\circ$ , так и в направлении от источника до углов наклона оси оптической приёмной системы к горизонту до  $30-40^\circ$ .

8. Результаты, представленные в работе, требуют дальнейшего уточнения в рамках последующих экспериментальных и теоретических исследований с целью установления основных причин, влияющих на качество связи и области дальности действия бистатических ОЭСС по оптико-геометрическим характеристикам и параметрам схем их реализаций.

Авторы благодарны Белову Д.В. за участие в экспериментах и решение проблемы охлаждения ФЭУ и Протасовой В.П. за техническое оформление работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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 атмосферы 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 техника эксперимента. – 2008. – № 6. – С. 119–122.

3. Белов В.В., Матвиенко Г.Г., Пак Р.Ю., Шиянов Д.В., Кирпиченко 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: Издательство «Наука» СО РАН. 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., Толмачёв Г.Н., Фофанов А.В. Посты для мониторинга парниковых и окисляющих атмосферу газов // Оптика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 20, № 1. – С. 53–61.

6. Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н. Статистический метод разделения коэффициентов общего ослабления ИК радиации на компоненты // Оптика атмосферы и океана. – 1988. – Т. 1, № 10. – С. 3–11.

7. Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н., Щелканов Н.Н. Автоматизированный многоволновой измеритель спектральной прозрачности приземной атмосферы // Оптика атмосферы и океана. – 1992. – Т. 5, № 6. – С. 667–671.

8. Ужегов В.Н., Ростов А.П., Пхалагов Ю.А. Автоматизированный трассовый фотометр // Оптика атмосферы 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 // Applied Optics. – 1995. – Vol. 34, No. 15. – P. 2765–2773.

11. Соболева Н.А., Меламид А.Е. Фотозлектронные приборы. – М.: Высшая школа, 1974. 376 с.

12. 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.

13. Ding, H., Chen, G., Majumdar, A.K., Sadler, B.M., Xu, Z. Modeling of non-line-of-sight ultraviolet scattering channels for communication // IEEE journal on selected areas in communications. – 2009. – Vol. 27, No. 9. – P. 1535–1544.

14. Han, D., Fan, X., Zhang, K., Zhu, R. Research on multiple-scattering channel with Monte Carlo model in UV atmosphere

communication // Applied optics. – 2013. – Vol. 52, No. 22. – P. 5516–5522.

15. Xiao, H., Zuo, Y., Wu, J., Li, Y., Lin, J. Non-line-of-sight ultraviolet single-scatter propagation model in random turbulent medium // Optics letters. – 2013. – Vol. 38, No. 17. – P. 3366–3369.

16. Белов В.В., Тарасенков М.В., Абрамочкин В.Н., Иванов В.В., Федосов А.В., Гриднев Ю.В., Троицкий В.О., Димакки В.А. Атмосферные бистатические каналы связи с рассеянием. Часть 2. Полевые эксперименты 2013 г. // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 27, № 8. – С. 659–664

17. Belov, V.V., Tarasenkov, M.V., Abramochkin, V.N. Bistatic Atmospheric Optoelectronic Communication Systems (Field Experiments) // Technical Physics Letters. – 2014. – Vol. 40, No. 10. – P. 871–874.

18. Belov, V.V., Tarasenkov, M.V., Abramochkin, V.N., Troitskii, V.O. Over-the-horizon Optoelectronic Communication Systems // Russian Physics Journal. – 2014. – Vol. 57, No. 7. – P. 202–208.



**Абрамочкин Владимир Николаевич**, к.ф.-м.н. Закончил Военно-воздушную инженерную академию им. Н.Е. Жуковского (1992 г.). Старший научный сотрудник Института оптики ат-

мосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск. Область научных интересов: оптико-электронная связь



**Гриднев Юрий Владимирович**. Закончил Томский политехнический университет (1981 г.). Научный сотрудник Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск.

Область научных интересов: системное программирование



**Тарасенков Михаил Викторович**, к.ф.-м.н. Закончил Томский государственный университет (2007 г.). Старший научный сотрудник Института оптики атмосферы им.

В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск. Область научных интересов: анализ закономерностей формирования изображений через атмосферу, атмосферная коррекция изображений в видимом и УФ-диапазонах, теоретическое исследование каналов связи вне прямой видимости



**Белов Владимир Васильевич**, д.ф.-м.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ. Закончил Томский государственный университет (1971 г.). Заведующий лабораторией РОС Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО

РАН, г. Томск. Область научных интересов: теория переноса оптического излучения в рассеивающих и поглощающих средах, теория лазерного зондирования, теория видения, атмосферная коррекция аэрокосмических изображений земной поверхности, метод Монте-Карло, многократное рассеяние



**Кудрявцев Андрей Николаевич**. Закончил Томский университет радиоэлектроники и управления (2003 г.). Ведущий электроник Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева

СО РАН, г. Томск. Область научных интересов: измерители мощности лазеров, устройства стробирования лазера, электронные схемы, пилс, микроконтроллеры, содапы



**Федосов Андрей Васильевич**. Закончил Радиомонтажное училище. Техник Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск. Область научных интересов: электроника