

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛН

УДК 621.391.63; 535.364; 621.373.826

## Атмосферные бистатические каналы связи с рассеянием. Часть 1. Методы исследования

**В.В. Белов<sup>1,2</sup>, М.В. Тарасенков<sup>1,2</sup>, В.Н. Абрамочкин<sup>1</sup>, В.В. Иванов<sup>1</sup>,  
А.В. Федосов<sup>1</sup>, В.О. Троицкий<sup>1</sup>, Д.В. Шиянов<sup>1\*</sup>**

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

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский Томский государственный университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

Поступила в редакцию 4.12.2012 г.

Рассматриваются методы теоретического и экспериментального исследования бистатических схем оптической связи. Для проведения экспериментальных исследований разработан лабораторный макет оптико-электронной системы связи. В качестве источника сигналов использовалось излучение лазера на парах меди на длине волны 510 нм. Проведены тестовые демонстрационные эксперименты в реальной атмосфере по атмосферным каналам с отражающей поверхностью и с плотным нестационарным аэрозольно-молекулярным образованием. Для проведения теоретических исследований созданы программные средства для статистических численных оценок методом Монте-Карло энергетических и передаточных характеристик атмосферных бистатических каналов связи.

*Ключевые слова:* оптическая связь, метод Монте-Карло, импульсная переходная характеристика, бистатические схемы; optical communication, Monte Carlo method, impulse transfer characteristic, bistatic schemes.

### Введение

Оптическая связь — один из способов дистанционной передачи информации. Принцип ее функционирования через атмосферный канал состоит в следующем. На первом этапе информация определенным образом вводится в излучение оптического источника (непрерывного или импульсного), т.е. осуществляется модуляция оптического излучения, которая может быть частотной, частотно-импульсной, импульсно-временной и т.д. Этот сигнал, который назовем входным, поступает в атмосферный канал связи и после его прохождения, трансформированной средой, регистрируется приемной системой. Принятый сигнал поступает на устройство демодуляции, где из него извлекается информация, которая может быть адекватно переданной или содержать ошибки, или совсем отсутствовать. Оптико-электронные системы связи (ОЭСС), содержащие атмосферный канал от источника до приемника, можно разделить условно [1] на системы связи, работающие а) в пределах прямой видимости (line-of-sight) и б) на рассеянном и отраженном излучении, т.е.

бистатические или, как частный случай, загоризонтные (over-the-horizon). Говоря о бистатической связи, мы подчеркиваем, что она осуществляется вне прямой видимости источника излучения и при этом не обязательно приемник размещается за горизонтом.

Современные оптические системы связи (иногда их называют «открытыми», так как в них не используется в качестве канала распространения оптическое волокно), построенные на лазерах, применяются для передачи информации именно в пределах прямой видимости передатчика приемником. В замутненном приземном слое атмосферы оптический сигнал может сильно затухать. К причинам этого можно отнести, например, дым, пыль, туман, снегопад и другие атмосферные явления, которые поглощают и рассеивают оптическое излучение. В слабозамутненной атмосфере передача информации с помощью узкого лазерного пучка может быть затруднена при определенных погодных условиях значительным влиянием турбулентности. При прочих искажениях пучка даже на небольших трассах турбулентность приводит к «беганию» его по апертуре приемника или даже к выходу его за ее пределы. Эти вопросы достаточно подробно рассмотрены в ряде работ и обобщены в монографии [2], там же можно найти обширную библиографию, имеющую отношение к этим и смежным вопросам.

Теоретические и экспериментальные исследования ведутся с целью развития двух типов ОЭСС (line-of-sight и over-the-horizon) [4–14]. Так, в [4]

\* Владимир Васильевич Белов (belov@iao.ru); Михаил Викторович Тарасенков (tmv@iao.ru); Владимир Николаевич Абрамочкин (ya.wna@yandex.ru); Владимир Васильевич Иванов (ilvlvtomsk@mail.ru); Андрей Васильевич Федосов; Владимир Олегович Троицкий (qel@asd.iao.ru); Дмитрий Валерьевич Шиянов (qel@asd.iao.ru).

методом статистического моделирования исследовано влияние отражающих свойств поверхности, над которой осуществляется связь, на импульсную переходную характеристику канала связи при условии существенной загруженности атмосферного канала аэрозолем. Для надежного приема сигнала в различных погодных условиях предложены, рассмотрены и применяются ряд перспективных предложений для систем связи, работающих по схеме line-of-sight (например, [14]).

Исследования в области загоризонтной связи выполнены в существенно меньшем объеме. В частности, в работе [3] рассмотрено влияние метеорологической дальности видимости  $S_M$  и параметров приемной системы на полосу пропускания внешнего канала связи, в [6] приведены результаты оценок дальности действия загоризонтных систем связи для набора длин волн излучения лазера и условий их функционирования (ночное и дневное время), в [7] 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 290 нм может достигать нескольких километров и т.д.

Есть ли необходимость в продолжении исследований и в создании бистатистических ОЭСС, учитывая, что существуют и хорошо развиты системы связи в радиодиапазоне (в том числе спутниковые), которые в отличие от оптических обладают явным преимуществом — они всепогодны? 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, например, в [3, 6, 7, 9]. 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 бистатистических ОЭСС.

Нами предпринимается попытка ответить на эти вопросы на основе теоретических и экспериментальных исследований, выполняемых в ИОА СО РАН. В настоящей статье обсуждается общий подход к их осуществлению, обосновывается выбор метода теоретических исследований, описана схема созданной экспериментальной бистатистической ОЭСС.

## Статистическое моделирование системных характеристик и энергетических потерь в бистатистических линиях оптической связи

Основа оптических бистатистических систем связи — это процесс взаимодействия (лазерного, как правило) излучения с атмосферной средой, которое сопровождается его рассеянием (первичным или вторичным) в направлении на оптический приемник. Под первичным понимаем однократное, под

вторичным — многократное рассеяние. Связь между интенсивностью (или мощностью) оптического излучения и оптическими характеристиками среды, как известно, устанавливается интегродифференциальным уравнением переноса излучения [15]. Данное уравнение линейно относительно интенсивности излучения (при условии, что на входе в атмосферу она не превышает критического уровня, приводящего к нелинейным эффектам). Это, как известно, позволяет рассматривать атмосферный канал как некоторую линейную систему без обратной связи, описать которую можно полностью, определив ее реакцию на один специальный сигнал, например на  $\delta(t)$ -импульс по времени [16]. Напомним, что отклик системы на входной  $\delta$ -импульс называется импульсной переходной характеристикой  $h(t)$ . Таким образом, с теоретической точки зрения влияние атмосферного канала на любые входные сигналы известно, если решено уравнение переноса излучения при начальных  $\delta(t)$  и граничных условиях, соответствующих конкретной схеме оптической связи для заданных оптических характеристиках рассеивающей и поглощающей среды.

Рассмотрим схему оптической связи, приведенную на рис. 1, при следующих условиях.

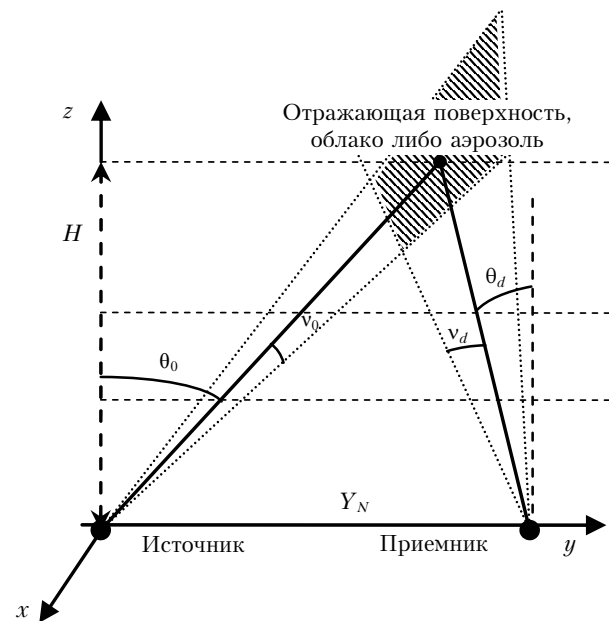


Рис. 1. Геометрическая схема бистатистической системы оптической связи (область пересечения конуса поля зрения приемника и нерассеянного лазерного пучка заштрихована)

Пусть определены оптические свойства модельной неоднородной плоскостратифицированной рассеивающей и поглощающей атмосферы, т.е. заданы индикатрисы аэрозольного и молекулярного рассеяния  $g_a, g_m$ , коэффициенты аэрозольного, молекулярного рассеяния и ослабления  $\sigma_{s,a}, \sigma_{s,m}, \sigma_{t,a}, \sigma_{t,m}$ .

Пусть из точки  $(0,0,0)$  в декартовой системе координат излучается лазерный  $\delta(t)$ -импульс с угловой расходимостью  $v_0$ . Оптическая ось источника лежит в плоскости  $YOZ$  и задается углом  $\theta_0$ . На некотором расстоянии  $Y_N$ , называемом базой, от

источника располагается приемная оптическая система, оптическая ось которой также находится в плоскости  $YOZ$ , ориентирована в направлении  $\theta_d$  и детектирует излучение в пределах угла  $\nu_d$ . Требуется определить  $h(t)$ , оценить факторы, влияющие на искажение исходного сигнала, и выяснить условия, при которых возможна оптическая связь.

Особенность бистатистических схем связи состоит в том, что, с одной стороны, геометрический объем пересечения расходящегося лазерного пучка с конусом поля зрения приемной системы (заштрихованная область на рис. 1) может быть достаточно мал и велика вероятность того, что рассеянное излучение, исходящее из него в направлении на приемник, будет однократно рассеянным (здесь мы не учитываем предысторию рассеянного излучения, вошедшего в этот объем). С другой стороны, можно предполагать, что передний и задний фронты функции  $h(t)$  формируются рассеянным излучением более высоких кратностей, чем первая. Это предопределяет, с нашей точки зрения, выбор метода решения УПИ в пользу метода Монте-Карло с учетом, что он свободен от ограничений на кратность рассеяния, на форму индикатрис рассеяния, на многокомпонентность состава атмосферы, на неоднородность ее оптических свойств. Заметим, что малоугловое приближение, часто используемое, например, в теории решения прямых и обратных задач оптического зондирования атмосферы (например, [17]), также не может быть использовано, принимая во внимание то, что база  $Y_N$  (см. рис. 1) достаточно велика в бистатистических системах связи (в отличие от бистатистических схем зондирования).

Алгоритмы локальных оценок для решения задач атмосферной оптики, предложенные в [15], могут быть применены и для решения рассмотренной выше задачи. Основные шаги алгоритма статистического моделирования импульсной переходной характеристики методом Монте-Карло сводятся к следующему.

Из точки расположения источника запускаются траектории движения фотонов в направлениях, определяемых значениями

$$\mu = 1 - \alpha_1(1 - \cos \nu_0), \quad (1)$$

$$\varphi = 2\pi\alpha_2, \quad (2)$$

где  $\mu$  — косинус угла отклонения начального направления траектории фотонов от направления оси ориентации источника;  $\varphi$  — азимутальный угол начального направления,  $\alpha_1, \alpha_2$  — равномерно распределенные в сегменте  $[0,1]$  случайные величины.

Свободный пробег фотонов в среде моделируется по стандартным алгоритмам, описанным в [15]. Из каждой точки взаимодействия фотонов с элементарным объемом среды, если эта точка лежит в телесном угле приемной системы, осуществляется локальная оценка принимаемой интенсивности излучения:

$$I_i = \omega_i \frac{g_a(z_i, \cos \gamma_i) \sigma_{s,a}(z_i) + g_m(z_i, \cos \gamma_i) \sigma_{s,m}(z_i)}{2\pi(\sigma_{t,a}(z_i) + \sigma_{t,m}(z_i)) R_i^2} \exp(-\tau_i), \quad (3)$$

где  $\omega_i$  — «вес» фотона в  $i$ -й точке столкновения;  $\gamma_i$  — угол между направлением фотона до  $i$ -го столкновения и направлением на приемную систему;  $R_i$  — расстояние от  $i$ -й точки столкновения до приемной системы;  $\tau_i$  — оптическая длина отрезка от  $i$ -й точки столкновения до приемной системы.

Если канал содержит отражающую поверхность, то при столкновении фотонов с ней, когда точка столкновения находится в пределах телесного угла приемной системы, вычисляется локальная оценка

$$I_i = \omega_i \frac{r_{surf} \mu_i}{\pi R_i^2} \exp(-\tau_i), \quad (4)$$

где  $r_{surf}$  — коэффициент отражения поверхности;  $\mu_i$  — косинус угла между направлением на приемную систему и нормалью к поверхности в точке на поверхности.

В зависимости от типа столкновения (со средой или поверхностью) моделируется либо рассеяние фотона [15] и уменьшение его «веса» на долю поглощенного излучения, либо отражение по закону Ламберта от поверхности. После этого следует моделирование свободного пробега фотона.

Несложно рассчитать время движения фотона от момента «рождения» траектории до момента «захвата» фотона приемником:  $t_\Phi = l/c$  ( $t_\Phi$  — время движения фотона;  $l$  — длина траектории;  $c$  — скорость света).

Импульсная переходная характеристика оценивается по формуле

$$h_k = \frac{1}{t_{\Phi k+1} - t_{\Phi k}} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i} I_{i,j,k}, \quad (5)$$

где  $h_k$  — значение импульсной переходной характеристики в промежутке времени от  $t_{\Phi k}$  до  $t_{\Phi k+1}$ ,  $k = 1 \dots N$ ,  $N$  — количество временных интервалов;  $M$  — количество траекторий;  $N_i$  — число столкновений  $i$ -й траектории.

Первые результаты тестовых расчетов опубликованы в [18]. На рис. 2 приведен один из примеров статистического моделирования импульсных переходных характеристик атмосферного канала ОЭСС, содержащего отражающую поверхность (рис. 2, а) и слой облачности (рис. 2, б). Результаты, приведенные на рис. 2, а, получены при следующих условиях: длина волны излучения  $\lambda = 510$  нм,  $\theta_0 = 45^\circ$ ,  $\theta_d = 45^\circ$ ,  $\nu_0 = 0,0034^\circ$ ,  $Y_N = 2$  км,  $H = 1$  км,  $r_{surf} = 1$ , метеорологическая дальность видимости  $S_M = 2$  км, континентальный аэрозоль, безоблачно, лето средних широт. Данные результаты показывают, что и при высокой мутности среды форма входящего сигнала сохраняется. Результаты, представленные на рис. 2, б, получены при следующих условиях:  $\lambda = 510$  нм,  $S_M = 50$  км, сплошная облачность  $CO1$  (расположение облака от 0,33 до 3,5 км), оптическая толщина облака  $\tau = 4$ ,  $\theta_0 = 56,78^\circ$ ,  $\theta_d = 56,78^\circ$ ,  $\nu_0 = 0,0034^\circ$ ,  $Y_N = 1$  км,  $H = 0,33$  км, континентальный аэрозоль, лето средних широт.

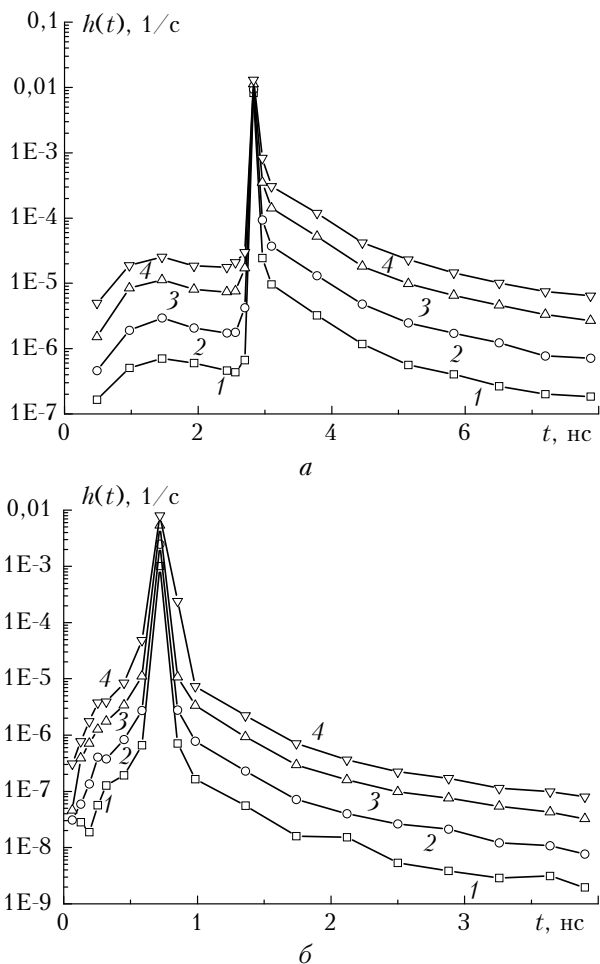


Рис. 2. Результаты расчетов характеристик  $h(t)$ : *a* – безоблачная атмосфера; *б* – облачная атмосфера. Кривая 1 – при  $\nu_d = 0,5^\circ$ ; 2 –  $1^\circ$ ; 3 –  $2^\circ$ ; 4 –  $3^\circ$

Оптические параметры задавались генератором оптических моделей LOWTRAN-7 [19]. По оси  $x$  отложено время, которое проходят фотоны за вычетом минимального времени, требуемого излучению для преодоления базового расстояния  $Y_N$ .

Как и следовало ожидать, характеристика  $h(t)$  начиная с момента времени, соответствующего расстоянию от источника до приемника через отражающую поверхность или облачный слой, является монотонно убывающей функцией. Один из неожиданных результатов моделирования состоит в том, что при малых углах поля зрения приемника и малых метеорологических дальностях видимости атмосферы наблюдается выраженный максимум рассеянного излучения на переднем фронте  $h(t)$  (первый максимум слева на кривых на рис. 2, *a*). При прозрачной атмосфере этот максимум не выражен (рис. 2, *б*).

Отметим, что вклад однократно рассеянного излучения при уменьшении  $S_M$  убывает и это приводит к тому, что изменение функции  $h(t)$  происходит медленнее, чем при более прозрачной атмосфере.

### Аппаратурная реализация бистатической линии связи

На рис. 3 приведена структурная блок-схема экспериментальной бистатической ОЭСС, созданной в ИОА СО РАН в 2011 г. Основные характеристики лазерного излучения следующие:  $\lambda = 510$  нм; частота следования импульсов  $f = 8 \div 16$  кГц (для тестовых экспериментов выбрана по критерию максимальной мощности  $f = 11$  кГц); длительность импульса  $\Delta t = 30$  нс; мощность в импульсе  $P = 1,5$  Вт; диаметр пучка на входе в атмосферу 15 мм; расходимость излучения  $\nu_0 = 0,06$  мрад; угол поля зрения  $\nu_d = 2^\circ$ .

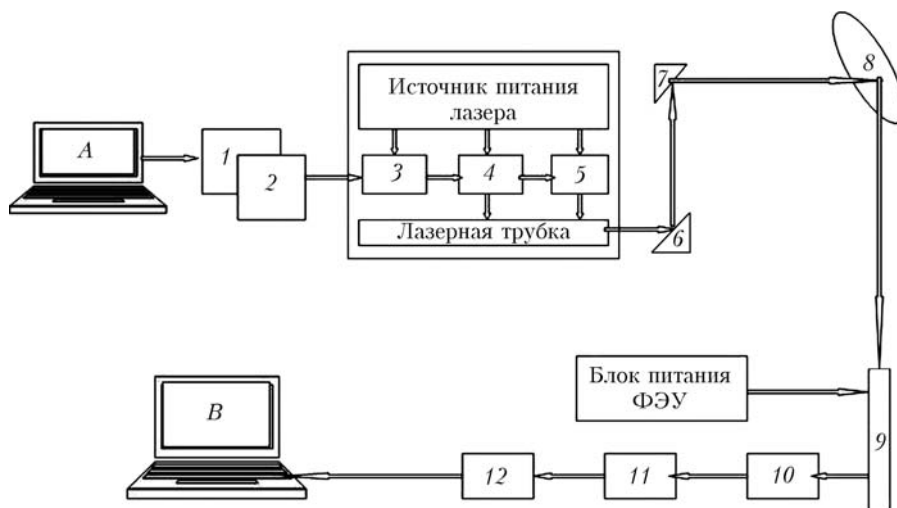


Рис. 3. Блок-схема лабораторного макета бистатической лазерной системы связи: *A* – «передающий» компьютер; 1 – интерфейс; 2 – устройство кодирования данных; 3 – задающий генератор лазера; 4 – модулятор; 5 – тиратрон лазера; 6, 7 – юстировочные узлы; 8 – рассеивающий объем, поверхность; 9 – телескоп + ФЭУ; 10 – усилитель сигнала; 11 – устройство декодирования; 12 – интерфейс; *B* – «принимающий» компьютер

Важнейшей характеристикой любой системы связи является ее помехозащищенность, поэтому при исследовании влияния атмосферного канала связи на характеристики ее качества необходимо минимизировать воздействие на них аппаратных помех. Решение этих проблем основано на выборе типа модуляции и программно-аппаратурных средств подавления помех.

В качестве способа кодирования сигналов нами выбрана время-импульсная модуляция (см., например, [20]). Этот выбор обусловлен тем, что данный тип кодирования обеспечивает защиту информации от флуктуаций амплитуды полезного сигнала, обусловленных изменениями оптического состояния атмосферных линий связи. Под полезным сигналом в данном типе модуляции принят интервал времени между импульсами генерации лазера. В нашем случае принято, что если этот интервал равен 65 мкс, то он соответствует коду «1», если 67 мкс, то коду «0». Длина символа, или его разрядность, которая определяется последовательностью 0 и 1, может быть произвольной. Нами выбрано 10-разрядное кодирование символов. Стоповый бит не применяется, так как система сразу определена на заданное разрешение (авторы работы [20], которые были информированы нами о характеристиках ОЭСС, оценили максимальную скорость передачи информации по такому каналу связи, равную 88,2 кбит/с).

Между импульсами генерации лазера, как правило, появляются импульсы аппаратных помех. Увеличение чувствительности приемника приводит к тому, что в пределах динамического диапазона информативные импульсы ограничиваются по амплитуде, а помехи могут быть усилены до такого уровня, что воспринимаются дешифратором как информативные сигналы. Чтобы отсеять шумы ФЭУ и усилительного тракта, была произведена привязка уровня генерируемого сигнала к «вершине» динамического диапазона, а усиление выбрано таким, чтобы амплитуда этих помех превысила пределы динамического диапазона, и на этом основании они удаляются из потока обрабатываемых импульсов. Импульсы помех короткой длительности, которые появляются между информативными, блокируются программно-аппаратными средствами отключением режима прерывания на время порядка

60 мкс. Достигается это тем, что импульс генерации лазера запускает одновибратор с генерацией длительностью 60 мкс, который блокирует вход прерывания, реагирующий только на информативный импульс. Второй барьер короткоимпульсным помехам, имеющим ту же амплитуду, что и информационные сигналы, реализован в виде интегрирующей цепи, после прохождения которой и этот вид аппаратных помех удаляется из потока сигналов, поступающих на вход демодулятора.

В 2011 г. состоялись первые тестовые испытания лабораторного макета в реальных атмосферных условиях с базовым расстоянием  $Y_N \approx 2$  м при отражении от тестового объекта (труба ГРЭС-2 на рис. 4), удаленного от приемопередающей аппаратуры на расстояние 3 км.

В этих тестовых экспериментах передавался текст с поздравлением сотрудников ИОА СО РАН с Новым годом. Эксперименты осуществлялись при различных погодных условиях, ошибок в принятом тексте обнаружено не было. Другим вариантом проверки качества линии связи была выбрана передача графического тест-объекта в виде периодической структуры, состоящей из последовательности прямоугольных треугольников. Тест также пройден успешно.

В 2012 г. были выполнены эксперименты по схеме (рис. 4) с базовым расстоянием  $Y_N \approx 8$  км и длине линии связи (вдоль оптических осей лазерного пучка и приемной системы через точку их пересечения) более 10 км. Приемник и источник ориентировались на шлейф смеси пара и аэрозоля, исходящего из трубы ГРЭС-2 (г. Томск).

Выбор этих двух объектов (отражающая поверхность и аэрозольно-газовое нестационарное образование) для тестирования лабораторной установки обусловлен тем, что они представляют две крайние ситуации, которые могут возникать в каналах связи. Первая соответствует стационарным оптическим характеристикам объекта, через который транслируется информационный поток, вторая характеризуется изменением их во времени, что связано с ветровым влиянием на шлейф, приводящим к неоднородности его оптических свойств и даже появлению разрывов в его пространственной структуре. Эксперименты 2012 г. подтвердили эти предположения.

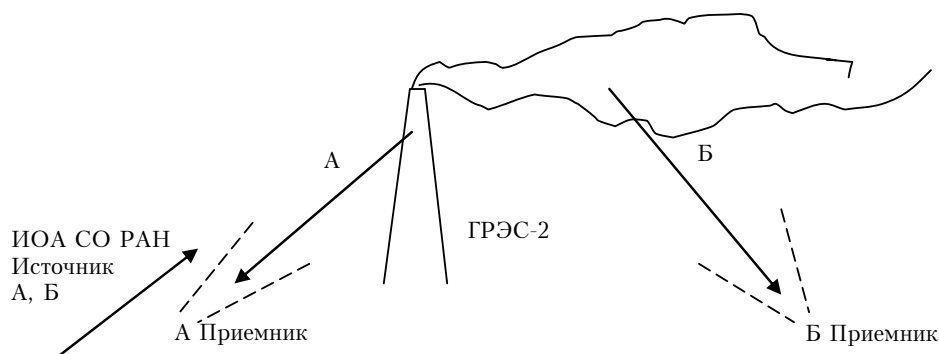


Рис. 4. Схема тестовых экспериментов в 2011 (А) и в 2012 гг. (Б)

На рис. 5 приведен в качестве примера фрагмент текста, принятого через дымовой шлейф, который содержит ошибки, возникшие, с нашей точки зрения, из-за изменения в некоторый момент времени оптической плотности дымового шлейфа в поле зрения приемника или из-за аппаратурных помех, прошедших через аппаратурно-программные средства их подавления.

Создание современной оптической системы  
связи, в которой в качестве ретранслято  
ра используется атмосферный аэрозоль,  
облачный или какие-либо другие рассеивающие образования. Это позволит о  
влять связь вне пределов прямой видимости

Рис. 5. Текст, принятый через аэрозольно-газовый шлейф с экрана монитора «принимающего» компьютера

На рис. 6 даны примеры тестирования состояния канала связи с помощью графического объекта.

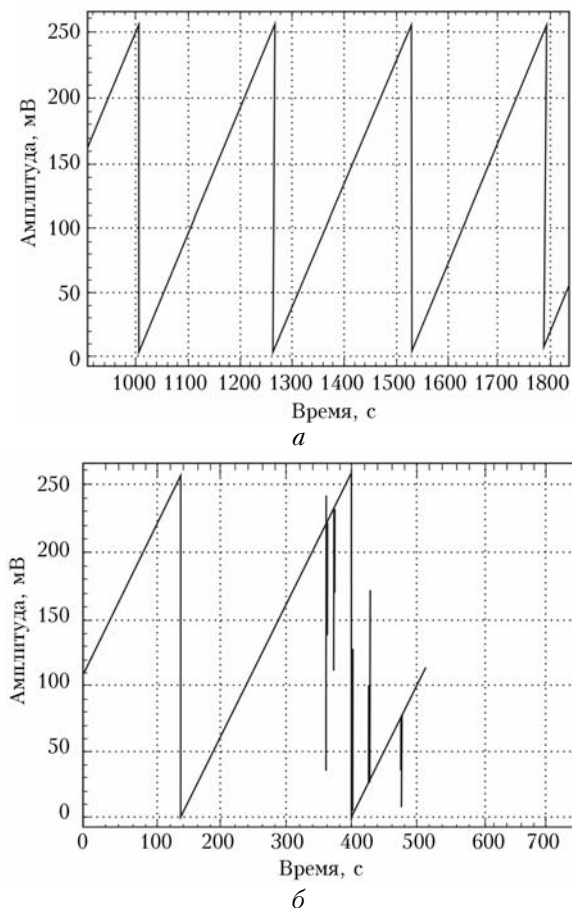


Рис. 6. Изображение графического тест-объекта, переданного через канал с отражением (получено с экрана осциллографа Rigol)

На рис. 6, *a* приведено неискаженное изображение тест-объекта, переданное через тот же канал, что и на рис. 5, но в другой момент времени, на рис. 6, *б* — реакция ОЭСС на внесение в канал

«искусственных» помех (помещение перед приемником в дискретные моменты времени непрозрачного объекта) при очередном сеансе связи через 300 с после его начала.

Выбранные способы оценки качества каналов позволяют количественно оценить его, используя такие статистические характеристики, как значения средних ошибок и среднеквадратических отклонений.

### Заключение

Для теоретического исследования бистатистических каналов оптической связи выбран и обоснован метод Монте-Карло, в рамках которого созданы программно-информационные средства для статистического моделирования энергетического ослабления и передаточных свойств внешних каналов связи с рассеянием и отражением. Осуществлены тестовые численные эксперименты для конкретных характеристик схем связи с целью определения влияния углов поля зрения оптической приемной системы на процесс формирования переднего и заднего фронтов импульсной переходной характеристики при облачной и безоблачной атмосфере. Установлено, что при существенном замутнении атмосферы и малых углах поля зрения приемника передний фронт характеристики  $h(t)$  содержит максимум.

Для экспериментальных исследований создан и прошел тестовые полевые испытания лабораторный макет бистатистической системы связи. Обоснован выбор, и реализована время-импульсная модуляция потока лазерных импульсов для двух вариантов (текстового и графического) оценки качества линии связи. Выбранные способы оценки качества каналов позволяют количественно оценить его, используя такие статистические характеристики, как значения средних ошибок и среднеквадратических отклонений.

1. Украинцев Ю.Д., Цветов М.А. История связи и перспективы развития телекоммуникаций. Ульяновск: УЛГТУ, 2009. 128 с.
2. Милютин Е.Р., Гумбинин А.Ю. Статистическая теория атмосферного канала оптических информационных систем. М.: Радио и связь, 2002. 256 с.
3. Милютин Е.Р. Влияние среды распространения на полосу частот в загоризонтной оптической системе передачи информации // Радиотехн. и электрон. 2001. Т. 46, № 6. С. 673–675.
4. Белов В.В., Борисов Б.Д., Серебрянников А.Б. Передаточные свойства оптических каналов связи над отражающей поверхностью // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12, № 8. С. 669–673.

5. *Кеннеди Р.С.* Введение в теорию передачи сообщений по оптическим каналам с рассеянием // Труды Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике. 1970. Т. 58, № 10. М.: Мир. С. 264–278.
6. *Пожидаев В.Н.* Выбор длины волны для систем загоризонтной связи в оптическом диапазоне // Радиотехн. и электрон. 1977. Т. 22, № 11. С. 2265–2271.
7. *Пожидаев В.Н.* Осуществимость линий связи ультрафиолетового диапазона, основанных на эффекте молекулярного и аэрозольного рассеяния в атмосфере // Радиотехн. и электрон. 1977. Т. 22, № 10. С. 2190–2192.
8. *Mooradian G.C., Geller M., Stotts L.B., Stephens D.H., Krautwald R.A.* Blue-green pulsed propagation through fog // Appl. Opt. 1979. V. 18, N 4. P. 429–441.
9. *Mooradian G.C., Geller M., Levine P.H., Stotts L.B., Stephens D.H.* Over-the-horizon optical propagation in a maritime environment // Appl. Opt. 1980. V. 19, N 1. P. 11–30.
10. *Mooradian G.C., Geller M.* Temporal and angular spreading of blue-green pulses in clouds // Appl. Opt. 1982. V. 21, N 9. P. 1572–1577.
11. *Wu B., Hajjarian Z., Kavehrad M.* Free space optical communications through clouds: analysis of signal characteristics // Appl. Opt. 2008. V. 47, N 17. P. 3168–3176.
12. *Кузяков Б.А.* Анализ эффективности открытых систем связи ближнего и среднего ИК диапазонов в гражданской авиации // М: Мат-лы VII Междунар. научно-техн. конф. «INTERMATIC-2009». 2009. Ч. 4. С. 211–214.
13. *Hajjarian Z., Fadlullah J.* MIMO Free Space Optical Communications in Turbid and Turbulent Atmosphere // J. Commun. 2009. V. 4, N 8. P. 524–532.
14. *Мирошниченко И., Сизов В.* Атмосферные оптические средства для передачи и приема информации // Фотоника. 2009. Т. 16, № 4. С. 22–24.
15. *Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назаралиев М.А., Дарбинян Р.А., Каргин Б.А., Елепов Б.С.* Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, 1976. 284 с.
16. *Зуев В.Е., Белов В.В., Веретенников В.В.* Теория систем в оптике дисперсных сред. Томск: Спектр, 1997. 402 с.
17. *Веретенников В.В., Абрамочкин А.И.* Определение оптических и микроструктурных характеристик капельных облаков при лазерном зондировании с учетом многократного рассеяния // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 7. С. 671–680.
18. *Тарасенков М.В., Белов В.В., Абрамочкин В.Н.* Моделирование импульсных передаточных характеристик оптических каналов связи с рассеянием и отражением // Мат-лы II Всерос. научно-техн. конф. «Научное и техническое обеспечение исследований и освоения шельфа Северного Ледовитого океана». Новосибирск: Инфосфера, 2012. С. 174–177.
19. *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. 1988. 137 p.
20. *Арсентьев В.Г., Берестяк А.С., Криволапов Г.И.* Об эффективности импульсного метода передачи информации в автономных системах мониторинга // Мат-лы II Всерос. научно-техн. конф. «Научное и техническое обеспечение исследований и освоения шельфа Северного Ледовитого океана». Новосибирск: Инфосфера, 2012. С. 178–180.

*V.V. Belov, M.V. Tarasenkova, V.N. Abramochkin, V.V. Ivanov, A.V. Fedosov, V.O. Troitskii, D.V. Shiyanov.* **Atmospheric bistatic communication channels with scattering. Part 1. Methods of investigation.**

Methods of theoretical and experimental investigation of bistatic optical communication schemes are discussed in the present article. A laboratory model of optoelectronic communication system has been developed for experimental investigation. As a source of signals, radiation of copper vapor laser at a wavelength of 510 nm is used. Test demonstration experiments have been carried out in the outdoor atmosphere through atmospheric channels with a reflecting surface and dense nonstationary aerosol-molecular formation. To perform theoretical investigations, software has been developed intended for numerical statistical estimation of the energy and transfer characteristics of the bistatic atmospheric communication channels by the Monte Carlo method.