

Оптическая связь на рассеянном или отражённом лазерном излучении

В.В. БЕЛОВ

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

Аннотация

В работе обсуждаются результаты теоретических и экспериментальных исследований по бистатическим (загоризонтным) системам связи в атмосфере, подводной и смешанной средах на основе публикаций авторов из КНР, Канады, Греции, США, Великобритании, России и др. стран. В основу теоретических исследований положены теории переноса излучения и линейных систем. Решение уравнения переноса излучения осуществлено методом Монте-Карло и в приближении однократного рассеяния. Показано – приближённый метод применим, если средняя кратность рассеяния в открытых каналах связи не превышает 1.

Методом Монте-Карло исследовано влияние оптико-геометрических характеристик схем формирования каналов связи на вероятность ошибок связи, на отношение сигнал / шум, на предельные базовые расстояния, на ослабление информационных сигналов и их наложение, приводящее к ошибкам связи.

Приведены примеры осуществления связи в атмосфере в УФ диапазоне длин волн на расстояниях до 1300 м, в видимом диапазоне – до 70 км и под водой – до 20 м.

Планируются: поиск оптимальных способов модуляции сигналов; развитие программно-информационных средств численного моделирования передаточных свойств каналов связи; совершенствование аналитических моделей импульсных реакций в некомпланарных схемах бистатических оптико-электронных систем связи (ОЭСС); исследование влияния разных форм волн на водной поверхности и процессов рассеяния в воде на эффективность работы систем связи и расширение области вариаций входных параметров бистатических ОЭСС при проведении экспериментов в естественных водоёмах.

Ключевые слова: оптические системы связи в атмосфере и под водой,

метод Монте-Карло, однократное рассеяние.

Введение

Существенный прогресс в создании современных высококачественных систем связи и управления через атмосферные каналы связан с освоением для этой цели радиодиапазона длин волн. Связь в радиодиапазоне всепогодна и доступна практически всем.

Между тем исторически первым для скоростной передачи сообщений был использован именно оптический диапазон. Начало возникновения оптической связи уходит в глубь веков. По сути, используется она и сейчас – для передачи знаков телеграфной азбуки Морзе с помощью осветительных приборов (ОП) направленного действия (например, судовых светосигнальных прожекторов: типа МСНП-250М и др.).

Через столетия на смену этим технологиям передачи информации пришли новые, основанные на использовании лазерных источников излучения и оптоволоконных каналов. Объединение возможностей радиодиапазона и оптических систем связи этого вида привело, в частности, к созданию Интернета.

Имеет ли смысл создавать новые оптические системы связи и существуют ли условия, при которых передача управляющих сигналов или информационных потоков не может быть осуществлена в радиодиапазоне в воздушной среде или в акустическом диапазоне в среде водной? Этими условиями могут быть невозможность или нежелательность использования для этих целей радиоволн или низкая скорость передачи данных акустическими средствами под водой.

Поэтому стала развиваться следующая ветвь оптических коммуникационных систем, которая основана на использовании открытых каналов связи в безвоздушном пространстве, атмосфере и водной среде, позволяю-

щих передавать и принимать информационные потоки в пределах прямой видимости. За рубежом системы связи этого типа чаще называют *Line of Sight (LOS)* системами. Полезный сигнал в них – нерассеянное оптическое излучение. Выполнены обширные теоретические исследования, связанные с возможностью реализации *LOS* систем, с оценкой их дальности действия в воздушной, водной и смешанных (вода-воздух или воздух-вода) средах. Результаты этих и экспериментальных исследований опубликованы в многочисленных работах и продолжают интенсивно публиковаться (например, [1–10]). Существуют коммерческие образцы таких оптико-электронных систем связи (ОЭСС). Примером может быть оптический модем PAVLight ET-4000.

Данный обзор посвящён результатам теоретических и экспериментальных исследований ОЭСС, в которых полезным сигналом служит рассеянное или отражённое оптическое излучение. Эти ОЭСС в России называют бистатическими или загоризонтными, а за рубежом чаще – *Non Line of Sight (NLOS)* ОЭСС. Несмотря на то, что о возможности реализации такой связи сообщалось в научных публикациях прошлого века (например, [11]), интенсивные теоретические, а затем экспериментальные исследования в этом направлении начались более 15 лет назад и продолжают оставаться актуальными в настоящее время.

Основное достоинство связи в пределах прямой видимости – высокоскоростная передача данных. Однако возможны её прерывания, связанные с препятствиями на линии распространения излучения и «беганием пучка» по плоскости апертуры приёмника, вызываемого турбулентными пульсациями оптических характеристик в открытых каналах связи. Этим недостатком лишена оптическая связь вне прямой видимости. Преимущество бистатической связи над *LOS* связью состоит в том, что она реализуема на существенно большие расстояния в случаях, когда между приёмником и источником излучения существуют препятствия, и что она многоадресна.

Далее ограничимся рассмотрением в основном систем связи, использующих импульсные источники излучения, считая, что, по крайней мере, по дальности действия (а нас интересует бистатическая связь) они имеют су-

щественное преимущество над теми, в которых применяются источники непрерывного излучения.

В обзоре не рассматриваются все опубликованные результаты исследований в этой научно-технической области, но это не значит, что работы, не вошедшие в список литературы к обзору, не содержат новых результатов на момент их опубликования (т.к. общее число публикаций на рассматриваемую тему не одна сотня, в рецензируемых журналах, трудах и материалах конференций и симпозиумов).

Цели исследований и постановки задач

Опишем структуру бистатической ОЭСС набором следующих параметров и характеристик (назовём их входными). Источник излучения: длина волны λ , тип поляризации, угловая расходимость пучка v_s , радиус внешней окружности начального сечения пучка r_s , ориентация оптической оси $\omega_s(\theta_s, \varphi_s)$, средняя мощность P_s . Приёмная оптико-электронная система: угол поля зрения v_d , радиус входного зрачка r_d , ориентация оптической оси $\omega_d(\theta_d, \varphi_d)$, спектральная чувствительность приёмника излучения и уровень его шумов P_f . Электронные блоки модуляции и демодуляции исходного и принимаемого излучения являются составными многокомпонентными элементами любой, в том числе бистатической системы связи. Базовое расстояние между источником и приёмником излучения L_d – важнейший внешний параметр ОЭСС.

Типичная бистатическая ОЭСС содержит (рис. 1): «Комп 1» – управляющий компьютер; «Комп 2» – приёмный компьютер для фиксации принятой информации и, например, оценки характеристик качества канала связи; «Модулятор сигнала» – для ввода информации в лазерный пучок; «Демодулятор сигнала» – для расшифровки принятого рассеянного или отражённого лазерного излучения; блок «Оптика», в котором осуществляется формирование лазерного излучения с требуемой расходимостью (возможно преобразование излучения на λ_1 в излучение на λ_2 и т.д.)¹.

¹ Отметим, что в зарубежной литературе иногда бистатические ОЭСС называют *Direct NLOS*, если полезный сигнал – отражённый от поверхности (здание, самолёт, днище корабля, поверхность раздела воздух-вода и т.п.), и *Non Direct NLOS*, если таковым является рассеянное излучение в водной или в воздушной среде.

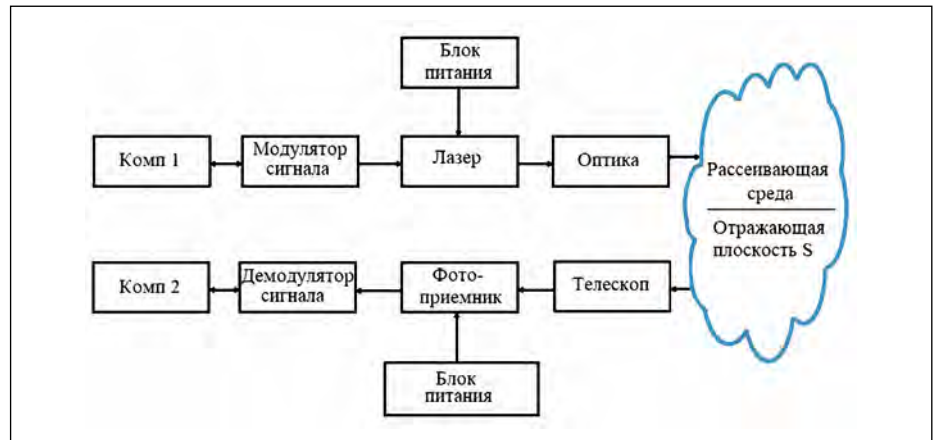


Рис. 1. Общая структурная блок-схема бистатических ОЭСС

Рис. 2. Геометрическая схема формирования внешних каналов бистатической связи



На геометрической схеме (рис. 2) для упрощения изображена компланарная схема ОЭСС, когда оптические оси лазерного пучка и приёмной оптической системы находятся в плоскости XoY и ориентация осей определяется углами места θ_s и θ_d .

К основным, назовём их «выходными», характеристикам ОЭСС в целом отнесём уровень вероятностей ошибок p , их среднеквадратичное отклонение σ и скорость передачи символов s . Каждая из этих характеристик зависит от перечисленных выше параметров приёмно-передающих блоков и геометрических параметров схем организации внешних каналов бистатических ОЭСС.

Поэтому основные цели теоретических и экспериментальных исследований по бистатическим системам связи или управления состоят в определении значения этих характеристик в зависимости от всей совокупности параметров, определяющих конкретный вид ОЭСС, или от некоторой их части, а также от оптического состо-

яния внешних каналов распространения излучения от источника к приёмнику. Кроме того, целью экспериментальных исследований может быть подтверждение или опровержение теоретических выводов о возможностях реализации и характеристиках тех или иных ОЭСС. Так, например, в работе [11], ещё в 1997 г., была предсказана возможность осуществления бистатической связи в УФ диапазоне длин волн, при базовых расстояниях до 200 км. До сих пор экспериментально этот вывод не опровергнут, но и не подтверждён.

Атмосферные бистатические системы связи

С точки зрения системного анализа любую из рассматриваемых ОЭСС (рис. 1) можно разделить надвое: приёмно-передающую часть и внешний канал связи. При фиксированных характеристиках оптико-электронных блоков (рис. 2) выходные характеристики ОЭСС будут зависеть от оптического состояния канала распространения излучения от источника до приёмника. Как в атмосфере, так и в водной среде эти состояния могут варьироваться в широких пределах [12–15]. Поэтому

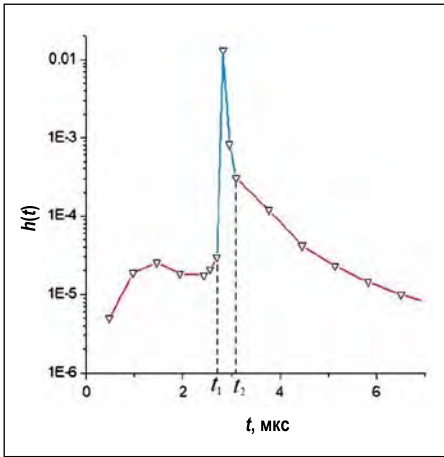


Рис. 3. Пример моделирования импульсной реакции методом Монте-Карло [18]

основное внимание в работах [16–40] чаще уделено анализу влияния входных параметров ОЭСС, в том числе оптических свойств атмосферы, на качество связи. При прочих равных условиях оптические свойства канала связи могут вести к ограничению дальности действия ОЭСС, к повышению вероятности ошибок и, как к одному из средств преодоления этого ограничения, к вынужденному снижению скорости передачи информационных сигналов.

Теоретическое исследование передаточных свойств бистатистических каналов ОЭСС выполняется в рамках теории переноса коротковолнового оптического излучения в рассеивающих и поглощающих средах (каковыми являются атмосфера и водные среды) и теории анализа линейных систем.

Уравнение переноса излучения устанавливает связь между силой излучения в заданной точке и заданном направлении в среде с определёнными оптическими характеристиками. В интегро-дифференциальной форме оно имеет вид

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I}{\partial t} + (\boldsymbol{\omega}, \text{grad } I) = -\beta_{\text{ext}} I + \beta_{\text{sc}} \times \int_{\Omega} I(\mathbf{r}, \boldsymbol{\omega}') g(\mathbf{r}, \boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega}') d\boldsymbol{\omega}' + \Phi_i(\mathbf{r}, \boldsymbol{\omega}), \quad (1)$$

где $I = I(\lambda, r, \omega)$ – сила излучения в точке r в направлении ω ; c – скорость света; $\beta_{\text{ext}}(\lambda, r)$ – коэффициент ослабления в точке r ; $\beta_{\text{sc}}(\lambda, r)$ – коэффициент рассеяния в точке r ; $g(\lambda, r, \omega, \omega')$ – индикатриса рассеяния в точке r в направлении ω ; ω' – направление

распространения излучения до рассеяния; Φ_o – функция источника в точке r в направлении ω .

Это уравнение линейно относительно I , поэтому анализ передаточных свойств бистатистического канала связи целесообразно вести в рамках теории линейных систем, т.е. исследовать реакцию канала $h(t)$ на входной $\delta(t)$ -импульс в зависимости от входных параметров ОЭСС.

Уравнение (1) не имеет общего аналитического решения, и часто для его решения в приложениях, связанных с бистатистическими ОЭСС, используют разные алгоритмы метода Монте-Карло (от алгоритмов прямого моделирования [19] до модификаций двойных локальных оценок [20]). Приближение однократного рассеяния для определения импульсной реакции $h(t)$, уширения импульсов и т.п. имеет очевидную ограниченность области его применения (рис. 3).

При этом отмеченный на рис. 3 временной интервал $[t_1, t_2]$ соответствует области пересечения конусов расходимости лазерного пучка и поля зрения приёмной системы (заштрихованная область на рис. 2). Функция $h(t)$ при значениях t вне этого интервала определяется взаимодействием с кратностью рассеяния > 1 ; т.е. передний и задний фронты импульсной реакции $h(t)$, на рис. 3, могут быть определены по уравнению (1) с учётом кратности рассеяния ≥ 2 .

У атмосферных ОЭСС более широкие возможности выбора спектральных характеристик лазерных источников (от УФ, видимый и ИК диапазоны), а в водной среде этот выбор ограничен видимым диапазоном («зелёный» и «синий» участки).

Каковы причины того, что бистатистическая связь прерывается или не может быть осуществима? Для принятия информационного сигнала, очевидно, необходимо, чтобы его мощность превосходила мощность внутренних шумов приёмника излучения P_f . Ошибки связи станут возникать, если это условие временами будет не выполняться. А это может возникать или из-за турбулентных пульсаций оптических характеристик в канале связи или из-за пересечения поля зрения приёмника локальными сгустками рассеивающих или поглощающих оптически более плотных образований (фрагменты дымовых шлейфов, облачных сред и т.п.).

Мощность принятого информационного сигнала может и превосходить P_f и, тем не менее, связь может быть невозможной. Это происходит, когда значения импульсной реакции при $t < t_1$ и $t \rightarrow t_1$ или при $t < t_2$ и $t \rightarrow t_2$ становятся близкими или равными тах $h(t)$ в центральной её части.

Исходя из этих общих знаний о взаимодействии оптического излучения с рассеивающими и поглощающими средами, сделаем предположения о влиянии некоторых оптико-геометрических параметров бистатистических ОЭСС на их, например, дальность действия. Проведём ряд следующих мысленных экспериментов. Зафиксируем все геометрические, оптические параметры и характеристики приёмника излучения. Пусть расходимость пучка лазерного излучения $v_s = 0$, а дальность действия при этом достигнет некоторого значения L_d . Будем увеличивать v_s до $\pi/2$; очевидно, что L_d будет монотонно убывать (т.к. монотонно снижается энергетическая яркость пучка излучения источника в области пересечения конусов расходимости пучка и поля зрения приёмной оптической системы (рис. 2)). Увеличение v_s приведёт и к росту мощности импульсной реакции при $t < t_1$ и $t \rightarrow t_1$ или при $t < t_2$ и $t \rightarrow t_2$, что приведёт к росту вероятности ошибок, которые можно уменьшить, снизив скорость передачи импульсов.

Пусть фиксируются все оптико-геометрические параметры схемы ОЭСС (рис. 2) кроме угла v_d , который будем монотонно увеличивать, начиная с нулевого значения. Предположим, что при $v_d = 0$ дальность действия ОЭСС равна L_d . Нетрудно показать, что с увеличением v_d будет расти мощность фронтов реакции $h(t)$ и увеличиваться интервал $[t_1, t_2]$, но увеличения тах $h(t)$ не произойдёт. Оба эти фактора могут увеличить ошибки связи, т.е., начиная с некоторых значений v_d , предельная база L_d будет уменьшаться.

Достаточно просто предсказать зависимость L_d от вариации некоторых оптических свойств среды, в которой образуется внешний канал ОЭСС (рис. 2). Пусть оптические характеристики среды однородны. Фиксируем значение всех других параметров ОЭСС. Пусть рассеивающие свойства среды отсутствуют. Тогда, очевидно, база $L_d = 0$, вероятности ошибок $p = 0$, скорость передачи символов $s = 0$. Пусть коэффициент рассеяния $\beta_{\text{sc}} \rightarrow$

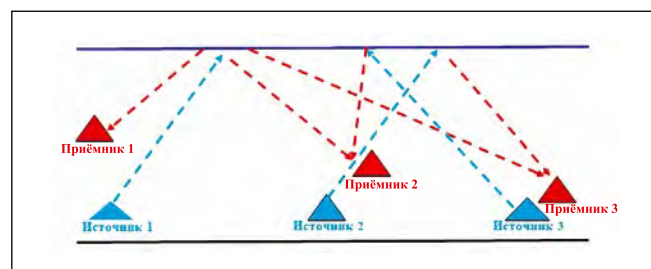
∞ , тогда, очевидно, $L_d \rightarrow 0$, вероятности ошибок $p \rightarrow 0$, скорость передачи символов $s \rightarrow 0$. Следовательно, при каждом значении β_{sc} существуют ненулевые конкретные значения L_d , p и s , т.е. существует при каждом наборе входных параметров ОЭСС такое оптическое состояние среды, при котором реализуемо максимальное значение L_d .

При вариациях углов ориентации осей пучка и поля зрения приёмной системы θ_s и θ_d соответственно (при фиксированных всех прочих параметрах ОЭСС) можно предполагать, что наилучшие условия для связи (по крайней мере, с точки зрения уровня $h(t)$) реализуются при θ_s и $\theta_d \rightarrow 0^\circ$. Этот вывод останется тем же и при вертикальной оптической неоднородности атмосферы, характеризующейся уменьшением рассеивающих свойств с высотой над земной поверхностью. При этом исключаем из рассмотрения экзотические случаи, когда, например, у земной поверхности $\beta_{sc} \rightarrow \infty$. Очевидно, что рост средних или пиковых мощностей излучения лазеров приведёт к росту предельных значений L_d .

Что касается атмосферных ОЭСС, то существенно большее количество теоретических и экспериментальных исследований посвящено УФ бистатическим системам. Предложен неплохой обзор [16] по истории развития систем излучения и регистрации УФ сигналов. Упомянутые в нём лампы использовались ранее в системах связи. Приборы с ними, как правило, были громоздки и энергетически малоэффективны. Полупроводниковые оптические источники имеют низкую стоимость, малый размер, низкое энергопотребление, высокую надёжность. Поэтому в бистатических системах УФ связи всё шире используются современные светодиоды и приёмники излучения (в том числе лавинные). Тем не менее есть примеры использования твердотельных УФ лазеров [21] и преобразования в УФ излучение излучения лазеров видимого диапазона [56].

В подавляющем большинстве экспериментальных исследований [16–40] УФ ОЭСС рассматриваются в приложении к небольшим базам L_d . В статье [56] сообщается о реализации бистатической связи в этом диапазоне не в дневное время суток при базовом расстоянии 1300 м.

Рис. 4. Геометрическая схема организации подводной связи на основе отражения от поверхности раздела вода-атмосфера



Подчеркнём, что работ по бистатическим ОЭСС в видимом и ИК диапазонах спектра существенно меньше, чем по УФ бистатическим ОЭСС. Примером их могут служить работы [2] (ИК диапазон, LOS ОЭСС) и [53] (видимый диапазон, бистатическая ОЭСС). Интерес к УФ системам связи понятен. В солнечно-слепом диапазоне они работоспособны круглосуточно, если нет искусственных УФ помех.

Основные методы исследования передаточных свойств бистатических каналов – метод Монте-Карло [18–20, 23, 29, 30, 32–34, 39, 50–52] и приближение однократного рассеяния [11, 17, 22, 38]. В работах [17–19] приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния геометрических параметров на вероятности ошибок и дальность действия бистатической ОЭСС. В работе [30] показано, что приближение однократного рассеяния при решении уравнения переноса излучения не может использоваться для исчерпывающего объяснения получаемых в экспериментах результатов, и сравниваются значения ширины импульсной реакции, которые определялись при конкретных входных параметрах схемы ОЭСС методом Монте Карло и в приближении однократного рассеяния. Показано, что приближение однократного рассеяния применимо для оценки $h(t)$, если среда прозрачна и кратность рассеяния в атмосферном канале не превышает 1. В модельном эксперименте при среднем количестве столкновений в канале 3,85 ширина $h(t)$ составила 8 мкс, а в приближении однократного рассеяния она практически отсутствовала.

Общим для работ [16, 17, 19, 21–36, 38, 39] является то, что в них приводятся результаты теоретических и (или) экспериментальных исследований, посвящённых так или иначе анализу влияния входных параметров ОЭСС на качество связи (вероятности ошибок), дальность действия (не превышавшей в экспериментах 100 м),

скорость передачи данных и помехозащищённость.

В статье [54] приведён пример моделирования методом Монте Карло импульсной реакции, с помощью которой оценены дальное действие и скорость передачи данных с учётом характеристик приёмника излучения (фотоумножителя) ФЭУ-17а. Статистические эксперименты проведены для ОЭСС, в состав которой входит лазерный источник излучения на $\lambda = 0,5$ мкм. Зависимость качества связи от температурного режима приёмника рассмотрена в статьях [6, 57].

Важное место в теоретических и экспериментальных исследованиях по бистатическим ОЭСС отводится способам повышения устойчивости их работы. Выбор и сравнение способов модуляции излучения рассмотрен, например, в статье [26], а в статьях [23, 25] обсуждаются разные варианты структуры приёмников излучения в составе ОЭСС.

Подводные бистатические системы связи

Работы [41–51, 55] посвящены результатам теоретических и экспериментальных исследований подводных систем связи. Среди них обратим внимание на работу [44], в которой дан обширный обзор работ, связанных с LOS ОЭСС, но касающихся и некоторых аспектов бистатических ОЭСС. Он содержит 232 ссылки на публикации авторов из США, Канады, КНР и др. стран. Дополним его кратким анализом других работ.

На рис. 4 приведена постановка задач в работах [46, 51]. При этом изображённая схема связи получила название «Direct NLOS» (рис. 2). Возникновение интереса к подобным работам связано с использованием сетей интеллектуальных роботов для решения задач мониторинга состояния подводных объектов, поиска полезных ископаемых и др. В статьях [46, 51] описаны некоторые численные эксперимен-

ты и рассмотрена не только плоская, но и взволнованная водная поверхность, но без учёта рассеяния в воде.

В работе [42] обсуждаются результаты экспериментальных исследований выполненных в лабораторных условиях при базовых расстояниях не более нескольких метров. Выводы из подобных экспериментов сводятся к тому, что дальность действия *LOS* ОЭСС, *Direct* и *Non Direct* бистатистических ОЭСС зависит от мутности воды, повышение которой приводит как к уменьшению дальностей действия ОЭСС, так и к уменьшению предельной скорости передачи данных.

Подавляющее число публикаций результатов теоретических исследований бистатистических подводных ОЭСС основаны на применении метода Монте-Карло для решения уравнения переноса. Здесь ограничимся ссылками на работы [43, 47–51]. Описание передаточных свойств подводных бистатистических каналов связи осуществляется в рамках теории линейных систем с использованием функций влияния $h(t)$ (примером может служить работа [47]). В работе [48], в частности, сравниваются возможности *LOS* и бистатистических систем связи. Численными экспериментами показано, что частота передачи символов в *LOS* системах связи может достигать 100 МГц в мутной среде и значительно больше в чистой. Для бистатистических систем эта частота ограничена 20 МГц в чистой воде. Эти результаты были получены в численных экспериментах при базовых расстояниях до 20 м. При моделировании методом Монте-Карло процесса распространения оптического излучения в водной среде в качестве индикатрисы рассеяния на гидрозолях в [48] использована функция Хензи-Гринштейна и оценены вероятности ошибок связи, обусловленных «интерференцией» импульсов, т.е. наложением на задний фронт предыдущего импульса переднего фронта текущего импульса (рис. 3).

Обратим также внимание на работы [45, 55], содержащие результаты экспериментов по осуществлению оптической связи через смешанные среды. При этом в [45] обсуждаются результаты лабораторных экспериментов при реализации *LOS* схемы связи на трассах воздух-вода (приёмник – в воде) и вода-воздух (приёмник – в воздухе), а в [55] приводятся результаты экспериментов в есте-

ственном водоёме в полевых условиях. В частности, приводятся оценки вероятностей ошибок связи и их среднеквадратичных отклонений при осуществлении связи через лёд.

Заключение

Актуальность исследований по проблемам оптической связи на рассеянном или отражённом излучении подтверждается обилием прошлых и продолжающихся публикаций (есть примеры таковых и в 2018 г.). Страны, ведущие исследования в этом направлении, в том числе совместно друг с другом – КНР (наибольшее число публикаций), Канада, США, Греция, Великобритания, Россия и др.

Основные результаты, выявленные данным обзором, следующие:

- Моделирование методом Монте-Карло процесса переноса информационных сигналов в атмосферных бистатистических каналах [54] показывает, что (при прочих равных условиях) мощность принимаемого информационного импульса максимальна: 1) при небольших базовых расстояниях (2–3 км) на $\lambda \approx 0,3$ мкм; 2) при больших базовых расстояниях и низкой мутности среды (метеорологическая дальность видимости $S_M \approx 50$ км) на $\lambda \approx 0,5$ мкм; 3) при высокой мутности атмосферы ($S_M \approx 10$ км), в зависимости от базовых расстояний и ориентации плоскости приёма, на $\lambda \approx 0,5$ или 0,9 мкм. Там же показано, что предельные частоты передачи импульсов в бистатистической ОЭСС, в зависимости от оптического состояния атмосферы и геометрических параметров схем формирования каналов связи, лежат (при идеальных характеристиках приёмного и передающего блоков) в пределах от $4 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^7$ Гц.

- Осуществлена бистатистическая связь в атмосфере в видимом диапазоне длин волн при базовых расстояниях до 70 км [53], достигнуты базовые расстояния в УФ диапазоне до 1300 м [56] и до 40 м при подводной связи в естественном водоёме [58].

- На основе исследований по сетевым применениям бистатистических систем установлено, что оптические системы связи на короткие (до 100 м) базовые расстояния с использованием полупроводниковых излучателей существенно дешевле и компактней [28]. При этом эксперименты проведены на $\lambda = 0,34$ мкм.

- Созданы программные средства для исследования передаточных свойств некомпланарных систем связи (например, [23, 33]). Полученные в [23] теоретические результаты подтверждены экспериментами.

- Анализируется возможность применения сетевых технологий для мониторинга биосистем, обнаружения пожаров, контроля за загрязнением атмосферы и связью в УФ диапазоне 0,200–0,280 мкм [31]. Там же на основе аналитических соотношений, полученных в приближении однократного рассеяния для малых базовых расстояний, исследовано влияние оптико-геометрических условий и мощности излучения на вероятности ошибок, отношение сигнал/шум и др. характеристики рассмотренной ОЭСС.

- Сообщается о разных типах лазерных источников, используемых в бистатистических ОЭСС. Есть примеры использования непрерывного излучения с последующей его трансформацией в импульсное [40]. В состав ОЭСС включают твердотельные УФ лазеры и газоразрядные лазеры с видимым излучением, которое при необходимости преобразуется в УФ излучение (с помощью нелинейно-оптических кристаллов *BBO*).

- Внимание исследователей привлечено к проблеме использования поляризационных свойств света с целью повышения помехозащищённости ОЭСС, работающих на рассеянном лазерном излучении. Созданы программно-алгоритмические средства метода Монте-Карло для моделирования процесса распространения и приёма поляризованного излучения в бистатистических каналах связи [34]. Показано, что, используя поляризационный приём, можно снижать вероятность ошибок, уменьшая влияние многократного рассеяния на формирование передних и задних фронтов импульсов.

- Одним из факторов, влияющих на качество работы бистатистических ОЭСС, является турбулентность. Она может уменьшать мощность полезного сигнала и срывать связь. В работе [35] проанализировано влияние количества приёмников излучения на уровень ошибок связи.

- Важная составляющая ОЭСС – приёмники излучения. В цитированной литературе использовались приёмники фирмы *Hamamatsu*, лавинные фотодиоды, фотоумножители

ФЭУ-142 и ФЭУ-17а и более современные фотоумножители УФК-4Г-4, УФК-4Г-3 и УФК-4Г-2 производства ООО «КАТОД».

- Описана методика оценок в реальном времени вероятностей ошибок связи и их среднеквадратичного отклонения при проведении испытаний бистатистических ОЭСС в атмосфере, водной и смешанных средах [52, 53].

- В области подводной связи проводятся численные эксперименты методом Монте-Карло с учётом взволнованности водной поверхности для схем ОЭСС «Direct NLOS», оценивается скорость передачи данных в чистой и замутнённой воде [51].

- Будущие работы исследователи связывают с: поиском оптимальных способов модуляции сигналов; развитием средств численного моделирования передаточных свойств бистатистических каналов связи; развитием аналитических моделей импульсных реакций в некомпланарных схемах реализации бистатистических ОЭСС; исследованием влияния типов волн на водной поверхности и процессов рассеяния в воде на эффективность работы систем связи на рассеянном лазерном излучении; расширением области вариаций входных параметров бистатистических ОЭСС при проведении экспериментов в естественных водоёмах.

Автор благодарен коллегам М.В. Тарасенкову, В.Н. Абрамочкину, А.В. Федосову, А.Н. Кудрявцеву, В.В. Иванову и Ю.В. Гридневу за совместные работы по исследованию, созданию и испытанию атмосферных и подводных бистатистических ОЭСС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lee I.E., Ghassemlooy Z., Ng W.P., Khalighi M-A., Liaw S-K. Effects of aperture averaging and beam width on a partially coherent Gaussian beam over free-space optical links with turbulence and pointing errors // *Applied Optics*. – 2016. – Vol. 55, No. 1. – P. 1–9.
2. Amr S. El-Wakeel, Nazmi A. Mohammed, and Moustafa H. Aly. Free space optical communication system performance under atmospheric scattering and turbulence for 850 and 1550 nm operation // *Applied Optics*. – 2016. – Vol. 55, No. 26. – P. 7276–7286.
3. Zhenguang Gao, Hongzhan Liu, Xiaoping Ma, and Wei Lu. Performance of multi-hop parallel free-space optical communication over gamma-gamma fading channel with point-

ing errors // *Applied Optics*. – 2016. – Vol. 55, No. 32. – P. 9178–9184.

4. Zina Abu-Almaalie, Zabih Ghassemlooy, Manav R. Bhatnagar, Hoa Le-Minh, Nauman Aslam, Shien-Kuei Liaw, It Ee Lee. Investigation on iterative multiuser detection physical layer network coding in two-way relay free-space optical links with turbulences and pointing errors // *Applied Optics*. – 2016. – Vol. 55, No. 33. – P. 9396–9406.

5. Xin Zhao, YunQing Liu, Yansong Song. Line of sight pointing technology for laser communication system between aircrafts // *Optical Engineering*. – 2017. – Vol. 56, No. 12: 126107.

6. Huihua Fu, Ping Wang, Tao Liu, Tian Cao, Lixin Guo, and Jiao Qin. Performance analysis of a PPM-FSO communication system with an avalanche photodiode receiver over atmospheric turbulence channels with aperture averaging // *Applied Optics*. – 2017. – Vol. 56, No. 23. – P. 6432–6439.

7. Bykova N.G., Gochelashvily K.S., Karfidov D.M., Makarenko G.F., Senatorov A.K., Sergeichev K.F., Shatalov O.P., Zabelinskii I.E. Experimental demonstration of feasibility of laser communication with the reentry spacecraft at 1,55 mkm // *Applied Optics*. – 2017. – Vol. 56, No. 10. – P. 2597–2603.

8. Jing Ma, Jiajie Wu, Liying Tan, and Siyuan Yu. Polarization properties of Gaussian-Schell model beams propagating in a space-to-ground optical communication downlink // *Applied Optics*. 2017. Vol. 56, No. 6. P. 1781–1787.

9. Ming Li, Wenbo Gao, and Milorad Cvijetic. Slant-path coherent free space optical communications over the maritime and terrestrial atmospheres with the use of adaptive optics for beam wavefront correction // *Applied Optics*. 2017. – Vol. 56, No. 2. – P. 284–297.

10. Воронцов М.А., Дудоров В.В., Зырянова М.О., Колосов В.В., Филимонов Г.А. Частота появления ошибочных битов в системах беспроводной оптической связи с частично когерентным передающим пучком // *Оптика атмосферы и океана*. – 2012. – Т. 25, № 11. – С. 936–940.

11. 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.

12. Зуев В.Е., Креков Г.М. Современные проблемы атмосферной оптики. Т. 2. Оптические модели атмосферы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – 256 с.

13. Зуев В.Е., Белан Б.Д., Задде Г.О. Оптическая погода. – Новосибирск: Наука, 1990. – 192 с.

14. Оптика океана и атмосферы / под ред. К.С. Шифрина. – М: Наука, 1981. – 231 с.

15. Оптика океана. Т. 2. Прикладная оптика океана / Под ред. А.С. Моница. – М: Наука, 1983. – 236 с.

16. Chen G., Abou-Galala F., Xu Z., Sadler B.M. Experimental evaluation of LED-based solar blind NLOS communication links // *Optics Express*. – 2008. – Vol. 16, No. 19. – P. 15059–15068.

17. Chen G., Xu Z., Ding H., Sadler B.M. Path loss modeling and performance trade-off study for short-range non-line-of-sight ultraviolet communications // *Optics Express*. – 2009. – Vol. 17, No. 5. – P. 3929–3940.

18. Белов В.В., Тарасенков М.В., Абрамочкин В.Н., Иванов В.В., Федосов А.В., Троицкий В.О., Шиянов Д.В. Атмосферные бистатистические каналы связи с рассеянием. Часть 1. Методы исследования // *Оптика атмосферы и океана*. – 2013. – Т. 26, № 04. – С. 261–267.

19. 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. 1535–1541.

20. Белов В.В., Тарасенков М.В. Три алгоритма статистического моделирования в задачах оптической связи на рассеянном излучении и бистатистического зондирования. // *Оптика атмосферы и океана*. – 2016. – Т. 29, № 05. – С. 397–403.

21. Chen G., Xu Z. Sadler B.M. Experimental demonstration of ultraviolet pulse broadening in short-range non-line-of-sight communication channels // *Optics Express*. – 2010. – Vol. 18, No. 10. P. 10500–10509.

22. Bifeng Li, Hongxing Wang, Min Liu, Hao Hu, Zhongyang Mao. Applicability of non-line-of-sight ultraviolet single-scatter approximation model // *Photon. Netw. Commun.* – 2016. – Vol. 31, No. 1. – P. 147–154.

23. Dahai Han, Xing Fan, Kai Zhang, and Rui Zhu. Research on multiple-scattering channel with Monte Carlo model in UV atmosphere communication // *Applied Optics*. – 2013. – Vol. 52, No. 22. – P. 5516–5522.

24. Hailiang Zhang, Hongwei Yin, Honghui Jia, Shengli Chang, and Juncai Yang. Characteristics of non-line-of-sight polarization ultraviolet communication channels // *Applied Optics*. – 2012. – Vol. 51, No. 35. – P. 8366–8372.

25. Dahai Han, Yile Liu, Kai Zhang, Pengfei Luo, and Min Zhang. Theoretical and experimental research on diversity reception technology in NLOS UV communication system // *Optics Express*. – 2012. – Vol. 20, No. 14. – P. 15833–15843.

26. Menglong Wu, Dahai Han, Xiang Zhang, Feng Zhang, Min Zhang, and Guangxin Yue. Experimental research and comparison of LDPC and RS channel coding in ultraviolet commu-

nication systems // Optics Express.– 2014. – Vol. 22, No. 5. – P. 5422–5430.

27. Petr Chvojka; Stanislav Vitek; Stanislav Zvanovec; Zabih Ghassemlooy; Sujan Rajbhandari. Analysis of nonline-of-sight visible light communications // Optical Engineering.– 2017. – Vol. 56, No. 11: 116116. doi.org/10.1117/1.OE.56.11.116116.

28. Gary A. Shaw†, Andrew M. Siegel, Melissa L. Nischan. Demonstration System and Applications for Compact Wireless Ultraviolet Communications // Proc. SPIE.– 2003. – Vol. 5071. doi.org/10.1117/12.500861.

29. Peng Song, Xianli Zhou, Fei Song, Caixia Su, and Anxiang Wang. Performance analysis of UV multiple-scatter communication system with height difference // Applied Optics.– 2017. – Vol. 56, No. 32. – P. 8908–8916.

30. Yin H., Chang S., Jia H., Yang J., and Yang J. Non-line-of-sight multiscatter propagation model // J. Opt. Soc. Am. A.– 2009. – Vol. 26, No. 11. – P. 2466–2469.

31. Debbie Kedar. Multiaccess Interference in a non-line-of-sight ultraviolet optical wireless sensor network // Applied Optics.– 2007. – Vol. 46, No. 23. – P. 5895–5901.

32. Hongwei Yin, Shengli Chang, Xiaofeng Wang, Jiankun Yang, Juncai Yang, and Jichun Tan. Non-line-of-sight multiscatter propagation model // J. Opt. Soc. Am. A.– 2009. – Vol. 26, No. 11. – P. 2466–2069.

33. Mohamed A. Elshimy and Steve Hranilovic. Non-line-of-sight single-scatter propagation model for noncoplanar geometries // J. Opt. Soc. Am. A.– 2011. – Vol. 28, No. 3. – P. 420–428.

34. Hongwei Yin, Honghui Jia, Hailiang Zhang, Xiaofeng Wang, Shengli Chang, and Juncai Yang. Vectorized polarization-sensitive model of non-line-of-sight multiple-scatter propagation // J. Opt. Soc. Am. A.– 2011. – Vol. 28, No. 10. – P. 2082–2085.

35. Houfei Xiao, Yong Zuo, Jian Wu, Yan Li, and Jintong Lin. Bit-error-rate performance of non-line-of-sight UV transmission with spatial diversity reception // Optics Letters.– 2012. – Vol. 37, No. 19. – P. 4143–4145.

36. Robert J. Drost, Terrence J. Moore, and Brian M. Sadler. Ultraviolet scattering propagation modeling: analysis of path loss versus range // J. Opt. Soc. Am. A.– 2013. – Vol. 30, No. 11. – P. 2259–2265.

37. Peng Wang and Zhengyuan Xu. Characteristics of ultraviolet scattering and turbulent channels // Optics Letters.– 2013. – Vol. 38, No. 15. – P. 2773–2775.

38. Houfei Xiao, Yong Zuo, Jian Wu, Yan Li, and Jintong Lin. Non-line-of-sight ultraviolet single-scatter propagation model in random turbulent medium // Optics Letters.– 2013. – Vol. 38, No. 17. – P. 3366–3369.

39. Siqi Hu; Le Mi; Tianhua Zhou; Weibiao Chen. Viterbi equalization for long-distance, high-speed underwater laser communi-

cation // Optical Engineering.– 2017. – Vol. 56, No. 7: 076101.

40. Hongwei Yin, Shengli Chang, Xiaofeng Wang, Jiankun Yang, Juncai Yang, and Jichun Tan. Analytical model of non-line-of-sight single-scatter propagation // JOSA A.– 2010. – Vol. 27, No. 7. – P. 1505–1509.

41. Кузнецов С., Огнев Б., Поляков С. Система оптической связи в водной среде // Первая миля.– 2014.– № 2. – С. 46–51.

42. Hanson F, Radic S. High bandwidth underwater optical communication // Appl. Opt.– 2008. – Vol. 47, No. 2. – P. 277–283.

43. Jaruwatanadilok S. Underwater Wireless Optical Communication Channel Modeling and Performance Evaluation using Vector Radiative Transfer Theory // IEEE Journal on Selected Areas in Communications.– 2008. – Vol.26, No. 9. – P. 1620–1627.

44. Hemani Kaushal, and Georges Kadoum. Underwater Optical Wireless Communication // IEEE Access.– 2016. – Vol. 4. – P. 1518–1547.

45. Majumdar A.K., Siegenthaler J, Land P. Analysis of Optical Communications through the Random Air-Water interface: feasibility for Under-Water Communications // Proc. of SPIE.– 2012. – Vol. 8517, 85170T. doi: 10.1117/12.928999.

46. Arnon S., and Kedar D. Non-line-of-sight underwater optical wireless Communication network // JOSA. A.– 2009. – Vol. 26, No. 3. – P. 530–539.

47. Gabriel C., Khalighi M-A., Bourenane S., Leon P., Rigaud V. Channel Modeling for Underwater Optical Communication / 2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps). 2nd International Workshop in Optical Wireless Communications.– 2011. – P. 833–837. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2011.6162571

48. Choudhary A., Jagadeesh V.K, Muthuchidambaranathan P. Pathloss analysis of NLOS Underwater Wireless Optical Communication channel / 2014, International Conference on Electronics and Communication System (ICECS –2014). DOI: 10.1109/ECS.2014.6892620.

49. Jagadeesh V.K, Choudhary A., Bui F.M., Muthuchidambaranathan P. Characterization of Channel Impulse Responses for NLOS Underwater Wireless Optical Communications / 2014, Fourth International Conference on Advances in Computing and Communications (ICACC). DOI: 10.1109/ICACC.2014.24.

50. Gabriel Ch, Khalighi M.-A., Bourenane S., Léon P., Rigaud V. Monte-Carlo-Based Channel Characterization for Underwater Optical Communication Systems // IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking.– 2013. – Vol. 5, No. 1. – P. 1–12

51. Shijian Tang, Yuhan Dong, Xuedan Zhang. On Path Loss of NLOS Underwater Wireless Optical Communication

Links // 2013 MTS/IEEE OCEANS. DOI: 10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6608002

52. 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.

53. Абрамочкин В.Н., Белов В.В., Гриднев Ю.В., Кудрявцев А.Н., Тарасенков М.В., Федосов А.В. Оптико-электронная связь в атмосфере на рассеянном лазерном излучении. Полевые эксперименты // Светотехника.– 2017.– № 4. – С. 24–30.

54. Тарасенков М.В., Познахарев Е.С., Белов В.В. Статистические оценки передаточных характеристик, предельных дальностей и скоростей передачи информации по импульсным атмосферным бистатическим оптическим каналам связи // Светотехника.– 2018.– № 4. – С. 37–43.

55. Belov V.V., Abramochkin V.N., Gridnev Yu. V., Kudryavtsev A.N., Tarasenkov M.V., Fedosov A.V. Bistatic optoelectronic communication systems: Field experiments in artificial and natural water reservoirs // Atmospheric and Oceanic Optics.– 2017. – Vol. 30, No. 4. – P. 366–371.

56. Белов В.В., Гриднев Ю.В., Кудрявцев А.Н., Тарасенков М.В., Федосов А.В. Оптико-электронная связь в УФ-диапазоне длин волн на рассеянном лазерном излучении // Оптика атмосферы и океана.– 2018. – Т. 31, № 07. – С. 559–562.

57. Белов В.В., Тарасенков М.В., Абрамочкин В.Н., Иванов В.В., Федосов А.В., Гриднев Ю.В., Троицкий В.О., Димаки В.А. Атмосферные бистатические каналы связи с рассеянием. Часть 2. Полевые эксперименты 2013 г. // Оптика атмосферы и океана.– 2014. – Т. 27, № 08. – С. 659–664.

58. Belov V.V. Optical communication on scattered laser radiation // Proc. SPIE.– 2017. – Vol. 10466. – CID:10466 OH. [10466–24].



Белов Владимир Васильевич, доктор физ.-мат. наук, профессор. Окончил в 1971 г. ТГУ. Зав. лабораторией РОС Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. Заслужен-

ный деятель науки РФ. 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