ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ БИСТАТИЧЕСКИХ ПОДВОДНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СВЯЗИ

Абрамова Евгения Сергеевна,
Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики
(СибГУТИ), г. Новосибирск, Россия, evgenka_252@mail.ru

DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-8-4-12

Мышкин Вячеслав Федорович,
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г.Томск, Россия, gos100@tpu.ru

Хан Валерий Алексеевич,
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Институт оптики атмосферы им. В.Е.Зуева СО РАН, г. Томск, Россия,
nt.centre@mail.ru

Баландин Сергей Флавинович,
Институт оптики атмосферы им. В.Е.Зуева СО РАН, г. Томск, Россия, bal@iao.ru

Еремеев Роман Семёнович,
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г.Томск, Россия, lrrom-1@bk.ru

Павлова Мария Сергеевна,
Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики
(СибГУТИ), г. Новосибирск, Россия, mspavlova@ngs.ru

Хорохорин Дмитрий Михайлович,
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г.Томск, Россия, mitek2407@mail.ru

Manuscript received 12 June 2020;
Accepted 17 August 2020

Ключевые слова: лазерный импульс, водоем, ослабление, уширение, телекоммуникация, мутность, нанопузырьки

Атмосферные и подводные оптические линии связи имеют много общего из-за переменных условий для передачи лазерного излучения по трассе линии связи, как во времени, так и в пространстве. Прохождение лазерного луча сквозь замутненную среду сопровождается уменьшением интенсивности излучения и увеличением интенсивности рассеянного потока, формирующего освещенность, интенсивность которого уменьшается при удалении от лазерного луча. Ослабление излучения, распространяющегося в природных водоемах, связано с наличием взвешенных нанопузырьков воздуха и дисперсных частиц, цветных растворенных веществ, флуктуации плотности молекул воды. Как правило, в масштабах расстояний, в которых излучение оптического диапазона затухает в десять и более раз, вода в природных системах является однородной. Проанализированы возможности атмосферных и подводных оптических систем связи (ПОС). Приводятся результаты моделирования бистатических ПОС в водоеме, содержащей частицы диаметром 0,8 мкм и концентрацией $2 \times 10^7 \text{ см}^{-3}$. Показано, что на параметры импульсов бистатических ПОС значительное влияние оказывают нанопузырьки в воде. В природных водоемах предпочтительнее использование систем с прямой видимостью. Показано, что наибольшим энергетическим потенциалом и минимальной межсимвольной интерференцией обладают бистатические ПОС, в которых рассеивающая область находится сбоку от приемного блока относительно линии передатчик – приемник. В природных водоемах возможно использование таких бистатических ПОС для связи с частотой менее 20 МГц на расстояниях не более 20 м. В качестве рассеивающей области в бистатических ПОС можно использовать дно водоема, поверхность воды или область воды с более высокой замутненностью, чем остальной водоем.

Информация об авторах:

Абрамова Евгения Сергеевна, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ), доцент кафедры радиотехнических устройств, доцент, к.т.н., г. Новосибирск, Россия

Мышкин Вячеслав Федорович, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, профессор инженерной школы ядерных технологий, профессор, д.ф.-м.н., г.Томск, Россия

Хан Валерий Алексеевич, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Институт оптики атмосферы им. В.Е.Зуева СО РАН, в.н.с. лаборатории оптической локации, профессор, д.т.н., г.Томск, Россия

Баландин Сергей Флавинович, Институт оптики атмосферы им. В.Е.Зуева СО РАН, с.н.с. лаборатории оптической локации, к.ф.-м.н., г.Томск, Россия

Еремеев Роман Семёнович, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, аспирант инженерной школы ядерных технологий, г.Томск, Россия

Павлова Мария Сергеевна, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ), ассистент кафедры радиотехнических устройств, г. Новосибирск, Россия

Хорохорин Дмитрий Михайлович, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, аспирант инженерной школы ядерных технологий, г.Томск, Россия

Для цитирования:

Абрамова Е.С., Мышкин В.Ф., Хан В.А., Баландин С.Ф., Еремеев Р.С., Павлова М.С., Хорохорин Д.М. Об использовании бистатических подводных оптических систем связи // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №8. С. 4-12.

For citation:

Abramova E.S., Myshkin V.F., Khan V.A., Balandin S.F., Ereemeev R.S., Pavlova M.S., Horohorin D.M. (2020) On the use of bistatic underwater optical communication systems. *T-Comm*, vol. 14, no.8, pp. 4-12. (in Russian)

Таким образом, в большинстве опубликованных работ, длина канала бистатической ПОС колеблется от нескольких метров до десятков метров [15]. Известны попытки уменьшения потерь мощности лазерного излучения при передаче его через аэрозоль [16].

3. Анализ распространения лазерного луча в бистатической ПОС

При распространении в замутненной водной среде, а также через атмосферный аэрозоль, оптическое излучение рассеивается на дисперсных частицах [17]. Средняя концентрация частиц в водоемах представлено в работе [18]. При этом различные водоемы могут существенно отличаться по прозрачности. Например, (в метрах) Панамский залив – 10, Балтийское море – 13, Баренцево море – 18, Черное море – 25, Бенгальский залив – 45, Саргассово море – 62 [19].

Рассеяние излучения на дисперсных частицах описывается индикатрисой рассеяния, которая характеризует вероятность рассеяния фотонов по разным угловым направлениям. Для полидисперсной взвеси индикатриса рассеяния $\sigma_{\Sigma}(\theta, \lambda)$ складывается из индикатрис рассеяния частиц всех размеров. Коэффициент рассеяния $k_s(\lambda)$ на дисперсных частицах в заданной точке внутри взвеси частиц может быть определен путем суммирования по формуле [20]

$$k_s(\lambda) = 2\pi \int_0^{\pi} \sigma_{\Sigma}(\theta, \lambda) \sin \alpha d\alpha, \quad (1)$$

где θ - угол между исходным лучом и направлением рассеяния лазерного излучения.

Дисперсные частицы обуславливают уменьшение мощности проходящего лазерного излучения

$$I(l) = I(0) \times \int_0^l \exp\{-k_e(l)l\} dl, \quad (2)$$

где $k_e(l)$ – коэффициент ослабления лазерного излучения, l – длина пути.

Прохождение лазерного луча сквозь замутненную среду сопровождается уменьшением интенсивности излучения и увеличением интенсивности рассеянного потока, формирующего освещенность, интенсивность которого уменьшается при удалении от лазерного луча. На рисунке 2 приведены графики распределения облученности в плоскости, удаленной от лазера на 20 м, для трех уровней прозрачности водной суспензии – «прозрачной», «средней» и «мутной», характеризуемой глубиной видимости диска Секки Z_D [21]. Следует отметить, что по индикатрисе рассеяния лазерного излучения можно определить размеры дисперсных частиц [22].

Изменение освещенности плоскости $I(l, r)$ в точке l по трассе распространения излучения и на расстоянии r от луча обусловлено: затуханием в результате рассеяния (k_s) и поглощения (k_a) вдоль пути dl с коэффициентом затухания $k = k_s + k_a$; приростом энергии за счет рассеянного, на углы θ , исходного лазерного излучения (пропорционального k_s) [23]

$$I(l_i, r) = \int_0^{l_i} I_s(l, \theta) dl + I_c(l_i, r), \quad (3)$$

где $I_s(l, \theta)$ – диффузная компонента лазерного излучения, определяемая рассеянием в одной из точек лазерной трассы; $I_c(l_i, r)$ – прошедший луч.

Рис. 2. Графики зависимости распределения нормированной облученности $E_n(r)$ на расстоянии 20 м для трех уровней прозрачности воды

Форма индикатрисы рассеяния определяется величиной параметра рассеяния, равной $\rho = \pi d^2 / \lambda$, где d – диаметр частицы, λ – длина волны излучения. При $\rho \approx 1$ индикатриса симметрична относительно направлений «вперед-назад». При увеличении ρ индикатриса рассеяния вытягивается вперед. Следует помнить, что рассеяние на угол 90° минимально при всех условиях. Поэтому бистатические ПОС, оптимизированные для взвешенных частиц одного гранулометрического состава могут потерять энергетический потенциал для других дисперсных частиц или другой геометрии установления «передатчик» – «приемник». Это хорошо иллюстрируется индикатрисами рассеяния излучения с круговой поляризацией и длиной волны $\lambda = 0,514$ мкм, приводимыми на рис. 3. Индикатрисы рассеяния для частиц размерами 0,1 (а), 0,5 (б) и 1,0 (с) мкм с комплексным показателем преломления $m = 1.6 - i 0,1$ в воде (показатель преломления среды $n = 1,33$) рассчитывали по программе, размещенной на сайте [24]. Приводимые на рис. 3 общие закономерности изменения формы индикатрисы сохраняются и для воздушной среды.

Рис. 3. Нормированные индикатрисы рассеяния от дисперсных частиц в воде: а - $\rho = 0.81$; б - $\rho = 4.06$; в - $\rho = 8.13$. а – в линейном масштабе, б, в – в логарифмическом масштабе

Как правило, объем, содержащий взвешенные частицы в воде или воздухе, не имеет резких очертаний.

Поэтому можно ожидать одновременного попадания в фотоприемник ПОС лучей, испытавших одно или более рассеяний (см. рис. 4,а) и прошедших по разным траекториям. На рисунке 4,а показаны две трассы бистатической ПОС, проходящих внутри замутненного участка, например, по его краю. Возможна также бистатическая ПОС с обратным рассеянием, в котором угол между осями передатчика и приемника менее 90° (см. рис. 4,б). Следует помнить, что по всей трассе ПОС будет наблюдаться значительный поток малоуг-

лового рассеяния (в диапазоне 0° - 30° , в которых сосредоточена преобладающая часть энергии рассеянного излучения [25]).

Из рис. 3 видно, что при $\rho < 0.8$ однократно отраженный сигнал изменяется незначительно для бистатической ПОС, оптические оси передатчика и приемника которых скрещиваются в диапазоне углов 60° - 180° . При $\rho = 4.06$ основная часть потока рассеянного излучения находится в диапазоне углов от 0° до 45° . Поэтому необходимо строить бистатическую ПОС с учетом гранулометрического состава и комплексного показателя преломления дисперсных частиц замутненной части водоема.

Рис. 4. Схема бистатической ПОС с рассеянием:
a – «вперед», b – «назад».

1 – передатчик; 2 – приемник; 3 – аэрозоль; 4 – рассеянный луч

Для анализа различных схем бистатических ПОС и моделирования величины лазерного потока на входе в фотоприемник рассмотрим уравнения распространения лазерного излучения через гетерогенные системы. Если приемник ПОС регистрирует рассеянное излучение с ограниченного участка луча лазера, то уравнение распространения однократно рассеянного излучения может быть записано в виде трех множителей. Первый член определяет ослабление излучения до области рассеяния. Второй множитель определяет величину рассеянного потока. Третий член определяет ослабление рассеянного излучения на аэрозоле. Без учета лучей, рассеянных на близкие углы

$$I_1(\alpha) = I_0 \times \int_0^{l_1} \exp(-k_e(l)l) dl \times k_s(\theta) N V \times \int_{l_1}^{l_2} \exp(-k_e(l)l) dl, \quad (4)$$

$$k_e(l) = \int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} \sigma_e(\rho, l) f(\rho, l) d\rho, \quad (5)$$

$$k_s(\theta) = \int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} \sigma_s(\rho, \theta) f(\rho, l_1) d\rho, \quad (6)$$

где θ – угол рассеяния; l_1, l_2 – расстояния передатчик – рассеивающий объем и рассеивающий объем – приемник; $\sigma_e(\rho, l)$ – сечение ослабления излучения частицей с параметром рассеяния ρ ; $f(\rho, l)$ – функция распределения дисперсной системы по размерам в разных точках трассы распространения излучения, N – концентрация дисперсных частиц, V – объем водоема, из которого регистрируется поток рассеянного излучения.

Уравнение, учитывающее многократное рассеяние излучения от передатчика до приемника ПОС через пространственно ограниченное облако взвешенных частиц, может быть записано в виде

$$I_n(\theta) = I_0 \times \int_0^{l_1} \exp(-k_e l) dl \times \left[\sum_{i=2}^{i=n} \left[k_s(\theta_i) N_i \times \int_{l_{i-1}}^{l_i} \exp(-k_e l) dl \right] \right]. \quad (7)$$

Если рассматривать только параллельные лучи, рассеянные на некоторый угол, то расстояние от излучателя и приемника до границы облака дисперсных частиц не оказывают принципиального значения. На практике чем меньший путь проходит передаваемое излучение по аэрозолю и рассеянный поток от аэрозоля до приемника, тем выше сигнал. Это связано с тем, что в формировании сигнала участвуют расходящиеся лучи, рассеянные в некотором диапазоне углов. Поэтому чем меньше длина указанных трасс, тем шире диапазон углов рассеянных потоков, попадающих в фотоприемник.

4. Оценка возможности подводной бистатической системы в природных водах

Подводные бистатические системы находятся, как правило, в сплошной однородной рассеивающей среде. Математическая модель распространения излучения представляет собой решение уравнения переноса оптического излучения в малоугловом приближении с учетом принятой модели для описания первичных оптических параметров воды. Для описания процесса распространения излучения в морской воде справедливо уравнение переноса оптического излучения в рассеивающих средах [26]. Уравнение переноса описывает изменение яркости вдоль луча, распространяющегося в направлении вектора $\vec{n}$. Уравнение связывает изменение яркости в направлении $\vec{n}$ с убыванием энергии в результате рассеяния и поглощения, а также с приростом энергии в направлении $\vec{n}$ из-за рассеяния с направлений $\vec{m}$.

Оценим коэффициент ослабления и эффективное сечение рассеяния излучения длиной волны $\lambda = 514$ нм на дисперсных частицах с комплексным показателем преломления $m = 1.6 - i 0,1$ и концентрацией 10^7 част/см³, находящихся в водоеме (показатель преломления $n = 1,33$). Результаты расчетов для монодисперсной взвеси приведены в таблице 1.

Индикатриса рассеяния излучения 514 нм, в полярных координатах в линейном масштабе, на частицах диаметром 0,1 мкм ($m = 1.6 - i 0,1$; $n = 1,33$) приводилась ранее на рис. 3, а. Основная часть энергии потока рассеянного излучения находится в направлении «вперед». Если значение коэффициента эффективности рассеяния в направлении угла 0° принять за 1,0, то в направлении 30° величина интенсивности рассеянного излучения равна 0.84572 (0.54782 в направлении 60°).

Таблица 1

Параметры взаимодействия лазерного излучения с водной взвесью, содержащей дисперсные частицы разных размеров

Диаметр частиц взвеси, мкм	0,01	0,05	0,1	0,4	1,0
Эффект. сечение рассеяния, мкм ²	$1.75 \cdot 10^{-10}$	$2.64 \cdot 10^{-6}$	$1.46 \cdot 10^{-4}$	0.0776	1.2646
Коэффициент ослабления, м ⁻¹	$1.17 \cdot 10^{-5}$	$1.53 \cdot 10^3$	$1.42 \cdot 10^{-2}$	1.544	20.542

В однородно рассеивающей среде на фотоприемник одновременно могут попадать множество лучей: испытавших разное количество актов рассеяния на один и тот же угол (многогранники, вписанные в круг), лучи со случайной траекторией, отличающихся углами рассеяния и длинами прямолинейных участков между точками рассеяния. Как правило, интенсивность потока однократного рассеяния меньше интенсивности исходного луча не менее 10 раз. Поэтому интенсивность луча, испытывающего частые рассеяния быстро уменьшается. Очевидно, что в плоскости фотоприемника, для природных водных суспензий, можно учитывать лишь лучи, испытавшие 1-2 рассеяний.

Так как интенсивность рассеяния «вперед-назад» от частиц, образующих стабильную суспензию, менее 3 (см. индикатрису на рис. 3,а), то в формировании сигнала фотоприемника вносят вклад лучи, рассеянные во всех направлениях. При этом параллельные на плоскости фотоприемника лучи, формирующиеся после одного или более рассеяний, невозможно разделить с помощью оптической системы. Однако, расстояния по трассам распространения этих лучей различны. Поэтому на плоскости фотоприемника будет наблюдаться увеличение длительности передаваемых импульсов лазерного излучения.

Как правило, в масштабах расстояний, в которых излучение оптического диапазона затухает на несколько порядков, вода в природных системах является однородной. Анализ показывает, что вода в природных водоемах является светоослабляющей средой как за счет ослабления на дисперсных частицах, так и за счет рассеяния на нанопузырьках, о причинах появления которых обсуждается в работе [27]. Поэтому интенсивности как прямого и рассеянного потоков излучения быстро затухают при распространении в водоемах. Следует учитывать, что нанопузырьки также являются рассеивающими объектами. Такая сплошная рассеивающая среда может приводить к увеличению межсимвольной интерференции при передаче цифровой информации за счет уширения импульсов.

Оценим мощности излучений, достигающих до приемного узла бистатической ПОС. Интенсивность лазерного излучения, проходящего, через пространственно однородную монодисперсную взвесь, на фотоприемник за счет однократного рассеяния можно определить из уравнения (4). Такой вариант может быть реализован за счет формирования объективом изображения части трассы на входе фотоприемника. Для пространственной однородной взвеси уравнение (4) примет вид

$$I_2(\theta) = I_0 \times \pi^2 \Delta l N \sigma_s(\theta) \times \exp(-k(l_1 + l_2)), \quad (8)$$

где k – коэффициент ослабления, N – концентрация взвешенных частиц, Δl – длина трассы, видимая фотоприемником, r – радиус лазерного луча, $\sigma_s(\theta)$ – сечение рассеяния в направлении угла θ , l_1 и l_2 – расстояния «источник-рассеивающий объем», «рассеивающий объем-фотоприемник».

Если трасса оптического излучения неоднородна, то уравнение распространения излучения имеет вид

$$I(\theta) = I_0 \pi^2 \Delta l_v \times \int_0^{l_2} N(l) \sigma_s^2(\theta, l) \exp(-k_e^1(l)) dl. \quad (9)$$

Обозначим расстояние между излучателем и приемником L (базовое расстояние). Будем считать, что точка рассеяния находится на линии, пересекающей посередине отрезок между передатчиком и приемником. Расстояние от точки рассеяния до линии «передатчик – приемник» обозначим h . Анализ геометрии рассеяния в бистатической ПОС показывает, что при $h > 0.5L$ рассеяние происходит в направлении назад, в которой угловая зависимость рассеянного излучения значительно меньше, чем в направлении вперед. При $h < 0.5L$ рассеяние происходит в направлении вперед (см. рис. 5). Также следует учитывать, что в ПОС значительна величина ослабления на трассе распространения излучения. Поэтому в уменьшение энергозапаса бистатической ПОС значительный вклад вносит длина суммарной трассы, которая должна быть минимальной.

Рис. 5. Различные возможные траектории сигнального пучка в бистатической ПОС. Область рассеяния находится: 1 – сбоку; 2 – за передатчиком; 3 – за приемником

Оценим потери мощности на трассе и при однократном рассеянии на «стенке» из взвешенных частиц со средним диаметром 0,8 мкм, концентрацией $2 \cdot 10^7$ част/см³ и комплексным показателем преломления материала частиц $m = 1.6 - i 0.1$ (коэффициент ослабления взвеси частиц $k_1 = 23.9$ м⁻¹, сечение обратного рассеяния $\sigma_1(\pi) = 0.005053$ мкм², эффективное сечение рассеяния $\sigma_1 = 0.73241$ мкм²) (см. рис. 5). Используемое значение показателя преломления взята для оценочных расчетов и не отражает разнообразия оптических свойств дисперсной фазы природных водных систем.

Считаем, что «стенка» находится в однородной среде, содержащей частицы размером 0,2 мкм и концентрацией $2 \cdot 10^6$ част/см³ ($k_2 = 2.99 \cdot 10^{-2}$ м⁻¹, $\sigma_1(\pi) = 0.0006949$ мкм², $\sigma_1 = 0.0045277$ мкм²).

Если передатчик ПОС излучает 1,26 мВт (1 dBm), а предельная чувствительность приемника составляет 0,01 мВт (-19 dBm) (оптический бюджет ПОС равен 20 dBm), то возможен уверенный прием по прямой на расстоянии $L = k_2^{-1} \ln(I_0 / I) = 161.7$ м в водоеме с равномерным распределением дисперсных частиц размером 0,2 мкм и концентрацией $2 \cdot 10^6$ см⁻³. Оценка проводилась с помощью программы, приведенной в [24]. Приведенные результаты расчетов не учитывают рассеяние лазерного излучения на нанопузырьках. Поэтому в природных водоемах ослабление излучения больше, а дальность связи меньше. По оценкам работы [27] в водной системе с содержанием соли 0,02 моль/л возможно существование стабильных во времени воздушных пузырьков диаметром 0,1 мкм и концентрацией 10^{10} см⁻³. Размер и концентрация нанопузырьков газа определяются соленностью воды.

Расчетный коэффициент дополнительного ослабления излучения на нанопузырьках составляет $0,89 \text{ м}^{-1}$. Поэтому в чистой воде именно рассеяние на нанопузырьках, с индикатрисой рассеяния, симметричной относительно направлений «вперед-назад», определяет ослабление проходящего излучения. При этом формируется высокий уровень рассеянного на нанопузырьках излучения, которое оказывает значительное влияние на уширение импульсов бистатистических ПОС.

Так как рассматриваем однородную среду, то уравнение (9) можно преобразовать, с учетом поля зрения фотоприемника α и принятой геометрии ПОС. Получаем расчетное соотношение

$$I(l): I_0 \approx \exp \left[-2k_1 \sqrt{h^2 + 0.25L^2} \right] \times \times \sigma_2(\theta) N_2 \sin \alpha \sqrt{h^2 + 0.25L^2} \pi r^2 \quad (10)$$

Из соотношения (10) оценим зависимость мощности прошедшего лазерного излучения ПОС от величины h . Зададим диаметр лазерного луча 2 см, поле зрения приемной системы - $\alpha=2^\circ$, $L=20 \text{ м}$, $\lambda=0,514 \text{ мкм}$. Примем использованную ранее модель водоёма: $N_2=2 \cdot 10^6 \text{ част/см}^3$ диаметром 0,2 мкм; $N_1=2 \cdot 10^7 \text{ част/см}^3$ диаметром 0,8 мкм. Параметры ПОС, в которой рассеяние происходит между передатчиком и приемником, а также величины искажения импульсов приведены в табл. 2.

По данным таблицы 2 построен график, приведенный на рис. 6. График наглядно показывает, что при изменении угла рассеяния с $15,42^\circ$ ($h=1 \text{ м}$) до 90° ($h=10 \text{ м}$) потери энергии возрастают до 10^3 раз. При этом длина трассы возрастает с 20,1 м лишь до 28,28 м. В то же время, при изменении h с 10 м до 40 м ослабление сигнала изменяется незначительно. Флуктуация потерь энергии при изменении h связана с немонотонным изменением индикатрисы рассеяния по углам.

Чем больше расстояние от точки рассеяния до приемника, тем больше уширение передаваемых импульсов из-за увеличения длины рассеивающего участка, видимая фотоприемником ПОС. В рассмотренной схеме ПОС ширина регистрируемых импульсов увеличивается прямо пропорциональна h , из-за увеличения поля зрения фотоприемника. Также следует учитывать, что в действительности фотоприемник регистрирует пучок расходящихся лучей, рассеянных в некотором диапазоне углов. Поэтому чем больше расстояние «точка рассеяния – приемник», тем меньше диапазон углов, а интенсивность рассеянного в некотором диапазоне углов излучения обратно пропорциональна квадрату этого расстояния.

Рис. 6. Зависимость сигнала приемника от расстояния базовая линия ПОС – область рассеяния

На рисунке 5 показаны ещё две возможные схемы бистатистических ПОС, в которых плоскость отражения находится позади излучателя или позади приемника. Однако, независимо от того находится ли точка рассеяния «за передатчиком» или «за приемником», рассеяние направлено на «большие» углы. Для частиц, размеры которых больше длины волны используемого излучения, в диапазоне углов 100° – 180° интенсивность рассеянного излучения на три порядка меньше, чем в диапазоне углов 0° – 15° .

Для сопоставления величин ослабления передаваемого излучения в трех схемах бистатистической ПОС зададим расстояние $L=20 \text{ м}$, $h=8 \text{ м}$. Используем ранее использованную модель водоёма.

В схемах 2 и 3 на рис. 5 угол рассеяния определяется смещением l , относительно передатчика (приемника), проекции на базовую линию точки, в которой происходит рассеяние. Ослабление лазерного излучения на оптической трассе, для рассматриваемой геометрии ПОС, можно описать выражением

$$I(l): I_0 \approx \exp \left[-k_1 \left(\sqrt{h^2 + l^2} + \sqrt{h^2 + (L+l)^2} \right) \right] \times \times \sigma_2(\theta) N_2 \sin \alpha \sqrt{h^2 + (L+l)^2} \pi r^2 \quad (11)$$

Данные расчетов величины оптического потока на входе в фотоприемник бистатистической ПОС геометрии рассеяния 2 и 3, приведенной рис. 3, а также величины уширений передаваемых импульсов приведены в табл. 3. Случай, когда рассеивающая область находится за приемником, симметричен предыдущей схеме по ослаблению передаваемых сигналов. При этом уширение передаваемых импульсов минимально.

По данным таблицы 3 построен график, приведенный на рис. 7.

Таблица 2

Параметры ПОС и искажения импульсов в водоеме

$h, \text{ м}$	1	2	4	6	8	10	15	20	2	30	40
$\theta, ^\circ$	11,42	22,62	43,60	61,93	77,32	90	112,62	126,87	136,4	143,13	151,93
$\sigma(\theta) \times 10^{18} \text{ м}^2$	$2,2 \cdot 10^4$	5140	420	21,9	59,2	12,2	17,4	5,23	3,83	7,32	10,4
$lg I(\theta)/I_0$	4,04	3,41	2,32	1,04	1,47	0,78	0,94	0,42	0,28	0,56	0,72
$I(\theta)$ учет расход.	148	121	74	28	33,2	14,5	10,7	3,08	1,44	2,08	1,56
уширен., нс	30,5	30,9	32,6	35,3	38,8	42,8	54,6	67,8	81,6	95,8	125

Бистатистическая ПОС с рассеянием на углы более 90°

рассеивающая область за передатчиком										
$l, \text{м}$	0	0,5	1	1,5	2	4	6	8	10	12,5
$\theta, ^\circ$	111,8	114,9	117,9	121,0	124,02	135	143,97	150,94	156,27	161,2
$\sigma(\theta) \times 10^{18} \text{ м}^2$	17,8	16,03	13,2	10,4	7,67	3,83	8,01	10,4	10,4	9,06
$\lg I(\theta)/I_0$	1,16	1,112	1,029	0,926	0,79	0,5	0,81	0,93	0,93	0,8642
$I(\theta)$ учет расход.	9,22	8,49	7,537	6,51	5,3429	2,88	4,05	4,04	3,55	2,85
уширен., нс	65,3	66,7	68,1	69,5	70,9	76,7	82,4	88,3	94,1	101,4

рассеивающая область за приемником										
$l, \text{м}$	0	0,5	1	1,5	2	4	6	8	10	12,5
$\lg I(\theta)/I_0$	0,73	0,68	0,59	0,48	0,35	$4,76 \cdot 10^{-2}$	0,38	0,51	0,51	0,46
$I(\theta)$ учет расход.	42,0	38,9	33,5	27	18,9	2,20	14,0	14,6	11,6	7,7
уширен., нс	24,24	24,3	24,4	24,6	24,99	27,1	30,3	34,3	38,8	44,98

Графики на рис. 6 и 7 показывают сигнал бистатистической ПОС в относительных единицах, с учетом регистрации рассеянных лучей в некотором диапазоне углов, определяемым расстоянием до рассеивающего объема и размера входной диафрагмы фотоприемника ПОС. Провал графика ослабления в области 135° связан с локальным уменьшением эффективного сечения рассеяния в указанном направлении. Сравнение расчетных данных показывает, что в схеме 3 (рассеивающая область находится сбоку от приемника ПОС) наблюдаются меньшие ослабления и уширение передаваемых оптических импульсов.

Исходя из минимального уширения передаваемых импульсов 25 нс можно считать, что предельная скорость передачи на расстояние 20 в водоеме не превышает 20 МГц. Наличие нанопузырьков и взвешенных частиц во всем водоеме приводит к тому, что на фотоприемник одновременно попадают потоки излучения, рассеянные по всей трассе. Поэтому уширение передаваемых оптических импульсов больше, чем приведено в таблицах. Также увеличивается величина постоянной составляющей и уменьшается доля переменной составляющей регистрируемого потока излучения.

Рис. 7. Зависимость сигнала приемника от расстояния от области рассеяния до передатчика (1) и после приемника (2)

При использовании в качестве отражающих поверхностей дна или поверхности водоема можно увеличить длину трассы подводной оптической связи. Однако расстояние между излучателем и приемником для такой ПОС будет меньше, чем для ПОС с прямой видимостью с таким же энергетическим запасом.

Выводы

В природных водоемах предпочтительнее использование ПОС с прямой видимостью, обеспечивающей для любой мутности воды наибольшую дальность связи.

Рассеяние и поглощение лазерного излучения на взвешенных частицах и нанопузырьках газа в воде значительно ограничивают возможности использования бистатистической ПОС либо по интенсивности оптических импульсов (длина связи), либо из-за межсимвольной интерференции (ограничение скорости передачи информации). В пресной воде могут существовать нанопузырьки, расчетный коэффициент ослабления излучения которыми составляет $0,89 \text{ м}^{-1}$.

Ослабление излучения на нанопузырьках воздуха в воде обусловлено рассеянием, что приводит к уширению импульсов ПОС не менее чем 0,07 нс/м.

В природных водоемах возможно использование бистатистических ПОС для связи с частотой менее 20 МГц на расстояниях не более 20 м.

В качестве рассеивающей области в бистатистических ПОС можно использовать дно водоема, поверхность воды или область воды с более высокой замутненностью, чем остальной водоем.

Литература

1. Белов В.В., Тарасенков М.В., Абрамочкин В.Н. и др. Атмосферные бистатистические каналы связи с рассеянием. Часть 1. Методы исследования // Оптика атмосферы и океана, 2013. Т. 26. № 4. С. 261-267.
2. Пожидаев В.Н. // Радиотехника и электроника. 1977. Т. 22. № 10. С. 2190-2192.
3. Белов В.В., Тарасенков М.В., Абрамочкин В.Н. и др. Атмосферные бистатистические каналы связи с рассеянием. Часть 2. Полевые эксперименты 2013 года // Оптика атмосферы и океана, 2014. Т. 27. № 08. С. 659-664.
4. Тарасенков М.В., Белов В.В., Познахарев Е.С. Моделирование процесса передачи информации по атмосферным каналам распространения рассеянного лазерного излучения // Оптика атмосферы и океана, 2017. Т. 30. №05. С. 371-376.
5. Белов В.В. Оптическая связь на рассеянном или отраженном лазерном излучении // Светотехника, 2018. № 6. С. 6-12.
6. Кузнецов С., Огнев Б., Поляков С. Система оптической связи в водной среде // Первая мила. 2014. №2 (41). С. 46-51.
7. Yi X., Li Z., and Liu Z. Underwater optical communication performance for laser beam propagation through weak oceanic turbulence // Appl. Opt., 2015. Vol. 54, № 6, pp. 1273-1278.

8. *Snow J.B. et al.* Underwater propagation of high-data-rate laser communications pulses. *Proc. SPIE*, Dec.1992. Vol. 1750, pp. 419-427.
9. *Giles J.W. and Bankman I.N.* Underwater optical communications systems. Part 2: Basic design considerations / in *Proc. IEEE Military Commun. Conf.*, 2005. Vol. 3, pp. 1700-1705.
10. *Vasilescu I., Kotay K., Rus D. et al.* Data collection, storage, and retrieval with an underwater sensor network / in *Proc. 3rd Int. Conf. Embedded Netw. Sensor Syst.*, 2005, pp. 154-165.
11. *Fair N. et al.*, Optical modem technology for seafloor observatories / in *Proc. IEEE OCEANS*, Boston, MA, USA, Sep. 2006, pp. 1-6.
12. *Simpson J.A., Cox W.C., Krier B. et al.* 5 Mbps optical wireless communication with error correction coding for underwater sensor nodes / in *Proc. IEEE OCEANS*, Seattle, WA, USA, Sep. 2010, pp. 1-4.
13. *Hanson F. and Radic S.* High bandwidth underwater optical communication // *Appl. Opt.*, 2008. Vol. 47. № 2, pp. 277-283.
14. *Белов В.В., Абрамочкин В.Н., Гриднев Ю.В. и др.* Бистатическая подводная оптико-электронная связь. Полевые эксперименты в 2017-2018 гг. // *Светотехника*, 2019. №2. С. 67-70.
15. *Kaushal, Hemani & Kaddoum, Georges.* Underwater Optical Wireless Communication // *IEEE Access*, 2016. 4. 1518-1547. Doi: 10.1109/ACCESS.2016.2552538.
16. *Myshkin, V.F., Vlasov, V.A., Khan, V.A., Lenskii, V.N.* Transmission of multiwave laser radiation to the investigated volume through dense aerosol layers // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2011. Vol. 52. №4. С. 517-521.
17. *Myshkin, V.F., Khan, V.A., Tichy, M. et al* Registration of a laser beam scattered from an aerosol located in the probe beam aperture // *AIP Conference Proceedings*, 2019, 2101, 020022
18. *Чечко В.А., Чубаренко Б.В., Курченко В.Ю.* О натуральных исследованиях взвешенного вещества, образующегося в судоходном канале под воздействием движущихся судов // *Водные ресурсы*, 2011. Т. 38, № 3. С. 297-305.
19. *Шифрин К.С.* Введение в оптику океана. СПб.: Гидрометеоиздат, 1983. 281 с.
20. *Доронин Ю.П.* Физика океана. СПб.: Гидрометеоиздат, 1978. 296 с.
21. *Костылёв Н.М., Колочкин В.Я., Степанов Р.О.* Математическая модель распространения лазерного излучения в морской воде // *Оптика и спектроскопия*, 2019. Т. 127. Вып. 4. С. 558-562.
22. *Dudorov, V.V., Myshkin, V.F., Khan, V.A. et al.* Reduction of data processing error of heterogeneous system laser sensing // *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2018, 10833, 108332Z.
23. *Ильин А.П., Митушкин В.М., Назаренко О.Б., Смирнова В.В.* Разработка новых методов очистки воды от растворимых примесей тяжелых металлов // *Известия Томского политехнического университета*, 2010. Т. 317. № 3. С. 40-44.
24. *Mie Scattering Calculator.* [Электронный ресурс]. URL: http://omlc.org/calc/mie_calc.html (дата обращения: 05.02.2020).
25. *Абрамова Е.С., Мышкин В.Ф., Павлова М.С., Абрамов С.С., Павлов И.И.* Развитие бистатической связи в России // *Электро-связь*, 2019. № 10. С. 36-40.
26. *Карасик В.Е., Орлов В.М.* Локационные лазерные системы видения. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 479 с.
27. *Бункин Н.Ф., Бункин Ф.В.* Бабстонная структура воды и водных растворов электролитов // *Успехи физических наук*, 2016. Т. 186. № 9. С. 933-952.

ON THE USE OF BISTATIC UNDERWATER OPTICAL COMMUNICATION SYSTEMS

Evgenia S. Abramova, Siberian state University of telecommunications and Informatics, Novosibirsk, Russia, evgenka_252@mail.ru

Vyacheslav F. Myshkin, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, gos100@tpu.ru

Valery A. Khan, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS; Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, nt.centre@mail.ru

Sergey F. Balandin, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia, bal@iao.ru

Roman S. Eremeev, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, lrrom-1@bk.ru

Maria S. Pavlova, Siberian state University of telecommunications and Informatics, Novosibirsk, Russia, mspavlova@ngs.ru

Dmitry M. Horohorin, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, mitok2407@mail.ru

Abstract

Atmospheric and underwater optical communication lines have much in common due to variable conditions for the transmission of laser radiation along the path of the communication line, both in time and in space. The passage of a laser beam through a cloudy medium is accompanied by a decrease in the radiation intensity and an increase in the intensity of the scattered flux, which forms illumination, the intensity of which decreases with distance from the laser beam. As a rule, at the scales of distances at which the radiation of the optical range decays by several orders of magnitude, water in natural systems is homogeneous. The analysis shows that water in natural reservoirs is a light-attenuating medium both due to attenuation on dispersed particles and due to scattering on nanobubbles. The article analyzes the capabilities of atmospheric and underwater optical communication systems (POS). The results of modeling bistatic PIC in a reservoir containing particles with a diameter of $0.8 \text{ }\mu\text{m}$ and a concentration of $2 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$ are presented. It was shown that the parameters of the bistatic PIC pulses are significantly affected by nanobubbles in water. In natural reservoirs, the use of systems with direct line of sight is preferable. It has been shown that bistatic PICs, in which the scattering region is located on the side of the receiver unit relative to the transmitter - receiver line, have the greatest energy potential and minimal intersymbol interference. In natural reservoirs, it is possible to use such bistatic PICs for communication with a frequency of less than 20 MHz at distances of not more than 20 m. As a scattering region in bistatic PIC, you can use the bottom of the reservoir, the surface of the water or the region of water with a higher turbidity than the rest of the reservoir.

Keywords: laser pulse, water body, attenuation, broadening, telecommunication, turbidity, nanobubbles..

References

1. Belov V.V., Tarasenkova M.V., Abramochkin V.N. et al. (2013). Atmospheric bistatic communication channels with scattering. Part 1. Research methods. *Optics of the atmosphere and ocean*. Vol. 26. No. 4. P. 261-267.
2. Pozhidaev V.N. (1977). *Radio engineering and electronics*. Vol. 22. No. 10. P. 2190-2192.
3. Belov V.V., Tarasenkova M.V., Abramochkin V.N. et al. (2014). Atmospheric bistatic communication channels with scattering. Part 2. Field experiments of 2013. *Optics of the atmosphere and ocean*. Vol. 27. No. 08. P. 659-664.
4. Tarasenkova M.V., Belov V.V., Poznakharev E.S. (2017). Modeling the process of transmitting information through atmospheric channels for the propagation of scattered laser radiation. *Optics of the atmosphere and ocean*. Vol.30. No. 05. P. 371-376.
5. Belov V.V. (2018). Optical communication on scattered or reflected laser radiation. *Lighting Engineering*. No. 6. P. 6-12.
6. Yi X., Li Z., and Liu Z. (2015). Underwater optical communication performance for laser beam propagation through weak oceanic turbulence. *Appl. Opt.* Vol. 54. No. 6. P. 1273-1278.
7. Kuznetsov S., Ognev B., Polyakov S. (2014). Optical communication system in the aquatic environment. *The First Mile*. No. 2 (41). P. 46-51.
8. Snow J.B. et al. (1992). Underwater propagation of high-data-rate laser communications pulses. *Proc. SPIE*, Dec.1992. Vol. 1750. P. 419-427.
9. Giles J.W. and Bankman I.N. (2005). Underwater optical communications systems. Part 2: Basic design considerations. *Proc. IEEE Military Commun. Conf.* Vol. 3. P. 1700-1705.
10. Vasilescu I., Kotay K., Rus D. et al. (2005). Data collection, storage, and retrieval with an underwater sensor network. *Proc. 3rd Int. Conf. Embedded Netw. Sensor Syst.* P. 154-165.
11. Fair N. et al. (2006). Optical modem technology for seafloor observatories. *Proc. IEEE OCEANS*, Boston, MA, USA, Sep. 2006. P. 1-6.
12. Simpson J.A., Cox W.C., Krier B. et al. (2010). 5 Mbps optical wireless communication with error correction coding for underwater sensor nodes. *Proc. IEEE OCEANS*, Seattle, WA, USA, Sep. 2010. P. 1-4.
13. Hanson F. and Radic S. (2008). High bandwidth underwater optical communication. *Appl. Opt.* Vol. 47. No. 2. P. 277-283.
14. Belov V.V., Abramochkin V.N., Gridnev Yu.V. and others. (2019). Bistatic underwater optoelectronic communication. Field experiments in 2017-2018. *Lighting engineering*. No. 2. P. 67-70.
15. Kaushal, Hemani & Kaddoum, Georges. (2016). Underwater Optical Wireless Communication. *IEEE Access*, 4. 1518-1547. Doi: 10.1109/ACCESS.2016.2552538.
16. Myshkin V.F., Vlasov V.A., Khan V.A., Lenskii V.N. (2011). Transmission of multiwave laser radiation to the investigated volume through dense aerosol layers. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. Vol. 52. No.4. P. 517-521.
17. Myshkin V.F., Khan V.A., Tichy M. et al. (2019). Registration of a laser beam scattered from an aerosol located in the probe beam aperture. *AIP Conference Proceedings*, 2101, 020022.
18. Chechko V.A., Chubarenko B.V., Kurchenko V.Yu. (2011). On full-scale studies of suspended matter formed in the shipping channel under the influence of moving vessels. *Water Resources*. Vol. 38. No. 3. P. 297-305.
19. Shifrin K.S. (1983). Introduction to Ocean Optics. SPb.: Gidrometeoizdat. 281 p.
20. Doronin Yu.P. (1978). Physics of the ocean. SPb.: Gidrometeoizdat. 296 p.
21. Kostylev N.M., Kolyuchkin V.Ya., Stepanov R.O. (2019). A mathematical model for the propagation of laser radiation in sea water. *Optics and Spectroscopy*. Vol. 127. Issue. 4. P. 558-562.
22. Dudorov V.V., Myshkin V.F., Khan V.A. et al. (2018). Reduction of data processing error of heterogeneous system laser sensing. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 10833, 108332Z.
23. Ilyin A.P., Milushkin V.M., Nazarenko O.B., Smirnova V.V. (2010). Development of new methods of water purification from soluble impurities of heavy metals. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. Vol. 317. No. 3. P. 40-44.
24. Mie Scattering Calculator. [Electronic resource]. URL: http://omlc.org/calc/mie_calc.html (date of access: 05.02.2020).
25. Abramova E.S., Myshkin V.F., Pavlova M.S., Abramov S.S., Pavlov I.I. (2019). The development of bistatic communications in Russia. *Elektrosvyaz*. No. 10. P. 36-40.
26. Karasik V.E., Orlov V.M. (2013). Locational laser vision systems. Moscow: MSTU im. N.E. Bauman. 479 p.
27. Bunkin N.F., Bunkin F.V. (2016). Babston structure of water and aqueous solutions of electrolytes. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. Vol. 186. No. 9. P. 933-952.

Information about authors:

Evgenia S. Abramova, Siberian state University of telecommunications and Informatics, associate Professor of Department of radio engineering devices, Associate Professor, Candidate of technical sciences, Novosibirsk, Russia

Vyacheslav F. Myshkin, Professor Division for Nuclear-Fuel Cycle Tomsk Polytechnic University, Professor, Doktor of physico-mathematical sciences, Tomsk, Russia

Valery A. Khan, Laboratory of Optical Location V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS; Division for Nuclear-Fuel Cycle Tomsk Polytechnic University, Leading researcher optical location laboratory, Professor, Doktor of technical sciences, Tomsk, Russia

Sergey F. Balandin, Laboratory of Optical Location V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Senior researcher optical location laboratory, Candidate of physico-mathematical sciences, Tomsk, Russia

Roman S. Ereemeev, Division for Nuclear-Fuel Cycle Tomsk Polytechnic University, Post-graduate student Division for Nuclear-Fuel Cycle, Tomsk, Russia

Maria S. Pavlova, Siberian state University of telecommunications and Informatics, assistant of Department of radio engineering devices, Novosibirsk, Russia

Dmitry M. Horohorin, Division for Nuclear-Fuel Cycle Tomsk Polytechnic University, Post-graduate student Division for Nuclear-Fuel Cycle, Tomsk, Russia