

## АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 621.391.63; 535.361; 621.373.826

# Некомпланарные коммуникационные бистатистические системы связи. Полевые и лабораторные эксперименты

В.В. Белов, Е.С. Познахарев, М.В. Тарасенков, А.В. Федосов\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 28.06.2021 г.

Рассматриваются результаты полевых и лабораторных экспериментов по оптической связи на рассеянном излучении под водой и в воздушной модельной среде. Эксперименты впервые выполнены при некомпланарных схемах связи первого (когда в информационном сигнале присутствует однократно рассеянное излучение) и второго типов (когда это излучение отсутствует). Подтверждена возможность осуществления связи с источником под водой через лед. Показано, что переход от компланарной к некомпланарной схеме связи при изменении углов, определяющих взаимную ориентацию оптических осей излучателя и приемника, может приводить к нелинейному изменению ошибок связи. Предложено объяснение этой зависимости.

*Ключевые слова:* оптическая связь на рассеянном лазерном излучении, полевые и лабораторные эксперименты, вероятность ошибок, некомпланарные схемы связи, атмосферная и подводная оптическая связь; optical communication on scattered laser radiation, field and laboratory experiments, communication error probability, non-coplanar communication schemes, communication in the atmosphere and underwater.

### Введение

Несмотря на то, что первые работы, посвященные оптической связи на рассеянном излучении (non-line-of-sight (NLOS) связь), опубликованы более 50 лет назад (см., например, [1]), теоретические и экспериментальные исследования в этом направлении продолжают и, более того, их интенсивность не ослабевает в последние годы [2–12]. Научные группы в Китае, США, Израиле, Индии, Канаде и других странах ставят перед собой различные вопросы, ответы на которые позволяют оценить условия, гарантирующие устойчивость оптической связи, ее высокую надежность, доступность и т.д. В работах [2–7, 11, 12] рассматриваются вопросы, связанные с выбором типа модуляции с учетом конфигурации связи: с одним излучателем и одним приемником, с множеством излучателей и с многими приемниками, с использованием ретрансляторов и т.д., а также с учетом влияния турбулентности на характеристики качества связи; с выбором метода моделирования передаточных свойств NLOS.

### Связь под водой и через лед

В ИОА СО РАН создан и более семи лет испытывался в полевых условиях по компланарной схеме лабораторный макет NLOS-связи. В 2020 г. нами были проведены подводные эксперименты,

в которых связь осуществлялась по компланарной и некомпланарной схемам. Обращение к некомпланарной схеме позволяет оценить условия, при которых связь возможна, и то, насколько ее качество ухудшается, если реализовать компланарную связь невозможно. Эксперименты были проведены, как и в предыдущие годы, на оз. Боярское в окрестностях Томска с макетом подводной NLOS-системы, описанной в [8, 9]. Будем считать некомпланарными схемами связи не только те, в которых оптические оси лазерного пучка и поля зрения приемника не лежат в одной плоскости, но и те, в которых регистрируемый сигнал не содержит однократно рассеянного излучения. Эксперименты были проведены зимой и весной, когда толщина льда достигала 50 см.

Место и время экспериментов были выбраны потому, что оптические характеристики воды в озере, по нашим наблюдениям, зимой и ранней весной почти не изменяются и что в условиях оледенения проще фиксировать и контролировать геометрические параметры схемы экспериментов. В табл. 1 приведен глубинный профиль коэффициентов ослабления воды оз. Боярское, измеренный во время экспериментов с помощью лазерного устройства [10].

Цель экспериментов состояла в том, чтобы на уровне ошибок и среднеквадратического отклонения (СКО) оценить влияние некомпланарности на качество связи, в том числе через лед. В качестве источника лазерного излучения на длине волны  $\lambda = 450$  нм использовался полупроводниковый модуль В2000, который был переведен в управляемый импульсный режим с частотой модуляции 14 кГц

\* Владимир Васильевич Белов (belov@iao.ru); Егор Сергеевич Познахарев (724\_pes1992@iao.ru); Михаил Викторович Тарасенков (tmv@iao.ru); Андрей Васильевич Федосов (Fean.2010@yandex.ru).

Таблица 1

**Результаты измерения коэффициентов ослабления воды оз. Боярское зимой**

Глубина погружения измерителя $h$ , м	Коэффициент ослабления, $\text{м}^{-1}$
0,5	5,348
1,0	5,303
1,5	5,223
2,0	5,029
2,5	4,645

и средней мощностью 13–20 мВт. Он погружался на глубину 5,8 м. Приемный телескоп размещался на верхней поверхности льда и ориентировался перпендикулярно ей или погружался на глубину 10–120 см от нижней поверхности льда.

В табл. 2 приведены результаты оценок вероятностей ошибок  $p$  и СКО в схеме организации связи через лед в зависимости от расстояния между источником и приемником. Как видим, резкое ухудшение качества связи (рост ошибок  $p$ ) началось с расстояния между источником и приемником  $L = 3,0$  м. Это, вероятнее всего, объясняется тем, что пространственное распределение интенсивности поля рассеянного излучения вокруг оптической оси лазерного пучка с ростом расстояния от пучка уменьшается и тем быстрее, чем больше  $L$ . Это уменьшение обусловлено поглощением, которое подвигает многократное рассеяние.

Таблица 2

**Вероятности ошибок и их СКО при осуществлении связи через лед**

Параметр	$L$ , м				
	1,0	2,0	3,0	3,7	4,0
$p$	0,0	0,0	0,000041	0,028317	0,599
СКО	0,0	0,0	0,000369	0,034727	0,183

На рис. 1 (цв. вкладка) показаны результаты оценок вероятностей ошибок  $p$  и СКО для случая, когда приемник погружался в воду на 10 см от нижней поверхности льда, ориентация оси задавалась углами  $\varphi$  и  $\theta$  ( $\theta$  – угол между оптической осью приемника и горизонтальной линией). Азимутальный угол  $\varphi$  отсчитывается от плоскости, перпендикулярной верхней поверхности льда и проходящей через центры лунок (диаметр лунок 30–40 см), через которые погружались в воду источник и приемник. При  $\varphi = 0^\circ$  оптическая ось приемника ориентирована на лазерный луч и схема регистрации излучения компланарная.

Как и следовало ожидать, с увеличением  $L$  и  $\varphi$  вероятность ошибок возрастает и тем быстрее, чем больше  $L$ . При  $L = 5$  м связь «пропадает» уже при  $\varphi > 90^\circ$ . Причина такой зависимости  $p = p(\varphi, L)$  состоит в том, что с ростом расстояния от оси лазерного пучка интенсивность рассеянного излучения, как отмечено выше, уменьшается из-за его поглощения в воде. Однако только этим объяснить именно такой вид зависимости, видимо, нельзя, если учесть, что в данном случае приемник располагался близко к нижней поверхности льда ( $h = 10$  см) и его оптическая ось была параллельна

ей ( $\theta = 0^\circ$ ). Поэтому влияние отражения и переотражения излучения ото льда на регистрируемые световые потоки следует учитывать, и это одна из задач, которая может быть решена теоретически. Влияние углов  $\varphi$  и  $\theta$  на вероятности и СКО ошибок иллюстрирует рис. 2 (цв. вкладка).

## Лабораторные эксперименты

ИОА СО РАН имеет возможность осуществлять лабораторные эксперименты по оптической связи в Большой аэрозольной камере (БАК) объемом 1860  $\text{м}^3$ . Геометрические схемы экспериментов, выполненных в камере в 2020 г. с лабораторным NLOS-макетом связи, использованным в полевых экспериментах, приведены на рис. 3.

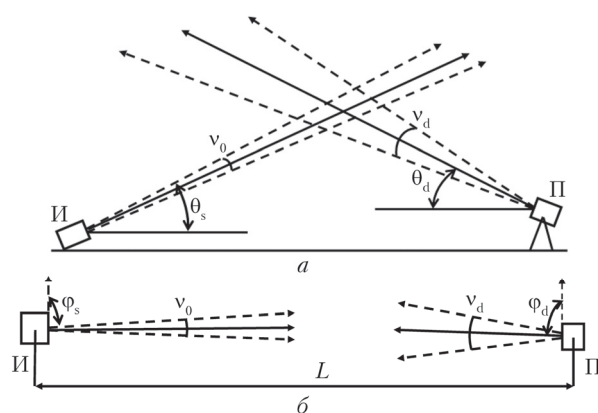


Рис. 3. Геометрическая схема экспериментов:  $a$  – вид сбоку,  $b$  – вид сверху;  $\nu_0$  – угол расходимости лазерного пучка;  $\nu_d$  – угол поля зрения приемника;  $\theta_s$  – угол места оптической оси источника;  $\theta_d$  – угол места оптической оси приемника; И – источник; П – приемник;  $\varphi_s$  – азимутальный угол оптической оси источника;  $\varphi_d$  – азимутальный угол оптической оси приемника;  $L$  – базовое расстояние от источника до приемника

В камере можно создавать различные модельные рассеивающие и поглощающие среды. Мы проводили эксперименты с водно-глицериновой смесью, создаваемой генератором частиц тумана LEXOR LM50003. В экспериментах с помощью измерителя [10] контролировался коэффициент ослабления модельной среды; он варьировался от 0,1 до 0,5  $\text{м}^{-1}$ . Фиксированные характеристики геометрической схемы экспериментов:  $\nu_0 = 1^\circ$ ;  $\varphi_s = 90^\circ$ ;  $\nu_d = 2^\circ$ ;  $L = 23,3$  м;  $\theta_s = 15^\circ$ . Варьируемые параметры:  $\varphi_d = 90^\circ; 82,5^\circ; 75^\circ$ ;  $\theta_d = 0^\circ; 10^\circ; 20^\circ$ . Измеритель ослабления размещался в центре камеры. Высоты расположения источника и приемника излучателя относительно пола БАК были различны, что исключало реализацию LOS-связи.

Были выполнены четыре цикла экспериментов. В каждом цикле при заданном угле места оптической оси приемника азимутальный угол последовательно принимал значения 90; 82,5; 75°. Эксперименты первого цикла были проведены в незаполненной модельной средой камере. Затем включался генератор LEXOR LM50003 и эксперименты повто-

рялись через 30 мин. Всего было проведено более 100 экспериментов в четырех циклах. Геометрическая схема первых трех циклов приведена на рис. 3, а четвертого цикла – на рис. 4.

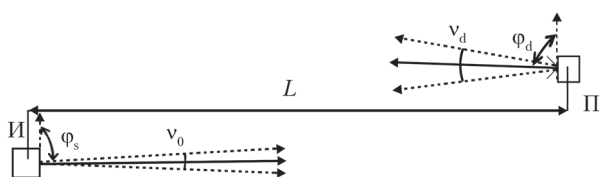


Рис. 4. Геометрическая схема экспериментов в четвертом цикле (вид сверху)

Геометрические параметры схем экспериментов, приведенных на рис. 4, были подобраны так, что при всех их значениях компланарная схема не могла быть реализована даже теоретически. В отличие от работ, например, [11, 12] мы выполнили лабораторные и полевые эксперименты не только для некопланарных схем первого типа (когда в информационном сигнале есть однократно рассеянное излучение), но и для схем второго типа, когда это излучение в информационном сигнале отсутствует.

Для оценки влияния средней мощности излучения на вероятность ошибок связи и СКО она уменьшалась от 20 до 1 мВт с использованием нейтральных стекол НС9 и НС1. При этом каких-либо особенностей в зависимости  $p = p(\varphi_d, \theta_d)$  не было выявлено.

Примеры полученных результатов приведены в табл. 3.

## Обсуждение

Если сравнить результаты, полученные в полевых подводных экспериментах, с полученными в БАК с модельной рассеивающей средой, то основное их различие состоит в том, что базовые расстояния, на которых осуществлялась связь под водой, значительно меньше тех, что были реализованы в БАК. Это можно объяснить тем, что поглощение оптического излучения в воде существенно выше, чем в водно-глицериновой смеси. В то же время очевидны общие черты зависимостей  $p = p(\theta_d, \varphi_d)$  для водной среды и водно-глицеринового тумана. Обратим внимание на вероятность

ошибки для некопланарной схемы, изображенной на рис. 4, при  $\theta_d = 0^\circ$  и  $\varphi_d = 90^\circ$ . Как видим, она значительно выше, чем при других  $\theta_d$  и  $\varphi_d$ . С нашей точки зрения, объяснить это можно следующим образом.

Источник полезного сигнала в коммуникационных NLOS-схемах – рассеянное излучение (в том числе многократное). Объемное «тело» яркости этого излучения формируется вокруг лазерного пучка. Для простоты рассуждений предположим, что рассеивающая и поглощающая среды однородны. Тогда форма этого «тела» яркости будет представлять из себя эллипсоид вращения с размытой внешней поверхностью. Приемник оптического излучения регистрирует излучение, исходящее из некоторой области объемного источника. Оно будет зависеть не только от поля зрения приемника, но и от ориентации его оптической оси, т.е. от углов  $\theta_d, \varphi_d$ . Если предположить, что яркость рассеянного излучения минимальна при различных значениях  $\theta_d, \varphi_d$ , тогда этим несложно объяснить как максимальные ошибки, полученные для схемы на рис. 4, при  $\theta_d = 0^\circ, \varphi_d = 90^\circ$ , так и те, что были получены в первых трех циклах лабораторных экспериментов, которые приведены в табл. 3.

## Заключение

В работе рассмотрены результаты более 200 полевых и лабораторных экспериментов по оптической связи на рассеянном излучении под водой и в воздушной модельной среде. Эксперименты впервые выполнены при некопланарных схемах связи первого (когда в информационном сигнале присутствует однократно рассеянное излучение) и второго типов (когда это излучение отсутствует). Подтверждена возможность осуществления связи с источником под водой через лед. Показано, что переход от компланарной к некопланарной схеме связи при изменении углов, определяющих взаимную ориентацию оптических осей излучателя и приемника, может приводить к нелинейному изменению ошибок связи. Предложено объяснение этой зависимости.

Результаты как полевых, так и лабораторных экспериментов (см. рис. 1, 2 и табл. 3) позволяют утверждать, что ошибки связи и их СКО в зависимости от углов  $\varphi_d$  и  $\theta_d$  могут изменяться нелинейно.

Таблица 3

Вероятности ошибок и их СКО в зависимости от углов  $\theta_d, \varphi_d$  и схем наблюдения

Цикл	$\theta_d$ , град	0			10			20		
	$\varphi_d$ , град	90	82,5	75	90	82,5	75	90	82,5	75
1	$p$	0,00	0,00	0,329	0,008	0,098	0,723	0,279	0,971	0,980
	СКО	0,00	0,00	0,158	0,021	0,054	0,159	0,129	0,049	0,047
2	$p$	0,017	0,008	0,026	0,008	0,098	0,007	0,001	0,004	0,003
	СКО	0,025	0,017	0,038	0,021	0,054	0,016	0,007	0,001	0,010
3	$p$	0,007	0,111	0,006	0,005	0,006	0,006	0,005	0,007	0,006
	СКО	0,016	0,220	0,0141	0,014	0,015	0,015	0,012	0,015	0,017
4	$p$	0,049	0,005	0,005	0,004	0,007	0,006	0,003	0,004	0,009
	СКО	0,136	0,013	0,013	0,012	0,015	0,015	0,011	0,012	0,019

Связь через лед снизу вверх возможна, но ее качество резко и нелинейно ухудшается с увеличением расстояния между оптическими осями источника и приемника излучения начиная с 3 м. Очевидно, что если использовать более мощные источники и более чувствительные приемники, то это расстояние можеткратно возрастать. Лабораторные эксперименты в БАК подтверждают вывод о том, что некопланарная связь возможна с хорошим качеством при ориентации оптических осей приемника и излучателя в пределах углов места 10–15° и азимутальных углов более 75°.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН. Авторы благодарят директора ИОА СО РАН Пташника И.В. за финансовую поддержку экспериментальных исследований.

1. *Sunstein D.E.* A Scatter Communication Link at Ultraviolet Frequencies: PhD thesis. USA: Massachusetts Institute of technology, 1968.
2. *Garg K.K., Shaik P., Bhatia V.* Performance analysis of cooperative relaying technique for non-line-of-sight UV communication system in the presence of turbulence // *Opt. Eng.* 2020. V. 59, N 1. P. 1–16.
3. *Luo P., Zhang M., Han D., Li Q.* Performance analysis of short-range NLOS UV communication system using Monte Carlo simulation based on measured channel parameters // *Opt. Express.* 2012. V. 20. P. 23489–23501.
4. *Peng D., Shi J., Peng G., Xia Sh., Xu Sh., Wang Sh., Liu F.* An ultraviolet laser communication system using frequency-shift keying modulation scheme // *Optoelectron. Lett.* 2015. V. 11. P. 65–68.
5. *Hariq S.H., Odabasioglu N.* Spatial diversity techniques for non-line-of-sight ultraviolet communication systems over atmospheric turbulence channels // *IET Optoelectron.* 2020. V. 14, N 13. P. 327–336.
6. *Xing F., Yin H., Ji X., Leung V.C.M.* Joint relay selection and power allocation for underwater cooperative optical wireless networks // *IEEE Trans. Wireless Commun.* 2020. V. 19, N 1. P. 251–264.
7. *Arya S., Chung Y.H.* A unified statistical model for Malaga distributed optical scattering communications // *Opt. Commun.* 2020. V. 463. P. 125402.
8. *Белов В.В., Тарасенков М.В., Абрамочкин В.Н.* Би-статические атмосферные оптико-электронные системы связи (полевые эксперименты) // *Письма в ЖТФ.* 2014. Т. 40, вып. 19. С. 89–95.
9. *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 би-статические каналы связи с рассеянием. Часть 2. Полевые эксперименты 2013 г. // *Оптика атмосф. и океана.* 2014. Т. 27. № 8. С. 659–664; *Belov V.V., Tarasenkova M.V., Abramochkin V.N., Ivanov V.V., Fedosov A.V., Gridnev Yu.V., Troitskii V.O., Dimaki V.A.* Atmospheric bistatic communication channels with scattering. Part 2. Field experiments in 2013 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 3. P. 202–209.
10. *Белов В.В., Тарасенков М.В., Федосов А.В., Кудрявцев А.Н., Абрамочкин В.Н., Познахарев Е.С.* Лазерное устройство для измерения коэффициента ослабления водной среды // Патент на полезную модель № 193689, приоритет от 11.11.2019 г. Дата государственной регистрации 16.09.2019. Правообладатель: ИОА СО РАН (RU).
11. *Song Peng, Tan Yumei, Geng Xiaojun, Zhao Taifei.* Noise reduction on received signals in wireless ultraviolet communications using wavelet transform // *IEEE Access.* 2020. V. 8. P. 131626–131635.
12. *Renzhi Yuan, Jianshe Ma, Ping Su, Yuhan Dong, Julian Cheng.* Monte-Carlo integration models for multiple scattering based optical wireless communication // *IEEE Trans. Commun.* 2020. V. 68, N 1. P. 334–348.

*V.V. Belov, E.S. Poznakharev, M.V. Tarasenkova, A.V. Fedosov.* **Non-coplanar bistatic optical communication systems. Field and laboratory experiments.**

Results of field and laboratory experiments on non-line-of-sight communication under water and in a model air medium are considered. For the first time, the experiments have been performed for non-coplanar communication schemes of the first (when single scattered radiation was present in the information-bearing signal) and second type (when this radiation was absent). The feasibility of communication through an ice interface with an underwater source was confirmed. It was shown that transition from the coplanar to non-coplanar communication scheme, accompanied by changes in the angles defining mutual orientation of the optical transmitter and receiver axes, can cause nonlinear changes in communication errors. The explanation of this dependence is suggested.

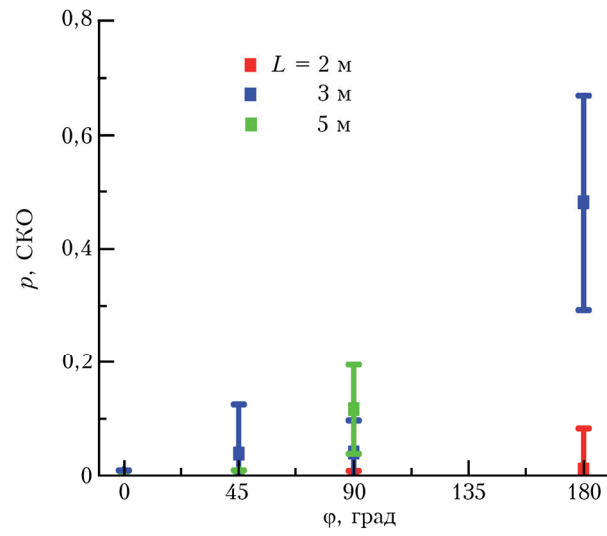


Рис. 1. Влияние угла  $\phi$  и расстояния  $L$  на вероятности ошибок и СКО при  $\theta = 0^\circ$  и  $h = 10$  см

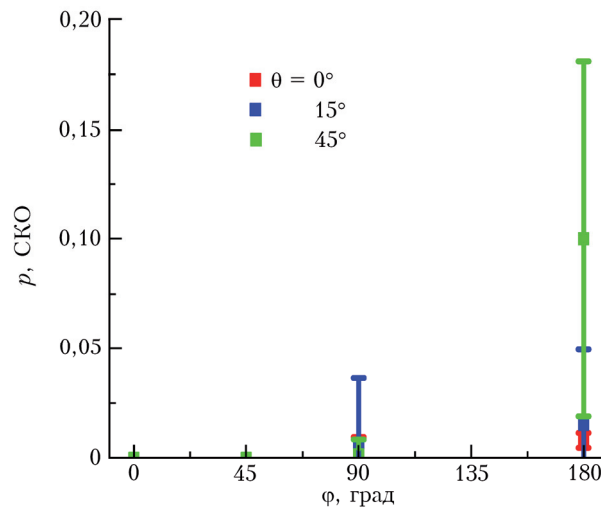


Рис. 2. Вероятности и СКО ошибок связи в зависимости от  $\phi$  при  $L = 2$  м,  $h = 80$  см и разных  $\theta$