

УДК 621.391.63

<https://www.doi.org/10.47813/dnit.4.2025.3014>

EDN

[DHEXRE](#)

Исследование характеристик подводного оптического канала связи при воздействии на него негативных факторов

Ю.Г. Ксенофонтов^{1,*}, В.В. Абазовик²

¹Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, ул. Двинская, 5/7, Санкт-Петербург, 198035, Россия

²АО «Равенство», ул. Промышленная, д. 19, Санкт-Петербург, 198095, Россия

*E-mail: ksenofontov.ura@mail.ru

Аннотация. Беспроводные подводные оптические телекоммуникации все чаще стали применяться в поисково-разведывательных системах исследования морского дна. Возможности их позволяют осуществлять непрерывную трансляцию видео в режиме реального времени на относительно небольших глубинах. Однако, существует ряд факторов, способных воздействовать на канал, и, таким образом, снижать его эффективность. К таковым относятся поглощение и многократное рассеяние, которые, в итоге, приводят к потере мощности светового потока, пропускной способности, ухудшению значения коэффициента битовых ошибок BER. Не менее серьезное негативное воздействие на оптический подводный канал оказывает турбулентность, которая обусловлена случайными изменениями показателя преломления воды, что вызывает флуктуации или затухание оптического сигнала. Этот эффект особенно сильно отражается на снижении производительности канала. В статье показано логнормальное и отрицательное экспоненциальное распределения ФПВ интенсивности света от слабого к сильному насыщенному турбулентному режиму. Полученные результаты моделирования доказывают полное соответствие с теоретическими расчетами. Здесь также же исследуется эффект влияния изменения угла расхождения луча передатчика, диаметра апертуры и поля зрения приемника на скинтилляционный индекс.

Ключевые слова: подводная оптическая беспроводная связь, пропускная способность, турбулентность, интенсивность светового потока, функция плотности вероятности, скинтилляционный индекс.

Study of the characteristics of the underwater optical communication channel under the influence of negative factors

Yu.G. Ksenofontov^{1,*}, V.V. Abazovik²

¹Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Dvinskaya 5/7, St. Petersburg 198035, Russia

²Joint-stock company «Equality», Promyshlennaya 19, St. Petersburg, 198095, Russia

*E-mail: ksenofontov.ura@mail.ru

Abstract. Wireless underwater optical telecommunications have increasingly come into use in seabed exploration systems. Their capabilities allow you to continuously broadcast video in real time at relatively shallow depths. However, there are a number of factors that can affect the channel and thus reduce its efficiency. These include absorption and multiple scattering, which ultimately lead to a loss of luminous flux power, throughput, and a deterioration in the BER bit error rate. Turbulence has an equally serious negative effect on the optical underwater channel, which is caused by accidental changes in the refractive index of water, which causes fluctuations or attenuation of the optical signal. This effect is particularly significant in reducing channel performance. The article shows the lognormal and negative exponential distribution of the FPP light intensity from weak to strong saturated turbulent mode. The obtained simulation results prove full compliance with theoretical calculations. It also examines the effect of changing the angle of divergence of the transmitter beam, aperture diameter and receiver field of view on the scintillation index.

Keywords: underwater optical wireless communication, throughput, turbulence, light flux intensity, probability density function, scintillation index.

1. Введение

Подводная беспроводная связь (UOWC) сегодня просто незаменима в системах контроля за морской флорой и фауной, особенно в районах, где имеется потенциальная возможность загрязнения водной среды, возникновения стихийных бедствий, а также в разведке нефтяных и газовых месторождений. В связи с этим внедрение UOWC стала одной из передовых технологий в области подводных телекоммуникаций.

Подводная оптическая беспроводная связь UOWC в последние годы все чаще привлекает внимание. Использование оптических несущих волн в сине-зеленых диапазонах позволяет получить достаточно высокую пропускную способность подводной линии связи в сравнении с традиционными применяемыми длительное время технологиями [1, 2]. Тем не менее, наличие ряда факторов, присущих подводной среде, резко снижает производительность UOWC. Среди таких особо следует выделить свойства поглощения и рассеяния, которые, в итоге, приводят к потере мощности, пропускной способности, ухудшению значения коэффициента битовых ошибок BER [3]. Кроме того, большую роль в обеспечении производительности оптической подводной линии играет турбулентность. Так как изучение этого эффекта в UOWC является достаточно трудоемкой процедурой, основное внимание уделяется системному и имитационному моделированию. В работе [4] приводится описание физической модели на основе метода Монте-Карло, максимально приближенной к реальным условиям существования подводной среды, охватывающая различные уровни турбулентности. Два важнейших параметра, способных дать оценку влияния турбулентности на производительность оптического канала (изменение показателя преломления Δn и функция плотности вероятности (ФПВ) интенсивности принимаемого света) в [4] детально исследованы.

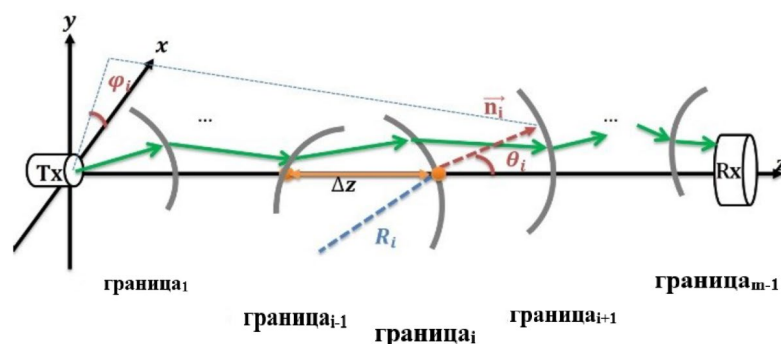


Рисунок 1. Схема системы, состоящей из передатчика Tx, турбулентного подводного канала и приемника Rx.

В целях исследования точной ФПВ для принятой интенсивности света в условиях слабой и средней турбулентности при моделировании и анализе было принято логнормальное распределение. В работе [5] как для распределений Гамма-Гамма значения сцинтилляционного индекса (СИ) были приняты больше единицы, а диапазон экспоненциального и логнормального распределений составил $0,1 < \text{СИ} < 1$, что говорит о невозможности принимать модель за реальную подводную среду.

2. Постановка задачи (Цель исследования)

На основе ранее предложенной модели турбулентности, приведенной в [4], в данной статье исследуется колебание интенсивности света, и прогнозируется его ФПВ при режимах слабой/сильной и насыщенной турбулентности. Кроме того, здесь же исследуется СИ, рассматривая угол расхождения гауссова луча T_x и диаметр апертуры R_x , а также его поле зрения (FOV).

Если говорить об атмосфере, то Турбулентность принято подразделять на три вида: слабая, средняя и насыщенная [6]. Однако, из-за сложного характера состояния окружающей среды до сих пор нет всеобщей единой математической модели, детально описывающей эффект турбулентности.

3. Методы и материалы исследования

Дано логнормальное распределение полученной интенсивности света I [7]:

$$p(I) = \frac{1}{I\sigma_I\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{\left[\ln \left(\frac{I}{I_0} \right) + \frac{1}{2}\sigma_I^2 \right]^2}{2\sigma_I^2} \right\}, I > 0 \quad (1)$$

где I_0 – средняя принятая интенсивность светового потока,

σ_I^2 – сцинтилляционный индекс (СИ), который выражается в виде:

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I \rangle^2 - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} \quad (2)$$

Отрицательное экспоненциальное распределение в работе [6] выглядит следующим образом:

$$p(I) = \frac{1}{I_0} \exp \left(-\frac{I}{I_0} \right), I > 0 \quad (3)$$

Рисунок 1 показывает, ранее представленная в [4] модель базируется на взаимодействии фотонов с последовательно расположенными турбулентными ячейками (определяются шириной Δz оси z), которые имеют разные показатели преломления и геометрические размеры. Радиус искривленных границ R_i и вектор нормали $\vec{n}_i = (\sin \theta_i \cos \varphi_i, \sin \theta_i \sin \varphi_i, \cos \theta_i)$ отделяют смежные слои. Выбирая случайным образом θ_i и φ_i , подразумевается поворот изогнутой границы вдоль оси z . Следует обратить внимание, что значение угла θ_i носит случайный характер и меняется в диапазоне от 0 до $\theta_{\max}$, а φ_i – от 0 до 2π , при этом имеет место равномерное распределение. Необходимо добавить, что значения показателей Δn и L более всего влияют на турбулентность. Основные параметры системы представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значения параметров моделирования.

Параметр	Значение
Число переданных фотонов	1e4
Рабочая длина волны	520 нм
Угол дивергенции луча (половина угла)	0,00075 рад
Среднеквадратичная ширина луча	15 мм
Диаметр апертуры	100 мм
Угол поля зрения FOV	180°
Длина линии связи	30, 40, 80, 120, 150 м
Число реализованных каналов	1e3
Δn	80e-5
Δz	50 см
$\theta_{\max}$	45°

4. Полученные результаты

На рисунке 2 показана ФПВ интенсивности моделируемого принимаемого света в соотношении с нормированной при логнормальном и отрицательном экспоненциальном распределениями для L и СИ. Следует обратить внимание, что значения СИ были получены из выражения (2). Из рисунка 2 хорошо видно соответствие между указанными вышеуказанными распределениями и результатами моделирования (для случаев слабой и насыщенной турбулентности).

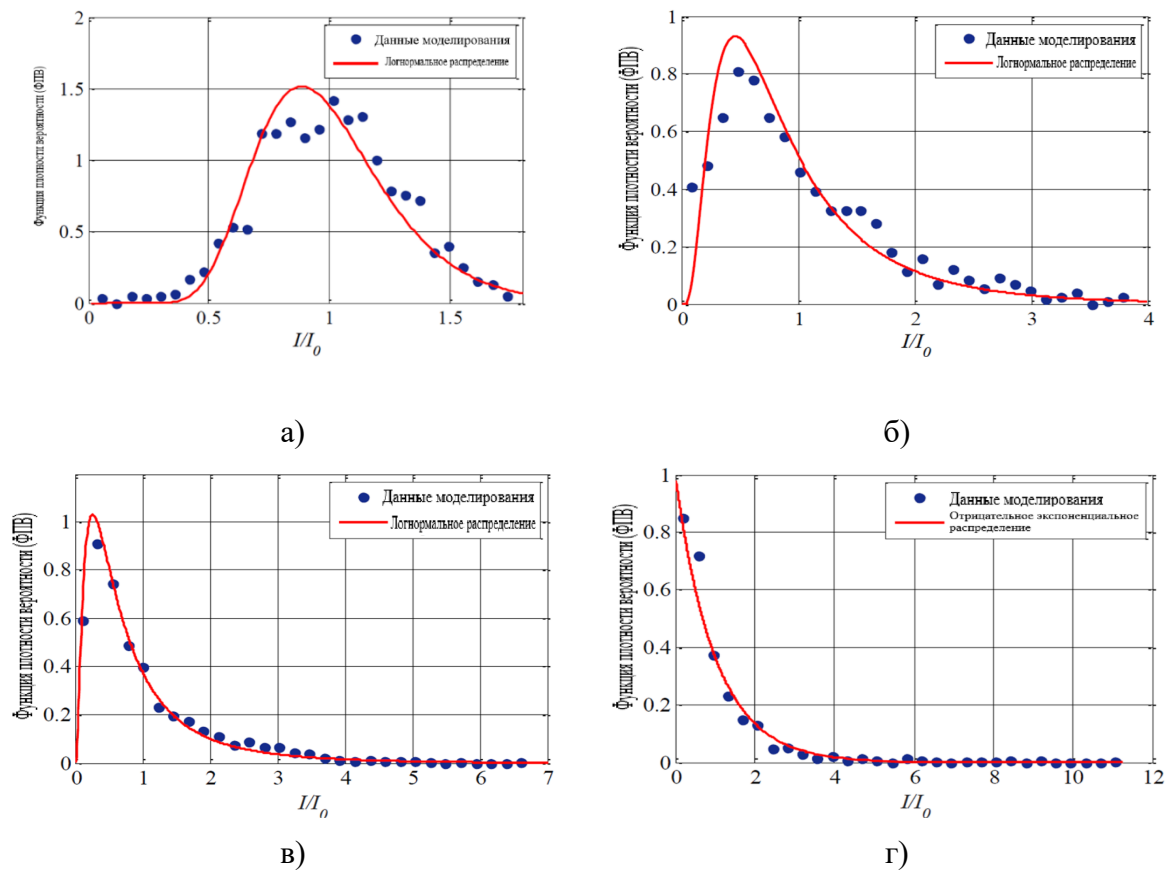


Рисунок 2. ФПВ смоделированной интенсивности принятого света в сравнении с нормализованной интенсивностью с логнормальным и отрицательным экспоненциальными распределениями для: (а) $L=40$ м и СИ=0,08, (б) $L=80$ м и СИ=0,52, (в) $L=120$ м и СИ=0,9 и (г) $L=150$ м и СИ=1,40.

Чтобы иметь оценочное представление о схожести результатов моделирования ФПВ с логнормальным и отрицательным экспоненциальными распределениями, можно, как отражено в [8], использовать коэффициент детерминации R^2 :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}, \quad (4)$$

где:

- N – число точек в распределении,
- x_i и y_i – смоделированные и прогнозируемые значения для i -х интенсивностей соответственно,
- $\bar{x}$ – среднее значение x_i .

Вообще $0 < R^2 < 1$, где верхнее значение, т.е. 1, указывает на близкое приближение результатов моделирования к логнормальному и отрицательному экспоненциальному

распределениям. Таблица 2 показывает значения R^2 и СИ для разных видов распределений ФПВ.

Таблица 2. Значения R^2 и СИ для разных видов распределений ФПВ

ФПВ	R^2	СИ
Логнормальное распределение	0,8762	0,08
	0,8211	0,52
	0,9891	0,9
Отрицательное экспоненциальное распределение	0,9751	1,40

В качестве дополнения помимо L и Δl в статье также анализируем изменение угла расхождения луча T_x , изменение диаметра апертуры приемника R_x , а также влияние поля зрения FOV на СИ. Рисунок 3 наглядно иллюстрирует зависимость значений СИ от угла расхождения T_x при различных Δl и $L = 30$ м. Как видно, при низких значениях углов расхождения передаваемого светового луча T_x эффект турбулентности является относительно низким. Однако, далее с увеличением угла расхождения из-за многолучевого распространения и блуждания луча СИ постепенно растет и, в итоге, достигает последнего насыщенного уровня. В этом состоянии ширина луча шире, чем площадь R_x , и эффект блуждания луча уменьшается, что приводит к снижению СИ.

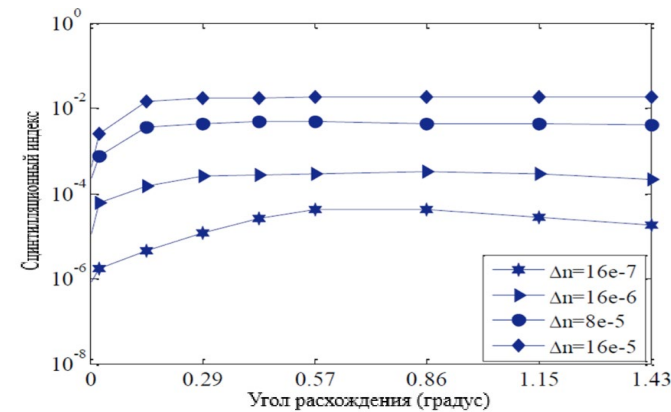


Рисунок 3. Зависимость значений СИ от угла расхождения T_x при различных значениях Δl и для $L=30$ м.

На рисунке 4 показаны графики значений СИ в зависимости от диаметра апертуры R_x при различных значениях Δl и $L=30$ м. Из них следует, что СИ с увеличением диаметра апертуры R_x при любых значениях Δl снижается. Компенсировать эффекты сцинтилляции и блуждания луча можно снижением случайных флуктуаций

интенсивности принимаемого светового за счет увеличения диаметра апертуры [9], но, как известно, это может привести к потере соотношения сигнал/шум на входе Rx.

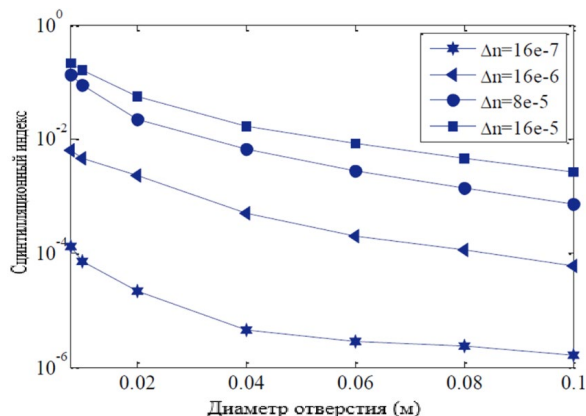


Рисунок 4. Графики зависимости значений СИ от диаметра апертуры Rx при различных значениях Δn и $L=30$ м.

Следующие графики (рисунок 5) иллюстрируют зависимость значений СИ от поля зрения FOV Rx при различных значениях Δn для $L=30$ м. Из них следует, что увеличение угла поля зрения FOV практически не оказывает никакого влияния на СИ, кроме случая $FOV < 1^\circ$. В области низких значений Δn влияние увеличения FOV на СИ практически незаметно, но для более высоких уже имеет определенное значение.

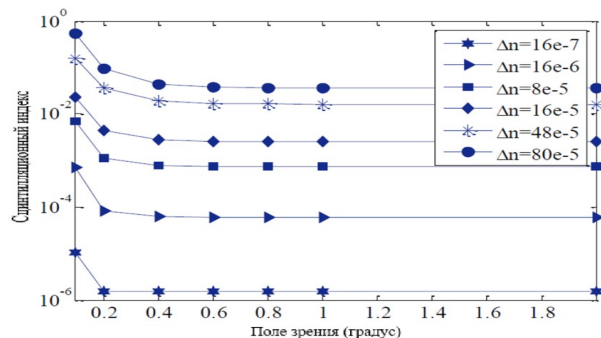


Рисунок 5. Графики зависимости значений СИ от поля зрения (FOV) при различных значениях Δn и $L=30$ м.

5. Выводы

Основываясь на предложенной модели турбулентности, исследовано влияние диапазона ссылок до 150 м на ФПВ интенсивности принимаемого света при коэффициенте преломления воды вариации были одинаковыми во всех случаях. Результаты моделирования показали, что логнормальное и отрицательное экспоненциальное распределения очень неплохо сочетаются с ФПВ интенсивности принятого света при условии возрастания турбулентности от слабого уровня вплоть до насыщенного. Также установлено, что при изменении угла расхождения Tx СИ также

зависит и от изменения показателя преломления, а увеличение диаметра апертуры R_x и его поля зрения имеют тенденцию к уменьшению СИ.

Список литературы

1. Ксенофонтов, Ю.Г. Системы технического зрения как разновидность инфотелекоммуникаций в вопросах экологического мониторинга водной среды / Ю.Г. Ксенофонтов, В.Л. Мартынов, Н.М. Божук, М.С. Шиманская, Э.В. Кречетова // Информатизация и связь. – 2022. – № 1. – С. 114-119. – DOI: 10.34219/2078-8320-2022-13-1-114-119.
2. Мартынов, В. Л. Картографирование донной поверхности с использованием лазерных технологий / В. Л. Мартынов, Н. М. Божук, А. С. Голосной // Морские интеллектуальные технологии. – 2019. – № 2-2 (44). – С. 69-73.
3. Ксенофонтов, Ю. Г. Подводная оптическая беспроводная связь как средство повышения эффективности информационно-телекоммуникационного обеспечения глубоководных исследований / Ю. Г. Ксенофонтов // Современные инновации, системы и технологии. – 2023. – Т. 3(3). – С. 132-145. – DOI 10.47813/2782-2818-2023-3-3-0132-0145.
4. Vali, Z. Modeling turbulence in underwater wireless optical communications based on Monte Carlo simulation / Z. Vali, A. Gholami, Z. Ghassemlooy, D. G. Michelson, M. Omoomi, H. Noori // Journal of the Optical Society of America A. – 2017. – V. 34. – P. 1187-1193.
5. Jamali, M. V. Statistical distribution of intensity fluctuations for underwater wireless optical channels in the presence of air bubbles / M. V. Jamali, *et al.* // Iran Workshop on Communication and Information Theory (IWCIT), 2016. – P. 1-6.
6. Ghassemlooy, Z. Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab / Z. Ghassemlooy, W. Popoola, S. Rajbhandari. – Boca Raton, United States: CRC press, 2012. – 540 p.
7. Andrews, L. C. Laser beam scintillation with applications / L. C. Andrews, R. L. Phillips, C. Y. Hopen. – Bellingham, WA, United States: SPIE press, 2001.
8. Lee, I. E. Free space optical communication systems with a partially coherent Gaussian beam and media diversity, Northumbria University, 2014.
9. Majumdar, A. K. Free-space laser communications: principles and advances / A. K. Majumdar, and J. C. Ricklin // Springer Science&Business Media. – 2010. – V. 2.