

УДК 621.391.63

<https://www.doi.org/10.47813/dnit.4.2025.3013>

EDN

[BWTAHD](#)

## Телекоммуникационная сеть наблюдения за морским дном на базе подводных кабельных и беспроводных платформ

Ю.Г. Ксенофонов<sup>1,\*</sup>, М.А. Петин<sup>2</sup>

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

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

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

**Аннотация.** Телекоммуникационная сеть наблюдения за морским дном может выполнять все долгосрочные, непрерывные, в режиме реального времени функции путем применения различных методов, включая кабельные узлы морского дна, автономные станции, а также мобильные платформы, где надежная высокоскоростная подводная беспроводная связь становится главным фундаментом. В последнее время подводная беспроводная оптическая связь (UWOC) стала очень продуктивным решением и становится все более привлекательной с точки зрения научных исследований. В статье показан вариант применения высокоскоростной системы UWOC для глубоководного наблюдения. Длительное глубоководное соединение UWOC в реальном времени на расстоянии до 30 м и глубиной 1650 м. Двухуровневые каналы Ethernet UWOC реализуются со скоростью 125 Мбит/с с настраиваемым зеленым светом и 6,25 Мбит/с синим без прямой видимости (NLOS). Высококачественная трансляция видеофайлов в формате 8K 30 FPS и 4K 120 FPS при помощи подводной оптической линии связи, имеющей скорость передачи данных до 125 Мбит/с, возможна при условии излучения передатчиком зеленого света, что говорит о приеме видеоданных без битовых ошибок. Проведенные в течении 30 суток технические измерения показывают, что значения BER указанной линии при скоростях 125 Мбит/с и 6,25 Мбит/с находятся ниже порога в  $10^{-5}$ , а это, в свою очередь, характеризует функционирование UWOC с высокой степенью надежности в слоях гидросферы до 1650 м глубиной.

**Ключевые слова:** телекоммуникационная сеть, линии связи, подводная беспроводная оптическая связь, пропускная способность, режим реального времени, приемопередатчик.

## Seabed surveillance telecommunications network based on subsea cable and wireless platforms

Yu.G. Ksenofontov<sup>1,\*</sup>, M.A. Petin<sup>2</sup>

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

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

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

**Abstract.** A seabed surveillance telecommunications network can perform all long-term, continuous, real-time functions by applying a variety of techniques, including seabed cable assemblies, stand-alone stations, as well as mobile platforms, where reliable high-speed underwater wireless communications become the main foundation. Recently, underwater wireless optical communication (UWOC) has become a very productive solution and is becoming more attractive in terms of scientific research. The article shows the option of using a high-speed UWOC system for deep-sea surveillance. Long-duration, real-time deep-sea UWOC connection up to 30 m and 1650 m deep. UWOC dual-layer Ethernet links are implemented at 125 Mbit/s with configurable green light and 6.25 Mbit/s blue without line of sight (NLOS). High-quality transmission of video files in 8K 30 FPS and 4K 120 FPS format using an underwater optical communication line with a data transfer rate of up to 125 Mbps is possible provided that the transmitter emits green light, which indicates the reception of video without bit errors. Technical measurements carried out within 30 days show that the values of the error coefficient per BER bit of the specified line at speeds of 125 Mbit/s and 6.25 Mbit/s are below the threshold of  $10^{-5}$ , and this, in turn, characterizes the functioning of UWOC with a high degree of reliability in the layers of the hydrosphere up to 1650 m deep.

**Keywords:** telecommunication network, communication lines, underwater wireless optical communication, throughput, real-time mode, transceiver.

## 1. Введение

Сеть наблюдения за морским дном – это новый вид платформы для человека, которая позволяет непрерывно вести визуальное наблюдение в водах Мирового Океана в режиме реального времени, при этом имея достаточно высокое разрешение, независимо от наличия объекта в определенном слое воды. Для обмена данными в этом случае рекомендуется применять волоконно-оптический кабель, связывающий различные точки видеонаблюдения с береговой станцией [1-2]. Несмотря на кабельные соединения, вполне эффективно обеспечиваются питание и полоса пропускания канала передачи, однако, диапазон покрытия и гибкость кабельных узлов наблюдения за морским дном все же ограничено. Бескабельный метод подводного наблюдения представляет собой принципиально новый подход [3]. Для наблюдательной сети морского дна сочетание кабельных и бескабельных методов может значительно расширить его зону покрытия и гибкость. Пример такой организации сети представлен на рисунке 1.



**Рисунок 1.** Концепция кабельной и бескабельной конвергенции в подводной телекоммуникационной наблюдательной сети.

Бескабельные платформы наблюдения включают в себя автономный узел наблюдения, мобильные надводные буи, дистанционно управляемые автономные обитаемые подводные аппараты (АНПА) и другие технические средства информационного обмена.

## 2. Постановка задачи (Цель исследования)

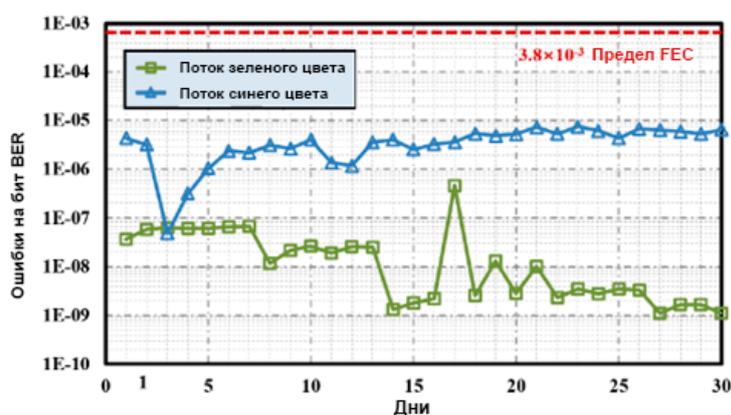
Подводная беспроводная оптическая связь (UWOC) сегодня занимает особое с точки зрения конкурентоспособности место среди классических видов передачи информации, таких как гидроакустика и радиочастота (RF), за счет крайне низкого энергопотребления и в значительной степени их превышающей пропускной способности [4]. В последнее время заметный прогресс в UWOC был достигнут в усовершенствовании алгоритмов обработки и увеличении дальности передачи. В лабораторных условиях 500 Мбит/с передача данных была достигнута на расстоянии 100 м с использованием зеленого лазерного диода (LD) со малым приемопередатчиком и диафрагмой точного выравнивания света. Следует отметить, что Океанографическое учреждение С. Pontbriand из Вудс-Хоул (WHOI) реализует передачу 5 Мбит/с более 200 м чистой воды на Бермудских островах с апреля 2008 года [5]. В октябре 2022 года С. Исибаши и др. от JAMSTEC сообщили о своем последнем эксперименте с морским испытанием с использованием многолучевых приемопередатчиков на основе нескольких РМТ, успешно демонстрируя возможности демодуляции данных со скоростью 1 Гбит/с на расстоянии 100 м и глубине 800 м [6]. Тем не менее, в большинстве случаев битрейт связи UWOC в реальном времени ограничен 20 Мбит/с, и построение таких линий связи затруднено возможностью обеспечения удаленного питания, прокладки кабельных систем и проблемой выравнивания приемопередатчиков UWOC в глубоководной среде. Имеют место также проблемы вмешательства внешнего светового излучения, низкая прозрачность водной среды и технические сложности сопряжения отдельных узлов с дрейфующими мобильными комплексами. В данной статье представлены результаты исследования функционирования в течение 30-ти суток UWOC методом мониторинга производительности в режиме реального времени. Здесь каналы связи UWOC реализуют двустороннюю передачу Ethernet между двумя глубоководными узлами наблюдения за морским дном, расположенными на расстоянии 30 м и на глубине 1650 м, реализуя линию связи зеленого света с регулируемым направлением 125 Мбит/с и линию связи без прямой видимости 6,25 Мбит/с (NLOS). Полученные результаты показали, что коэффициент битовых ошибок (BER) каналов со скоростями передачи 125 Мбит/с и 6,25 Мбит/с находится ниже порогового значения  $10^{-5}$ , что, соответственно, не требует прямого исправления ошибок (FEC).

### 3. Методы и материалы исследования

Эффективная полоса пропускания Ethernet, переносимая линией зеленого и синего света составляет 97,4 Мбит/с и 5,5 Мбит/с. Это обусловлено техническими ограничениями интерфейса Ethernet. Тем не менее, для потока синего света при конфигурации NLOS имеют место события потери пакетов данных (при этом BEPS составляет 63 и 85 соответственно). По сравнению с зеленой 125 Мбит/с, бюджет потерь 6,25 Мбит/с синей линии связи намного выше из-за ее более чувствительной модуляции 4-PPM и большей апертуры обнаружения. Однако, как канал NLOS, полученный сигнал синего света очень слаб после отражения и рассеивания от донных отложений и взвешенных частиц. Под влиянием морского течения и морских живых организмов, интенсивность сигнала становится нестабильной, что приводит к потере пакетов данных.

### 4. Полученные результаты

После оптимизации некоторых параметров приемника, таких как усиление РМТ и ослабление LC, был проведен длительное в течение 30-ти суток измерение производительности линии связи UWOC. Результаты, представленные на рисунке 2, показывают, что для оптических каналов зеленого (125 Мбит/с) и синего (6,25 Мбит/с) световых потоков каналов, за 30 суток не превысили соответствующих пороговых значений  $10^{-5}$  и  $10^{-7}$  BER, что еще раз доказывает высокую степень надежности функционирования UWOC.



**Рисунок 2.** Графики изменения значений BER для оптических каналов с зеленым и синим световым потоком в течение 30 суток.

В ходе продолжения эксперимента была исследована передача видео HD в двух форматах: 8К-видео с разрешением  $7680 \times 4320$  и 4К видео с разрешением  $4096 \times 1860$ . Анализ полученных результатов показывает, что для линии связи 125 Мбит/с скорость

передачи видео 8K и 4K составляет 50,5 Мбит/с и 34,4 Мбит/с. Следует также отметить что, пиковое соотношение сигнал/шум (PSNR) на приемной стороне остается стабильным для всех кадров, а значит, потери в качестве при использовании каналов UWOC во время передачи видео HD отсутствуют .

В системах UWOC на лазерной основе потери в линии связи в основном определяются затуханием в воде и геометрическими потерями. Ослабление света  $L_{att}$  в водной среде обычно описывается с использованием экспоненциальной модели [7], которая может быть выражена следующим образом:

$$L_{att} = e^{-c \cdot Z}, \quad (1)$$

где:  $c$  – коэффициент диффузного затухания,  $Z$  – коэффициент расстояния оптической линии связи.

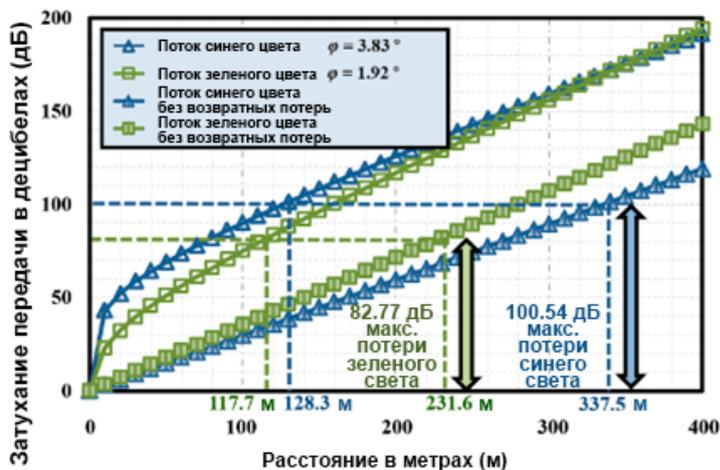
В соответствии с измерениями, проведенными с образцами, взятыми с глубины воды, коэффициент затухания  $c$  составил 0,069 (0,298 дБ/м) для линии синего света и 0,082 (0,358 дБ/м) для зеленого. Кроме потерь затухание сигнала в водной среде присутствуют и так называемые геометрические потери светового потока, в случае, когда источник излучения имеет некое смещение относительно приемного детектора. Они обратно пропорциональны квадрату расстояния между приемником и передатчиком, то есть:

$$L_{geo} = \frac{k}{Z^2}, \quad (2)$$

где  $k$  – постоянная величина, связанная с полуугловым пучком  $\phi$  расхождения и апертурой детектора.

Согласно проведенным измерениям до развертывания морского испытания, расхождение лазерного луча составляет  $3,83^\circ$  для линии синего света и  $0,53^\circ$  для зеленого. Предполагая условие выравнивания линий приемника и передатчика, максимальное расстояние передачи для обеих линий связи оценивается как с учетом геометрических потерь, так и без них (рисунок 3). Это особенно заметно в обозначенных ранее конфигурациях приемопередатчика при максимальных расстояниях передачи: 117,7 м для 125 Мбит/с линии зеленого света и 128,3 м для 6,25 Мбит/с линии синего света при наличии геометрических потерь. Если зона детектора приемника имеет достаточно большую апертуру, чтобы полностью собрать сигнальный свет с узкой дивергенцией луча, в идеальных условиях приема расстояния передачи данных могут

достигнуть 231,6 м и 337,5 м для линий зеленого света и синего соответственно, что пока еще, практически неосуществимо в реальной подводной среде.



**Рисунок 3.** Оценка максимального расстояния оптической передачи данных для двух вариантов световых потоков (зеленого и синего) UWOC.

## 5. Выводы

Таким образом, беспроводная линия связи, основанная на высокоскоростной линии связи UWOC, доказала возможность передачи без потери качества в глубоком море в режиме реального времени видео в формате 8K HD. Следует ожидать, что данные, приведенные авторами в статье, будут особенно полезны для последующего изучения физических сред в области организации подводной высокоскоростной телекоммуникационной сети, основанной на сочетании кабельных и бескабельных платформ.

## Список литературы

1. Ксенофонтов, Ю. Г. Инновационный подход к вопросам организации системы дальней связи и управления подводными робототехническими комплексами контроля экологического состояния акваторий Северного морского пути / Ю. Г. Ксенофонтов // Наука, технологии, общество: экологический инжиниринг в интересах устойчивого развития территорий: сборник научных трудов III Всероссийской научной конференции с международным участием (НТО-III-2022). – Красноярск: ОУ «ККДНиТ», 2022. – С. 560-570.
2. Дорошенко, В. И. Особенности связи с глубоководными подвижными морскими аппаратами / В. И. Дорошенко, Э. Л. Солнце // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2014. – № 4(26). – С. 38-42.

3. Ксенофонтов, Ю. Г. К вопросам организации и оценки эффективности беспроводной лазерной системы связи с подводными робототехническими комплексами / Ю. Г. Ксенофонтов // Достижения науки и технологий: Сборник научных статей по материалам II Всероссийской научной конференции (ДНИТ-II-2023). – Красноярск: ОУ «ККДНИТ», 2023. – С. 455-461.
4. Мартынов В. Л. Беспроводной оптический канал связи в водной среде как альтернатива связи по кабелю / В. Л. Мартынов, А. С. Голосной., С. В. Егоров // Известия Российской Академии ракетных и артиллерийских наук. – 2016. – № 4 (94). – С. 126-130.
5. Pontbriand, C. Diffuse high-bandwidth optical communications / C. Pontbriand, N. Farr, J. Ware, J. Preisig, H. Popenoe // Proceedings of Conference «Oceans, Poles and Climate: Technological Challenges». – Quebec City, QC, Canada, 2008. – P. 1-4.
6. Ishibashi, S., 1Gbps x 100m Underwater Optical Wireless Communication Using Laser Module in Deep Sea / S. Ishibashi, K.-I. Susuki // Proc. OCEANS 2022. – Hampton Roads, USA, 2022. – P. 1-7.
7. Hamza, T. Investigation of solar noise impact on the performance of underwater wireless optical communication links / T. Hamza, M.-A. Khalighi, S. Bourenane, P. Leon, J. Opderbecke // Opt. Express. – 2016. – Vol. 24. – № 22. – P. 25832-25845.