

УДК 621.391.63
<https://www.doi.org/10.47813/nto.5.2024.2001>

EDN [PDNBOE](#)

Перспективные направления развития телекоммуникационных сетей с применением подводных оптических линий связи в рамках контроля экологической обстановки морской водной среды

Ю.Г. Ксенофонов*

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

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

Аннотация. Более 75% поверхности Земли покрыто водой в виде океанов. Океаны на данный момент далеко не полностью изучены, поэтому за счет происходящих феноменальных процессов в водной среде требует дальнейших серьезных исследований. Подводная беспроводная связь UWC играет значительную роль в наблюдении за морской флорой и фауной, загрязнением вод, стихийными бедствиями, разведке нефтяных и газовых буровых установок, военно-морских тактических операциях и контроле за изменениями в водной среде. В связи с этим повсеместное внедрение UWC стало жизненно важной сферой изучения, предусматривающей различные военные и коммерческие приложения. Для передачи данных под водой сегодня широко используются акустические, оптические и радиочастотные беспроводные технические средства. Так называемый Интернет подводных вещей IoUT и развитие сетей следующего поколения 5G оказывают большое влияние на постоянное совершенствование UWC, так как направлены на увеличение скорости передачи данных, сопряжение с другими информационными сетями и повышение энергоэффективности. В статье содержатся основные предложения и рекомендации по комплексному применению существующих технологий UWC, а также рекомендации по отдельным направлениям по созданию беспроводных сетей следующего поколения для контроля экологического состояния морской водной среды.

Ключевые слова: экологический мониторинг, режим реального времени, подводная оптическая беспроводная связь, поглощение, рассеяние скорость передачи данных.

Promising directions of telecommunication networks development using underwater optical communication lines as part of environmental monitoring of the marine aquatic environment

Yu.G. Ksenofontov*

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

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

Abstract. More than 75% of the Earth's surface is covered with water in the form of oceans. The oceans are far from fully understood at the moment, therefore, due to the phenomenal processes taking place in the aquatic environment, it requires further serious research. UWC's underwater wireless communications play a significant role in monitoring marine flora and fauna, water pollution, natural disasters, oil and gas rig exploration, naval tactical operations, and monitoring changes in the aquatic environment. In this regard, the widespread introduction of UWC has become a vital area of study, involving various military and commercial applications. Acoustic, optical and radio frequency wireless equipment are widely used for underwater data transmission today. The so-called IoUT Internet of Underwater Things and the development of next-generation 5G networks have a great impact on the continuous improvement of UWC, as they are aimed at increasing data transfer rates, interfacing with other information networks and improving energy efficiency. The article contains the main proposals and recommendations for the comprehensive application of existing UWC technologies, as well as recommendations for individual areas for creating next-generation wireless networks to monitor the ecological state of the marine environment.

Keywords: environmental monitoring, real-time mode, underwater optical wireless communication, absorption, scattering, data transfer rate.

1. Введение

В связи с растущим вниманием к изучению морских водных ресурсов, защите водных объектов от загрязнения сегодня формулируются достаточно высокие требования к мониторингу параметров качества воды. В настоящее время оборудование для мониторинга водной среды, представленное на рынке относительно дорогое, к тому же масштабируемость данной техники довольно низкая. Это приводит к тому, что традиционные методы точного анализа не подходят для крупномасштабных применений исследования качества воды. Собранная информация с подводных аппаратов, либо датчиков, как правило, передается на верхний уровень по проводам, при этом расстояние сильно ограничено, и, соответственно, пользоваться такими системами неудобно. Поэтому использование современных сетевых технологий для планирования мониторинга морской водной среды чрезвычайно важно и благоразумно [1, 2].

Осуществление экологического мониторинга морской водной среды в режиме реального времени для человека в условиях длительного времени становится весьма проблематичным. Беспроводная сеть датчиков предоставляет новую концепцию в этой области, которая не только имеет более низкую стоимость и энергопотребление, но и является более удобной для контроля управления доступом к данным о состоянии водной среды [3]. Это, по сути, революционное нововведение с точки зрения функциональности и стоимости технических средств. Результаты показывают, что эффект применения таких систем мониторинга соответствует современным требованиям.

UWC – самая сложная технология беспроводной связи с применением подводных телекоммуникаций. В последние годы это стало одной из основных областей исследования среди ученых многих стран. Данные технологии стало выгодно использовать при океанографическом анализе данных, наблюдая за загрязнением воды, а также осуществляя мониторинг окружающей среды, что способствует раннему предупреждению о природных бедствиях, такие как наводнения и цунами. Данные технологии могут параллельно использоваться и для оценки повышения или снижения уровня воды в океане [4].

2. Цель исследования

Учитывая ограничения акустических и радиочастотных технологий подводная оптическая беспроводная связь (UWOC) привлекает внимание как интересное решение, предлагающее несколько преимуществ, в том числе беспрецедентно высокую скорость передачи данных (от десятков-сотен Мбит/с до десятков Гбит/с) для относительно небольших расстояний (как правило, не превышающих 200 м) благодаря широкой доступной полосе пропускания. Кроме того, из-за высокой скорости распространения оптических волн под водой оптическая передача практически не страдает от задержки сигнала. Поэтому UWOC рассматривается как привлекательное альтернативное (или потенциальное дополнительное) решение относительно акустической связи. Поскольку вода относительно прозрачна для прохождения света и поглощение принимает минимальное значение, UWOC использует видимую полосу электромагнитного спектра. Оптимальный диапазон длин волн оптического сигнала в частотном спектре составляет 490÷530 нм [5]. Моделирование и получение характеристик подводного оптического канала передачи данных является ключевым шагом для создания эффективной и, в то же время, надежной архитектуры сети UWOC, что в итоге приведет к созданию гибридной радиочастотно-акустико-оптической информационной системы UWC, способной поддерживать функции Интернета подводных вещей IoUT с использованием сетей следующего поколения 5G.

3. Методы и материалы исследования

Коэффициент поглощения оптического сигнала в чистой воде можно представить как:

$$\alpha(\lambda) < K(\lambda) - \frac{b(\lambda)}{2}, \quad (1)$$

где K обозначает коэффициент диффузии, λ – длина волны, b – коэффициент рассеяния.

Потери энергии при поглощении и рассеянии могут быть представлены через коэффициент ослабления оптического сигнала:

$$I = I_0 e^{-c(\lambda)d}, \quad (2)$$

где I_0 и I – интенсивности света на выходе передатчика и входе приемника соответственно при расстоянии d между передатчиком и приемником. Численные

значения коэффициентов спектрального поглощения $a(\lambda)$ и рассеяния $b(\lambda)$ представлены в таблице 1 [6].

Таблица 1. Численные значения коэффициентов поглощения и рассеяния в различных водных средах.

Типы воды для UWOC	$a(\text{м}^{-1})$	$b(\text{м}^{-1})$	$c(\text{м}^{-1})$
Чистая морская вода	0,053	0,003	0,056
Чистая океанская вода	0,114	0,037	0,151
Прибрежная океанская вода	0,179	0,219	0,398
Мутная припортовая вода	0,366	1,829	2,195

Необходимо отметить, что мутная припортовая вода имеет неодинаковую и достаточно высокую концентрацию взвешенных частиц, что приводит к высоким показателям коэффициентов поглощения и рассеяния по сравнению с прибрежными водами океана из-за явлений столкновения оптического луча с взвешенными частицами (таблица 1).

Поглощение и рассеяние являются двумя важнейшими факторами, которые влияют на распространение оптических волн под водой. Понять, каким образом все это происходит, можно при помощи геометрической модели водного элемента, показанной на рисунке 1.

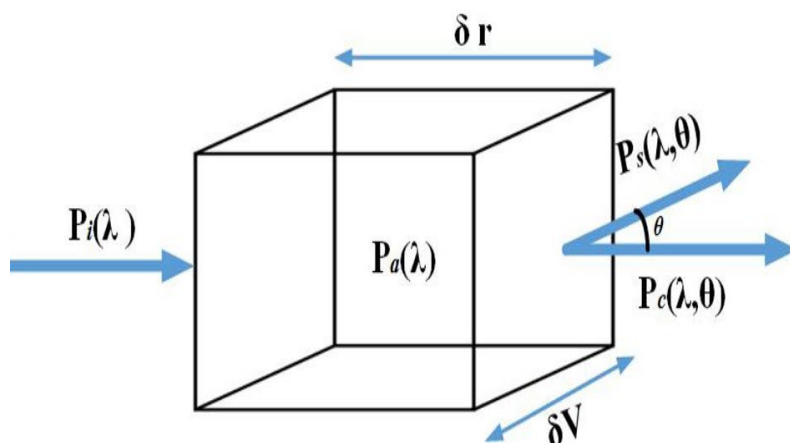


Рисунок 1. Процесс рассеяния и поглощения в подводном оптическом канале передачи данных.

Если входной луч света имеет силу P_i с длиной волны λ , малая доля падающего луча поглощается (P_a) водным элементом и образуется рассеянный луч, обозначаемый

P_s . Остальная незатронутая часть мощности входного луча P_c проходит через водный элемент, объем которого V и толщина r соответственно. Согласно закону сохранения энергии это может быть описано как:

$$P_i(\lambda) = P_a(\lambda) + P_s(\lambda) + P_c(\lambda), \quad (3)$$

Коэффициенты поглощения и рассеяния A и B определяются как отношение потребляемой мощности к мощности входного луча, и мощности рассеяния также к мощности входного луча соответственно:

$$A(\lambda) = \frac{P_a(\lambda)}{P_i(\lambda)}, \quad (4)$$

$$B(\lambda) = \frac{P_s(\lambda)}{P_i(\lambda)}, \quad (5)$$

где P_a, P_i – поглощенная и входная мощности;

P_s и P_c – мощность рассеяния и результирующая (выходная) мощность соответственно.

Коэффициент поглощения A и рассеяния B , а также r становятся бесконечно малыми, как описано в [6]:

$$a(\lambda) = \lim_{\delta(r) \rightarrow 0} \left[\frac{\delta A(\lambda)}{\delta(r)} \right] = \frac{dA(\lambda)}{dr}, \quad (6)$$

$$b(\lambda) = \lim_{\delta(r) \rightarrow 0} \left[\frac{\delta B(\lambda)}{\delta(r)} \right] = \frac{dB(\lambda)}{dr}, \quad (7)$$

Суммарное затухание коэффициента $c(\lambda)$ представлено формулой:

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda), \quad (8)$$

Таким образом, UWOC является ведущей технологией построения канала связи под водой, но имеет ограничения за счет рассеяния, дисперсии, отсутствия линии прямой связи (LOS), изменения температуры и по физико-химического состава воды.

4. Полученные результаты

Для реализации UWC сегодня используются три кастомизированных существующих доступных подхода для подводной беспроводной передачи сигнала.

Первая технология – электромагнитные волны (в форме радиочастот), которые обеспечивают функцию передачи данных с высокими скоростями в надводной части.

Вторая – передача оптического сигнала под водой для достижения высокой пропускной способности и скорости передачи данных.

Третья – это самая наиболее широко используемая технология – акустические волны, которые способны осуществлять связь на значительных расстояниях при использовании самого длинного диапазона волн. Основными недостатками акустической связи являются низкая пропускная способность и большое время задержки сигнала, что приводит к серьезным межсимвольным помехам (ISI) [7].

В вышеупомянутых технологиях наиболее важным моментом является рассмотрение вопроса о стоимости их реализации, а также использования высоких мощностей передающих устройств, которые могут оказать негативное влияние на окружающую среду.

При помощи гибридных информационных телекоммуникационных сетей UWC появляется возможность экологического мониторинга состояния, например, подводных нефте- и газопроводов. Пример такого применения UWOC представлен на рисунке 2.

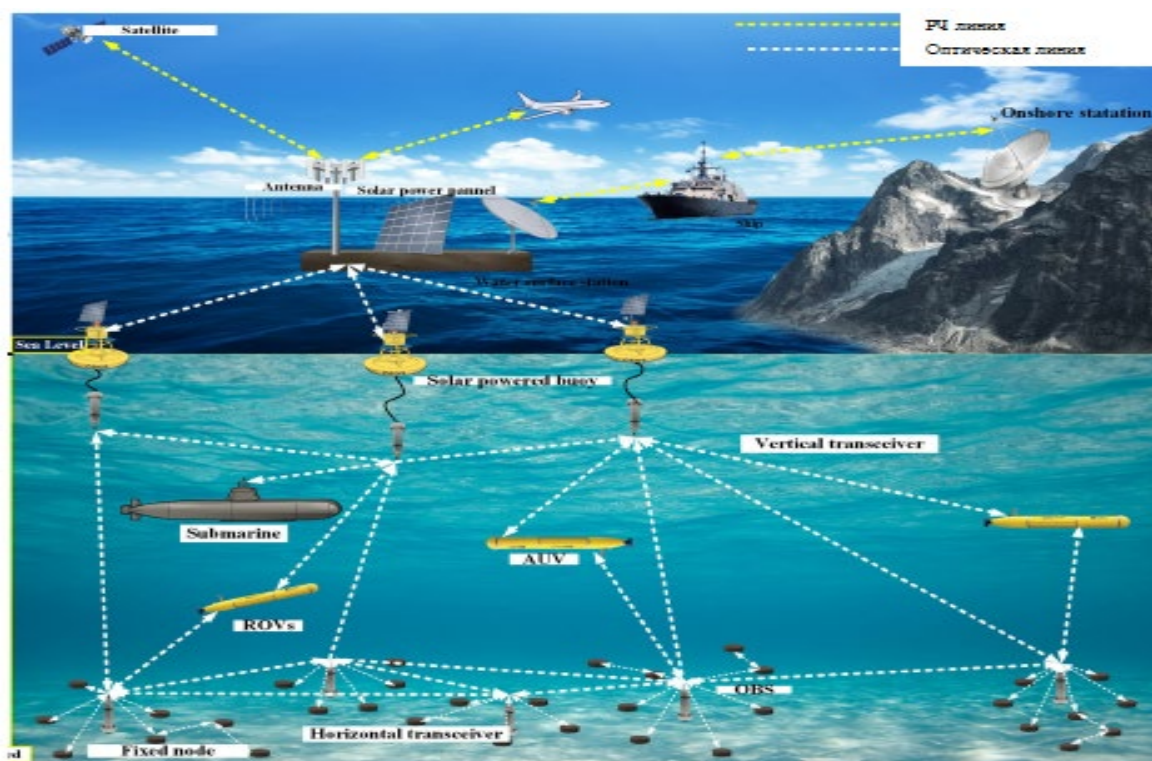


Рисунок 2. Пример гибридной радиочастотно-оптической подводной системы беспроводной передачи данных.

Предлагаемая система способна осуществлять опции, заложенные в так называемый Интернет подводных вещей IoUT, применение которого планируется уже в ближайшем будущем. Если говорить об Интернете вещей IoT, то он относится к подключенным устройствам, которые могут работать с легким доступом в информативном образе через беспроводное и проводное подключение к Интернету. IoT позволяет обмениваться данными между физическими объектами, такими как, например, компьютеры, домашние приборы с использованием прикладного программного обеспечения, специальных датчиков и исполнительных механизмов. В свою очередь, назначение IoUT – мониторинг, наблюдение за морской жизнью, обеспечение безопасности, обмен информацией, изучение природных опасностей и стихийных бедствий, исследование обширных возможностей Мирового океана. Следовательно, передача данных от подводных объектов в режиме реального времени становится сложной задачей, и решением ее является использование в будущем современных информационных платформ (рисунок 3).

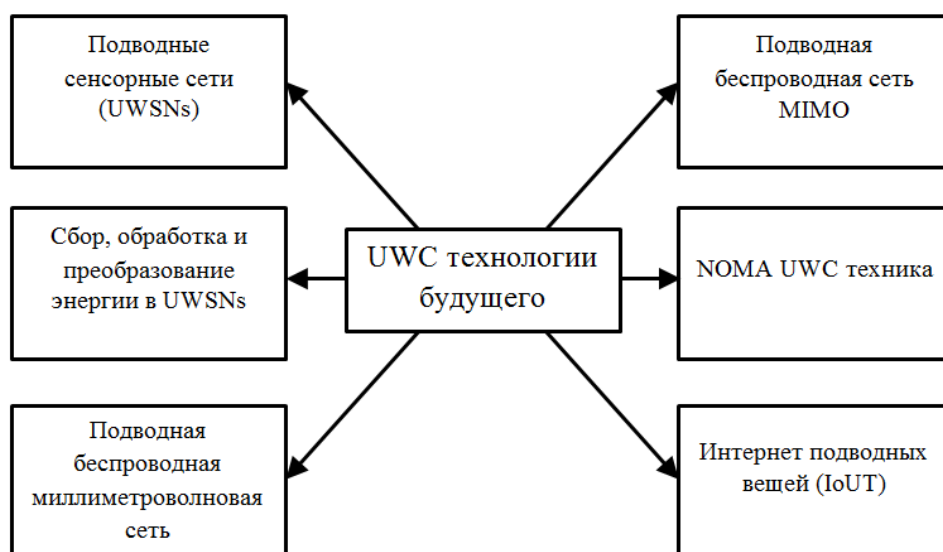


Рисунок 3. Предлагаемые направления развития подводной беспроводной связи.

Взаимосвязанные подводные технические средства передачи данных являются неотъемлемой частью IoUT, которые также способствуют улучшению QoS системы [8].

5. Выводы

Применение технологии UWC под водой открывают двери новых возможностей в будущем [9]. В частности, детальный научный подход к UWOC позволит в значительной степени повысить производительность и эффективность системы. Соответственно, радиочастотно-акустико-оптическая гибридная информационная система передачи данных в будущем обеспечит высокоскоростную передачу данных через вспомогательные роботизированные сенсорные сети.

Таким образом, благодаря IoT на базе UWC будет решаться широкий спектр подводных задач, таких как ремонт трубопровода, обнаружение сейсмических воздействий подо льдом и осуществление экологического подводного мониторинга.

Список литературы

1. Костылёв Н.М. Математическая модель распространения лазерного излучения в морской воде / Н.М. Костылёв, В.Я. Колочкин, Р.О. Степанов // Оптика и спектроскопия. – 2019. – № 127(4). – С. 558-562.
2. Мартынов В. Лазерные технологии передачи данных в водной среде в вопросах организации подводных беспроводных сетей связи / В. Мартынов, В. Дорошенко, Н. Божук, Ю. Ксенофонтов // Морские интеллектуальные технологии. Научный журнал. – 2021. – № 2(1). – С. 80-85.
3. 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. – Красноярск: Общественное учреждение «Красноярский краевой Дом науки и техники Российского союза научных и инженерных общественных объединений». – 2022. – 6. – С. 560-570. http://ru-conf.domnit.ru/media/filer_public/af/cb/afcb5df5-81bb-435f-a6e7-d32c36cf16b0/6016.pdf
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 г. – № 4(94). – С. 126-130.
5. Ксенофонтов Ю.Г. К вопросам организации и оценки эффективности беспроводной лазерной системы связи с подводными робототехническими комплексами / Ю.Г. Ксенофонтов // Достижения науки и технологий-ДНиТ-II-2023: Сборник научных статей по материалам II Всероссийской научной конференции. – Красноярск: Общественное учреждение «Красноярский краевой Дом науки и техники Российского союза научных и инженерных общественных объединений». – 2023. – 7. – С. 455-461. <https://www.doi.org/10.47813/dnit-II.2023.7.455-461>
 6. Kaushal N. Underwater optical wireless communication / N. Kaushal, G. Kaddoum // IEEE Access. – 2016. – Vol. 4. – P. 1518-1547.
 7. 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.
 8. Алиева Э.Э. Особенности архитектуры сетей следующих поколений и QoS / Э.Э. Алиева, З.Т. Магеррамов // Sciences of Europe. – 2022. – № 107. – С. 140-151.
 9. Родионов А.Ю. Перспективы использования оптических систем связи и ориентации в подводной робототехнике / А.Ю. Родионов, А.Ф. Щербатюк // Подводные исследования и робототехника. – 2021. – №. 4(38). – С. 37–49.