

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.031

## Практические аспекты построения систем беспроводной подводной оптической связи для телекоммуникационных приложений

Широков И.Б., Головин В.В., Редькина Е.А., Сердюк И.В., Овчаров П.П.

Севастопольский государственный университет, <http://www.sevsu.ru/>

Севастополь 299053, Российская Федерация

E-mail: [sbirokov@ieee.org](mailto:sbirokov@ieee.org), [vgolovin@mail.sevsu.ru](mailto:vgolovin@mail.sevsu.ru), [earedkina@mail.sevsu.ru](mailto:earedkina@mail.sevsu.ru), [ivserdyuk@mail.sevsu.ru](mailto:ivserdyuk@mail.sevsu.ru), [ppovcharov@mail.sevsu.ru](mailto:ppovcharov@mail.sevsu.ru)

Поступила 18.09.2023, рецензирована 25.09.2023, принята 02.10.2023, опубликована 15.03.2024.

Представлена действительным членом РАЕН В.В. Колесовым

**Аннотация:** В статье представлен обзор принципов организации подводной беспроводной оптической связи. Рассмотрены базовые особенности построения оптических систем связи в видимом диапазоне с применением лазерных и светодиодных излучателей, различных видов модуляции. Представлен сравнительный обзор разработок подводных беспроводных оптических систем связи на расстояниях до ста метров и со скоростями передачи данных до десятков Гбит/с. Представлен сравнительный обзор разработок подводных оптических модемов. Показано, что дальнейшей перспективой их развития является комбинирование различных методов подводной беспроводной связи и применения технологии ММО.

**Ключевые слова:** подводная оптическая связь, оптическая связь в видимом диапазоне, оптический модем для подводной связи, подводная система связи

УДК 654.026

*Для цитирования:* Широков И.Б., Головин В.В., Редькина Е.А., Сердюк И.В., Овчаров П.П. Практические аспекты построения систем беспроводной подводной оптической связи для телекоммуникационных приложений. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(1):31-42. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.031.

## Practical aspects of design of the wireless underwater optical communication system for telecommunication applications

Igor B. Shirokov, Vladislav V. Golovin, Elena A. Redkina, Igor V. Serdyuk, Pavel P. Ovcharov

Sevastopol State University, <http://www.sevsu.ru/>

Sevastopol 299053, Russian Federation

E-mail: [sbirokov@ieee.org](mailto:sbirokov@ieee.org), [vgolovin@mail.sevsu.ru](mailto:vgolovin@mail.sevsu.ru), [earedkina@mail.sevsu.ru](mailto:earedkina@mail.sevsu.ru), [ivserdyuk@mail.sevsu.ru](mailto:ivserdyuk@mail.sevsu.ru), [ppovcharov@mail.sevsu.ru](mailto:ppovcharov@mail.sevsu.ru)

Received September 18, 2023, peer-reviewed September 25, 2023, accepted October 02, 2023, published March 15, 2024.

**Abstract:** The overview of the principles of organizing underwater wireless optical communication is presented in the paper. The basic features of the optical communication system design with the usage of laser and LED emitters working in the visible range, as well as using various types of modulation, are considered. A comparative review of the developments of underwater wireless optical communication systems, operating at distances up to one hundred meters and with data transfer rates up to tens of Gbit/s, is presented. In addition, a comparative review of design of underwater optical modems is considered. It is shown, that the further prospect of their development is the combination of various methods of underwater wireless communication, including the use of MIMO technology.

**Keywords:** underwater optical communication, optical communication in the visible range, optical modem for underwater communication, underwater communication system

**UDC 654.026**

*For citation:* Igor B. Shirokov, Vladislav V. Golovin, Elena A. Redkina, Igor V. Serdyuk, Pavel P. Ovcharov. Practical aspects of design of the wireless underwater optical communication system for telecommunication applications. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(1):31-42e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.031.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (32)
2. ПОДХОДЫ К ПОСТРОЕНИЮ ПОДВОДНЫХ БЕСПРОВОДНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ (33)
3. ОБЗОР РАЗРАБОТОК ПОДВОДНЫХ VLC СИСТЕМ (35)
4. ОБЗОР РАЗРАБОТОК ПОДВОДНЫХ ОПТИЧЕСКИХ МОДЕМОВ (37)
5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (38)

## ЛИТЕРАТУРА (38)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В современных телекоммуникационных системах для организации беспроводной подводной связи применяют следующие несколько подходов.

*Акустическая подводная связь (UAWC)*, которая считается самым популярным методом подводной беспроводной связи, так как затухание под водой акустических волн составляет 0.1-4 дБ/км. К недостаткам относятся низкая скорость распространения акустических волн (1500 м/с) и ограниченная полоса пропускания UAWC (кГц), что приводит к явлению многолучевости, большой временной задержке и громоздким акустическим антеннам [1]. Например, в [2] рассматривается система UAWC со скоростью передачи данных 60 Кбит/с, использующая 32 QAM, которая может поддерживать связь на глубине 100 м и на расстоянии 3 км по горизонтали. Чтобы достичь больших скоростей передачи данных без необходимости сложных вычислений, многие исследователи широко использовали мультиплексирование с ортогональным частотным разделением (OFDM) в подводной акустической связи [3].

*Подводная радиосвязь (URWC)* позволяет организовать высокоскоростную передачу данных на небольших расстояниях. На электромагнитные волны влияют температура, соленость и глубина, что приводит к сильному ослаблению электромагнитных волн и

ограничивает дальность распространения сигнала в воде. Благодаря высокой электропроводности воды на СВЧ трудно реализовать URWC на трассах протяженностью более 10 м [4] в диапазонах метровых и более коротких волн (в диапазоне 2.4 ГГц затухания радиоволн в соленой воде составляют около 169 дБ/м), при этом требуется большая мощность передатчиков (более 100 Вт) [5]. В диапазонах ДВ (30-300 КГц) и СДВ (3-30 КГц) ослабление электромагнитной волны может рассматриваться как достаточно низкое, чтобы обеспечить надежную связь на расстоянии многих километров. URWC диапазона ДВ применяются в подводных военных системах или при создании линий связи между наземными и подводными объектами [6]. К основным недостаткам таких систем относятся сложные требования к конструкции очень больших антенн и низкие скорости передачи данных.

*Подводная связь с помощью магнитной индукции (UWMIС)*, как многообещающая замена традиционных акустических систем и радиосвязи привлекла значительное внимание [7]. Это объясняется присущими ей качественной амплитудно-частотной характеристикой канала, малой задержкой распространения и относительно небольшим потреблением энергии [8]. Предполагает переход от традиционных однонаправленных антенн к разнонаправленным MI-антеннам. Существует также большой исследовательский интерес к имеющимся в настоящее время подходам к расширению или повторному использованию доступных полос частот для увеличения пропускной способности подводного канала MI [7].

*Подводная оптическая связь (UOWC)* основана на использовании видимого участка оптического спектра. UOWC характеризуется большой доступной полосой

пропускания, что позволяет реализовать высокие скорости передачи данных, обладает преимуществами низкого энергопотребления, низкой стоимости и компактных размеров. Сложная подводная среда оказывает серьезное влияние на распространение света под водой. Поглощение, рассеяние и турбулентность являются доминирующими вредными эффектами, которые ухудшают характеристики оптической передачи при низких температурах. Подводная передача оптических волн в полосе 450-500 нм (синий и зеленый) имеет наименьшее затухание для чистой морской воды или прозрачного океана (0.4 дБ/м) по сравнению с другими полосами, в этой полосе ограничен эффект ослабления, вызванный взаимодействием фотонов с молекулами воды и другими частицами. Полоса 520-570 нм (желто-зеленая) подходит для прибрежных океанских или мутных портовых вод (11 дБ/м).

В подводной среде такие вещества, как хлорофилл, поглощают синий и красный свет. Эти и другие окрашенные растворенные органические вещества (CDOM) усиливают мутность воды и уменьшают расстояние распространения света. Концентрация CDOM изменяется в зависимости от глубины водной среды, тем самым изменяются соответствующие коэффициенты ослабления света. Суммарное поглощение в морской воде может быть определено с учетом комплекса факторов по формуле [9]

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_f c_f \exp(-k_f \lambda) + a_h c_h \exp(-k_h \lambda) + a_c (c_c)^{0.622},$$

где  $a_w(\lambda)$  – коэффициент поглощения в чистой воде;  $a_f$  – частные коэффициенты поглощения

фульвовых кислот;  $c_f$  – концентрация фульвовых кислот;  $k_f$  – экспоненциальный коэффициент фульвовых кислот;  $a_h$  – коэффициент поглощения гумусовой кислоты;  $c_h$  – концентрация гумусовой кислоты;  $k_h$  – экспоненциальный коэффициент гумусовой кислоты;  $a_c$  – коэффициент поглощения хлорофилла;  $c_c$  – концентрация хлорофилла.

Из-за сложности водной среды внедрение систем UOWC требует надежных подводных устройств. На производительность и срок службы устройств UOWC в значительной степени оказывают влияние течение, температурное давление и соленость морской воды, а энергопотребление передатчика системы с учетом емкости аккумуляторов определяет время автономной работы.

Основным недостатком оптической связи является то, что дальность действия ограничена дистанцией около 1-100 метров. Это ограничение определяется параметрами воды и взвешенными частицами в воде, где свет либо ослабляется, либо рассеивается. Другим недостатком является то, что оптическая связь обычно требует прямой видимости от передатчика к приемнику.

На **Рис. 1** показано обобщенное сравнение доступных технологий беспроводной подводной связи [10].

Поэтому большой практический интерес представляет обобщение результатов разработок UOWC для систем связи и передачи информации.

## 2. ПОДХОДЫ К ПОСТРОЕНИЮ ПОДВОДНЫХ БЕСПРОВОДНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

На практике для организации беспроводной подводной оптической связи широкое

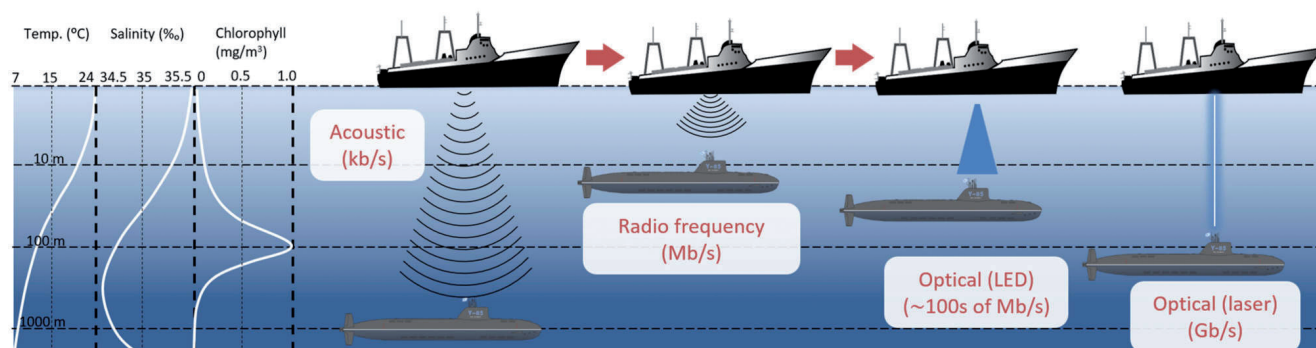


Рис. 1. Сравнение доступных технологий беспроводной подводной связи.

применение находит технология "оптической связи в видимом диапазоне" (VLC), как наиболее перспективная. В связи с быстрым развитием светодиодного освещения стоимость компонентов снижается; однако ниже перечислены некоторые из проблем, которые необходимо решить:

- интеграция системы VLC с существующими стандартами связи;
- проблема с помехами от источника окружающего света;
- VLC должен корректно поддерживать передачу обслуживания в зонах покрытия (handover);
- применение методов исправления ошибок для повышения производительности системы связи.

По мере увеличения числа устройств VLC будут возникать помехи между различными устройствами VLC. Ассоциация индустрии электронных информационных технологий разработала стандарт 802.15.7, который является стандартом, установленным IEEE для физического уровня и уровня MAC [11]. Целями настоящего стандарта являются:

- обеспечение доступа к сотням терагерцевых диапазонов частот;
- обеспечение защиты от электромагнитных помех;
- предоставление дополнительных услуг, дополняющих существующее оборудование видимого света;
- VLC-связь, которая предписывает схему прямой коррекции ошибок (FEC), форму модуляции и скорость передачи данных;
- механизм доступа к каналу, поскольку поддержка дальности видимости также описывает доступ к каналу, а также период времени, когда разрешена конкуренция за сетевую среду (contention access period, CAP) и период времени, свободный от конкуренции (CFP);
- технические характеристики физического уровня: оптическая проекция, время цикла TX-RX, RX-TX, мерцание и уменьшение яркости.

Тремя различными типами устройств, используемых VLC, являются подвижные объекты, мобильное оборудование и

инфраструктура [12]. VLC применяются внутри помещений [13,14], в системах идентификации и определения местоположения [15], в системах связи в транспорте [16] и для организации беспроводных каналов подводной связи [17].

VLC система в основном состоит из двух компонентов: оптического передатчика (Tx) и оптического приемника (Rx). После предварительной обработки и кодирования поток двоичных битов напрямую моделирует излучение источника света. Для увеличения скорости передачи и эффективности спектра используются методы кодирующей модуляции высокого порядка.

Реализация протяженных и высокоскоростных подводных трасс с применением в качестве источника оптического излучения лазерных диодов (LD) рассматривалась в ряде работ [18,19]. Однако вследствие узкой диаграммы направленности LD в подводной среде возникают проблемы с позиционированием приемного и передающего тракта. При этом применяется дополнительное расширение луча или другие решения для сохранения требуемых технических характеристик UOWC.

Поэтому наиболее распространенным вариантом источников излучения в структуре UOWC являются светоизлучающие диоды (LED) [20], которые обеспечивают множество преимуществ: безопасность для глаз, длительный срок службы, низкое энергопотребление, возможность одновременного освещения и связи. Так как LED характеризуются широкой диаграммой направленности, то решают проблему позиционирования, что позволяет использовать более простые и компактные системы UOWC. Большие углы расхождения и относительно малая частотная полоса модуляции LED ограничивает их применение по дальности и скорости передачи данных: например, для связи между подводными аппаратами и узлами подводных беспроводных сенсорных сетей и т.п.

Сравнение характеристик LD и LED, используемых в VLC, представлено в **Таблице 1**.

Таблица 1

Сравнение характеристик LD и LED, используемых в VLC

Источник света	Поперечные размеры, мм <sup>2</sup>	Полоса модуляции	Мощность, Вт
LED	0.1-1	~ 10 МГц	> 1
LD	< 0.2	10-20 ГГц	> 1

Для повышения эффективности использования полосы модуляции LED принято исследовать методы цифровой компрессии спектра сигнала, например за счет квадратурной амплитудной модуляции (QAM) и мультиплексирования с ортогональным частотным разделением (OFDM) [21]. Также применяются следующие виды модуляции:

– многоуровневая амплитудно-импульсная модуляция (PAM), которая отличается более простой структурой, более гибкой реализацией и меньшей вычислительной сложностью [22];

– амплитудная манипуляция без возвращения к нулю (NRZ-OOK) – наиболее интуитивно понятная и простая схема модуляции, подходящей для световой связи;

– фазово-импульсная модуляция (PPM);

– частотная манипуляция (FSK);

– цифровая интервальная модуляция импульсов (digital pulse interval modulation, DPIM) – это метод изохронной импульсно-временной модуляции, при котором данные кодируются в виде ряда дискретных временных интервалов, или интервалов времени между соседними импульсами. Длина символа является переменной и определяется информационным содержанием символа. Чтобы избежать символов, в которых время между соседними импульсами равно нулю, к каждому символу, непосредственно следующему за импульсом, может быть добавлен дополнительный защитный интервал.

При модификации модуляций применяется дискретная многотоновая передача (Discrete multitone transmission, DMT) [23].

Ключевым элементом приемного тракта VLC системы является фотодетектор, преобразующий энергию принятого оптического излучения в фототок. В приемниках VLC используются различные типы фотодиодов:

– полупроводниковый pin-фотодиод (PIN PD): быстродействующие контактные фотодиоды обладают быстрым временем реакции, низкой стоимостью, единичным коэффициентом усиления и высокой устойчивостью к окружающему свету; основной тип шума – тепловой;

– лавинный фотодиод (APD): обладает высоким собственным коэффициентом усиления по току и высокой квантовой эффективностью (70-90%); основной тип шума – дробовый; требует высокого напряжения смещения, сложных схем управления; квантовая эффективность APD зависит от толщины материала, например, в диапазоне 400-500 нм кремний обладает очень низкой чувствительностью, поэтому контактный фотодиод представляется более перспективной технологией на более коротких длинах волн, чем APD для системы UOWC [12];

– фотоумножитель (PMT) – это тип вакуумной лампы, которая очень чувствительна к свету, обладает большим усилением фототока, низким уровнем шума, высокочастотной характеристикой и большими габаритными размерами по сравнению с фотодиодами; требуют высокого напряжения питания (порядка 100 В) и имеют высокую стоимость, также имеют хрупкую конструкцию.

Основные требования, предъявляемые к фотоприемникам в системе VLC:

- высокая квантовая эффективность; при определенной падающей оптической мощности выходной фототок может быть настолько большим, насколько это возможно;
- достаточно высокая скорость отклика для использования в высокоскоростной широкополосной системе;
- уровень шума должен быть как можно ниже;
- низкий уровень нелинейных искажений;
- небольшой размер и длительный срок службы.

### 3. ОБЗОР РАЗРАБОТОК ПОДВОДНЫХ VLC СИСТЕМ

Проведем сравнительный анализ характеристик различных вариантов построения VLC систем, предназначенных для организации UOWC.

Сравнение характеристик VLC систем, передающий тракт которых реализован

Таблица 2

Сравнение характеристик VLC систем, передающий тракт которых реализован на основе лазерных диодов

Источник	Фото-детектор	Модуляция	Дистанция, м	Скорость передачи данных, Гбит/с	Ссылка
Лазерный диод (LD)	Лавинный фотодиод	NRZ-OOK	7	2.3	[24]
		PSK/QAM	64	5	[25]
			8	1	
		QAM-OFDM	5.4	4.8	[26]
		OAM-OOK	2.96	3	[27]
		OOK	20	1.5	[28]
		OFDM	1.7	14.8	[29]
		NRZ-OOK	34.5	2.7	[30]
	OFDM	21	5.5	[31]	
	NRZ-OOK	34.5	2.7	[32]	
PIN-фотодиод	16-QAM	3	0.05	[33]	
	OOK	1.6	0.1	[34]	

на основе лазерных диодов, показано в Таблице 2.

Сравнение характеристик VLC систем, передающий тракт которых реализован на основе светоизлучающих диодов, показано в Таблице 3.

Анализ последних публикаций показывает, что сегодня все чаще при построении передающих модулей UOWC применяют решетки LED [50]. Светодиодные решетки с увеличенной оптической мощностью могут обеспечить достаточно большую дальность передачи данных под водой. Кроме того, светодиодные решетки с относительно большим световым пятном в плоскости приема позволяют уменьшать влияние турбулентностей и неоднородностей в канале UOWC.

Характерный пример структурной схемы приемно-передающего модуля VLC системы UOWC [50] показан на Рис. 2.

В зависимости от количества LED в решетке, их соединяют последовательно, параллельно или комбинированным способом. В последовательной линейке обычно включают не более 10 LED.

Сегодня для повышения надежности систем UOWC все более широко применяется технология multiple-input multiple-output (MIMO) [51]. Системные характеристики беспроводной оптической связи MIMO с

Таблица 3

Сравнение характеристик VLC систем, передающий тракт которых реализован на основе светоизлучающих диодов

Тип передатчика	Тип приемника	Модуляция	Дистанция, м	Скорость передачи данных, Гбит/с	Ссылка
521 нм LED	2 PIN PD	64-QAM-DMT	1.2	2,175 Гбит/с	[35]
470 нм LEDarray	PMT	OOK	8	19 Гбит/с	[36]
RGBYC LED	PIN PD	64QAM-DMT bit-loading-DMT	1.2	14.81-15.17 Гбит/с	[37]
Blue LED	PIN PD	64 QAM DMT	1.2	3.075 Гбит/с	[38]
Blue LED	MPPC	PPM	46	~ МГц	[39]
458 нм LED	PIN PD array (2x2)	32 QAM DMT	1.2	20.09 Гбит/с	[40]
LED (4x4) array	PIN PD	P S - b i t loading DMT	1.2	20.09 Гбит/с	[41]
450 нм LED	PIN PD	16 Q A M OFDM	3	50 Мбит/с	[42]
450 нм LED array	APD	Видеотрансляция	10	1 Мбит/с	[43]
450 нм LED	APD	PAM4	5	1.25 Гбит/с	[44]
450 нм LED	APD	GS-8QAM OFDM	3.6	2,2 Гбит/с	[45]
448 нм LED	APD	OOK	118	25 Мбит/с	[46]
480 нм LED	APD	DPIM	30	1,2 Мбит/с	[47]
470 нм LED	APD	DPIM	50	2,28 Мбит/с	[48]
Blue LED	APD	NRZ-OOK	11.5	235 Мбит/с	[49]
445 нм LED	APD	2FSK	14.5	1 Мбит/с	[50]

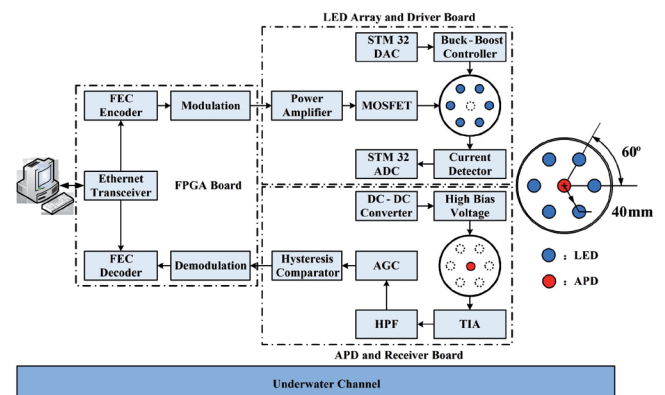


Рис. 2. Структурная схема приемно-передающего модуля VLC системы UOWC.

использованием пространственной модуляции (SM-OMIMO) в OWC свободного пространства [52] и беспроводной среде внутри помещений [53] уже были изучены. Было показано, что SM достигает улучшенной спектральной эффективности и более устойчива к высокой корреляции каналов по сравнению с обычным MIMO, использующим код с повторениями [51]. Кроме того, SM обладает преимуществом реализации, поскольку для него требуется только алгоритм обнаружения низкой сложности [54].

Однако для UOWC все еще не ясно, в какой степени методы SM-OMIMO могут обеспечить выигрыш, это связано с тем, что затухание канала будет более серьезным в подводной среде.

Используя типовой алгоритм распределения равной мощности (РАА) [55], приемники могут только определять интенсивность сигналов, но не могут определить положение активированного передатчика. Чтобы свести на нет ограничения, связанные с высокими корреляциями каналов, недавно была введена технология дисбаланса мощности (PI) на передатчиках. В [56] предложено оптимальное распределение мощности для пространственно модулированной системы VLC с OFDM для случая простой структуры MIMO с двумя передатчиками. В [57] получены выражения для коэффициента распределения мощности для четырех передатчиков. В большинстве последних литературных источников, относящихся к системе SM, используется простая схема амплитудно-импульсной модуляции, включающая ООК [55] и амплитудно-импульсную модуляцию (PAM) [57]. В [58] рассмотрена UOWC MIMO, использующая пространственную модуляцию (SM-UOMIMO) и флаговую двухамплитудную импульсную позиционную модуляцию (FDAPM) [59].

#### 4. ОБЗОР РАЗРАБОТОК ПОДВОДНЫХ ОПТИЧЕСКИХ МОДЕМОВ

Практическое воплощение различных подходов построения приемо-передающего оборудования UOWC с учетом существующих

протоколов передачи данных представлено на рынке подводных оптических модемов. Сравнительные характеристики разработок подводных оптических модемов представлены в **Таблице 4**.

Перспектива развития модемов подводной связи связана с комбинированием двух или более различных методов подводной связи. Этот подход часто используется для океанской швартовки с датчиками на якорном тресе и беспроводной сотовой связью. Гибридные системы могут использовать преимущества каждого метода и, следовательно, повышать надежность системы. Сегодня одной из наиболее важных задач, стоящих перед гибридными системами, является адаптивный и плавный переход от одной среды связи к другой, что делает систему более сложной и требует протоколы и алгоритмы для понимания окружающей среды в гибридной системе [71]. Многие подводные транспортные средства использовали гибридные системы связи, которые включали как акустические, так и оптические системы [72]. Выбирая соответствующие каналы связи в ответ на изменяющуюся транспортную нагрузку и погодные условия, в [73] представлена гибридная оптико-акустическая подводная система беспроводной связи, которая

**Таблица 4**  
Сравнительные характеристики разработок  
подводных оптических модемов

Организация	Источник света	Скорость передачи данных	Дистанция, м	Ссылка
WHOI (2005)	LEDs	10 Мбит/с	100	[60]
Laurentian Univ. (2009)	LED	1 Гбит/с	20	[61]
MIT (2010)	LEDs	2.28 Гбит/с	50	[62]
Maritime Technology and Research (2017)	LD	100 Мбит/с	2	[63]
Dalian Univ. Of Technology (2018)	LD	100 Мбит/с	4.8	[64]
Tsinghua Univ. (2018)	LED	235 Мбит/с	11.5	[49]
MIT Lincoln Lab. (2019)	LED	1 Гбит/с	20	[65]
Sonardyne (2019)	LEDs	10 Мбит/с	150	[66]
Nanjing Univ. of Posts and Telecommunications (2020)	LEDs	1 Мбит/с	10	[67]
KAUST (2020)	LD	1.2 Мбит/с	2	[68]
KAUST (2021)	LED	1.5 Мбит/с	0.6	[69]
KAUST (2022)	LED	2.5 Мбит/с	5	[70]

минимизирует энергопотребление сети и обеспечивает высокую скорость передачи данных в подводных приложениях. По сравнению с обычными оптико-акустическими методами предлагаемый подход позволяет экономить до 35% электроэнергии.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для организации подводных беспроводных телекоммуникационных систем широко применяются оптические технологии VLC, которые предоставляют уникальные возможности высокоскоростной связи, в том числе для организации работы перспективных подводных сетей Интернета вещей. Развитая компонентная оптическая база (лазеры, светодиоды и различные типы фотодиодов) хорошо адаптирована для решения задач построения UOWC с применением VLC технологий и позволяет найти наиболее эффективные комбинации для реализации различных технических задач. Разнообразные виды цифровой модуляции, помехозащищенное кодирование и технологии MIMO позволяют значительно повысить эффективность использования полосы частот каналов связи, надежность передачи данных на больших расстояниях при различных состояниях канала связи по прозрачности, неоднородности, содержанию различных органических веществ и т.п. Современные UOWC позволяют получить скорости передачи данных от единиц Мбит/с до десятков Гбит/с на расстояниях от нескольких до сотен метров. Многочисленные исследования в области разработки VLC для различных UOWC определили производство и активное совершенствование подводных оптических модемов со скоростями передачи данных от 1 Мбит/с до 2 Гбит/с на расстояниях до 150 м. Дальнейшее развитие подводных модемов связано с комбинированным применением различных методов подводной связи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Zeng Z, Fu S, Zhang H, Dong Y, Cheng J. A survey of underwater optical wireless communications. *IEEE Commun. Surv. and Tutorials*, 2017, 19(1):204-238.
2. Song HC, Hodgkiss WS. Efficient use of bandwidth for underwater acoustic communication. *Acoust. Soc. Am.*, 2013, 134: 905-908. DOI: 10.1121/1.4812762.
3. Frassati F, Lafon C, Laurent P-A, Passerieux J-M. Experimental assessment of OFDM and DSSS modulations for use in littoral waters underwater acoustic communications. *Proc. Europe Oceans Conference*, 2005: 826-831. DOI: 10.1109/OCEANSE.2005.1513163.
4. Gussen CM, Diniz PSR, Campos MLR, Martins WA, Costa FM, Gois JN, Commun J. A Survey of Underwater Wireless Communication Technologies. *Inf. Sys.*, 2016, 31:242-255. DOI: 10.14209/jcis.2016.22.
5. Al-Shamma'a AI, Shaw A, Saman S. Propagation of electromagnetic waves at MHz frequencies through seawater. *IEEE T. Antennas Propag.*, 2004, 52:2843-2849. DOI: 10.1109/TAP.2004.834449.
6. Clam L. Extremely Low Frequency Transmitter Site Clam Lake. The United State Navy. *Navy fact file. Tech. Rep.*, Wisconsin, 2001. [Online] Available: [https://nuke.fas.org/guide/usa/c3i/fs\\_clam\\_lake\\_elf2003.pdf](https://nuke.fas.org/guide/usa/c3i/fs_clam_lake_elf2003.pdf), access data 09.08.2023.
7. Li Y, Wang S, Jin C, Zhang Y, Jiang T. A Survey of Underwater Magnetic Induction Communications: Fundamental Issues, Recent Advances, and Challenges. *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 2019, 21:2466-2487. DOI: 10.1109/COMST.2019.2897610.
8. Arunkumar K, Murthy CR. Soft Symbol Decoding in Sweep-Spread-Carrier Underwater Acoustic Communications: A Novel Variational Bayesian Algorithm and Its Analysis. *IEEE Trans. Signal Process.*, 2020, 68:2435-2448. DOI: 10.1109/TSP.2020.2983830.
9. Shherbakov AV, Petruhin GD, Miroshnikova NE, Titovets PA. Estimation of underwater optical communication link operating distance. *Communications*, 2020, 14(3):53-60. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-3-54-60.
10. Guo Y, Kong M, Alkhazragi O, Sait MA, Kang CH, Ashry I, Yang Q, Ng TK, Ooi BS. Current Trend in Optical Internet of Underwater Things. *IEEE Photonics J.*, 2022, 14(5):1-14. DOI: 10.1109/JPHOT.2022.3195700.
11. IEEE Approved Draft Standard for Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible



- Light. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=6016193>, access data 09.08.2023.
12. Dimitrakopoulos G, Demestichas P. Intelligent transportation systems. *IEEE Veh. Technol. Mag.*, 2010, 5:77-84.
  13. Vuc'ic J, Kottke C, Nerreter S, Langer K-D, Walewski JW. 513 Mbit/s Visible Light Communications Link Based on DMT-Modulation of a White LED. *J. Lightwave Technol.*, 2010, 28:3512-3518.
  14. Chang C-H, Li C-Y, Lu H-H, Lin C-Y, Chen J-H, Wan Z-W, Cheng C-J. A 100-Gb/s Multiple-Input Multiple-Output Visible Laser Light Communication System. *J. Lightwave Technol.*, 2014, 32:4121-4127.
  15. Do T-H, Yoo M. An in-Depth Survey of Visible Light Communication Based Positioning Systems. *Sensors*, 2016, 16(5):40. DOI: 10.3390/s16050678.
  16. Căilean A, Dimian M. Current Challenges for Visible Light Communications Usage in Vehicle Applications: A Survey. *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 2017, 19:2681-2703.
  17. Kaushal H, Kaddoum G. Underwater Optical Wireless Communication. *IEEE Access*, 2016, 4:1518-1547.
  18. Al-Halafi A, Oubei HM, Ooi BS, Shihada B. Real-time video transmission over different underwater wireless optical channels using a directly modulated 520 nm laser diode. *J. Opt. Commun. Netw.*, 2017, 9(10):826-832.
  19. Liu X, Yi S, Zhou X, Fang Z, Qiu ZJ, Hu L, Cong C, Zheng L, Liu R, Tian P. 34.5 m underwater optical wireless communication with 2.70 Gbps data rate based on a green laser diode with NRZ-OOK modulation. *Opt. Express*, 2017, 25(22):27937-27947.
  20. Xu J, Kong M, Lin A, Song Y, Yu X, Qu F, Han J, Deng N. OFDM-based broadband underwater wireless optical communication system using a compact blue LED. *Opt. Commun.*, 2016, 369:100-105.
  21. Xu J, Song Y, Yu X, Lin A, Kong M, Han J, Deng N. Underwater wireless transmission of high-speed QAM-OFDM signals using a compact red-light laser. *Opt. Exp.*, 2016, 24(8):8097-8109.
  22. Szczerba K, Westbergh P, Karout J, Gustavsson J, Haglund Å, Karlsson M, Andrekson P, Agrell E, Larsson A. 30 Gbps 4-PAM transmission over 200 m of MMF using an 850 nm VCSEL. *Opt. Exp.*, 2011, 19(26):B203-B208.
  23. Hoehner PA. *Visible Light Communications. Theoretical and Practical Foundations*. Munich, Hanser Publishers, 2019: 95-100.
  24. Oubei HM, Li C, Park KH, Ng TK, Alouini MS, Ooi BS. 2.3 Gbit/s underwater wireless optical communications using directly modulated 520 nm laser diode. *Opt. Exp.*, 2015, 23(16):20743-20748.
  25. Nakamura K, Mizukoshi I, Hanawa M. Optical wireless transmission of 405 nm, 1.45 Gbit/s optical IM/DD-OFDM signals through a 4.8 m underwater channel. *Opt. Exp.*, 2015, 23(2):1558-1566.
  26. Oubei et al. HM. 4.8Gbit/s 16-QAM-OFDM transmission based on compact 450-nm laser for underwater wireless optical communication. *Opt. Exp.*, 2015, 23(18):23302-23309.
  27. Baghdady J, Miller K, Morgan K, Byrd M, Osler S, Ragusa R, Li W, Cochenour BM, Johnson EG. Multi-gigabit/s underwater optical communication link using orbital angular momentum multiplexing. *Opt. Exp.*, 2016, 24(9):9794.
  28. Shen C, Guo Y, Oubei HM, Ng TK, Liu G, Park K-H, Ho K-T, Alouini M-S, Ooi BS. 20-meter underwater wireless optical communication link with 1.5 Gbps data rate. *Opt. Exp.*, 2016, 24(22):25502.
  29. Huang Y-F, Tsai C-T, Chi Y-C, Huang D-W, Lin G-R. Filtered Multicarrier OFDM Encoding on Blue Laser Diode for 14.8-Gbps Seawater Transmission. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(9):1739-1745.
  30. Liu X, Yi S, Zhou X, Fang Z, Qiu Z-J, Hu L, Cong C, Zheng L, Liu R, Tian P. 34.5 m underwater optical wireless communication with 2.70 Gbps data rate based on a green laser diode with NRZ-OOK modulation. *Opt. Exp.*, 2017, 25:27937-27947.
  31. Chen Y, Kong M, Ali T, Wang J, Sarwar R, Han J, Guo C, Sun B, Deng N, Xu J. 26 m/5.5 Gbps air-water optical wireless communication based on an OFDM-modulated 520-nm laser diode. *Opt. Exp.*, 2017, 25:14760-14765.
  32. Liu X, Yi S, Zhou X, Fang Z, Qiu ZJ, Hu L, Cong C, Zheng L, Liu R, Tian P. 34.5 m underwater optical wireless communication with 2.70

- Gbps data rate based on a green laser diode with NRZ-OOK modulation. *Opt. Exp.*, 2017, 25(22):27937-27947.
33. Wang J, Tian C, Yang X, Shi W, Niu Q, Gulliver TA. Underwater wireless optical communication system using a 16-QAM modulated 450-nm laser diode based on an FPGA. *Applied Opt.*, 2019, 58(16):4553-4559.
34. Li Y, Yin H, Ji X., Wu B. Design and implementation of underwater wireless optical communication system with high-speed and full-duplex using blue/green light. *Proc. Int. Conf. Commun. Softw. Netw.*, 2018, Chengdu, China: 99-103.
35. Wang F, Liu Y, Jiang F, Chi N. High speed underwater visible light communication system based on LED employing maximum ratio combination with multi-PIN reception. *Opt. Commun.*, 2018, 425:106-112. DOI: 10.1016/j.optcom.2018.04.073.
36. Han B, Zhao W, Zheng Y, Meng J, Wang T, Han Y, Wang W, Su Y, Duan T, Xie X. Experimental demonstration of quasi-omni-directional transmitter for underwater wireless optical communication based on blue LED array and freeform lens. *Opt. Commun.*, 2019, 434:184-190.
37. Zhou Y, Zhu X, Hu F, Shi J, Wang F, Zou P, Liu J, Jiang F, Chi N. Common-anode LED on a Si substrate for beyond 15 Gbit/s underwater visible light communication. *Photon. Res.*, 2019, 7(9):1019-1029. DOI: 10.1364/PRJ.7.001019.
38. Wang F, Liu Y, Shi M, Chen H, Chi N. 3.075 Gb/s underwater visible light communication utilizing hardware pre-equalizer with multiple feature points. *Opt. Eng.*, 2019, 58:056117. DOI: 10.1117/1.OE.58.5.056117.
39. Shen J, Wang J, Yu C, Chen X, Wu J, Zhao M, Qu F, Xu Z, Han J, Xu J. Single LED-based 46-m underwater wireless optical communication enabled by a multi-pixel photon counter with digital output. *Opt. Commun.*, 2019, 438:78-82. DOI: 10.1016/j.optcom.2019.01.031.
40. Li J, Wang F, Zhao M, Jiang F, Chi N. Large-coverage underwater visible light communication system based on blue LED employing equal gain combining with integrated PIN array reception. *Appl. Opt.*, 2019, 58:383-388. DOI: 10.1364/AO.58.000383.
41. Hu F, Li G, Zou P, Hu J, Chen S, Liu Q, Zhang J, Jiang F, Wang S, Chi N. 20.09-Gbit/s Underwater WDM-VLC Transmission based on a single Si/GaAs-substrate Multichromatic LED array chip. *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC)*, 2020, San Diego, California.
42. Wang J, Tian C, Yang X, Shi W, Niu Q, Gulliver AT. Underwater wireless optical communication system using a 16-QAM modulated 450-nm laser diode based on an FPGA. *Appl. Opt.*, 2019, 58(16):4553-4559. DOI: 10.1364/AO.58.004553.
43. Sait M, Guo Y, Alkhazragi O, Kong M, Ng TK, Ooi BS. The impact of vertical salinity gradient on non-line-of-sight underwater optical wireless communication. *IEEE Photon. J.*, 2021, 13(6), Art. no. 7300609. DOI: 10.1109/JPHOT.2021.3121169.
44. Di Y, Shao Y, Chen L-K. Real-time wave mitigation for water-air OWC systems via beam tracking. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2022, 34(1):47-50.
45. Shao Y, Deng R, He J, Wu K, Chen L-K. Real-time 2.2-Gb/s water-air OFDM-OWC system with low-complexity transmitter-side DSP. *J. Lightw. Technol.*, 2020, 38(20):5668-5675.
46. Wang P, Li C, Xu Z. A cost-efficient real-time 25Mb/s system for LED-UOWC: Design, Channel Coding, FPGA implementation, and Characterization. *J. Lightw. Technol.*, 2018, 36(13):2627-26378.
47. Doniec M, Detweiler C, Vasilescu I, Chitre M, Hoffmann-Kuhnt M, Rus D. AquaOptical: a lightweight device for high-rate long-range under-water point-to-point communication. *Proc. OCEANS*, 2009, USA, Biloxi, MS:1-6.
48. Doniec MW, Rus D. Bidirectional optical communication with AquaOptical II. *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. Syst. (ICCS)*, 2010, Singapore, pp. 390-394.
49. Wei Z, Mu X, Fu H. Wearable full-duplex digital transceiver for underwater optical wireless communications. *Proc. Conf. on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim*, 2018, China, Hong Kong, 2018. DOI: 10.1364/CLEOPR.2018.W3A.153.
50. Li J, Yang B, Ye D, Wang L, Fu K, Piao J, Wang Y. A Real-time, Full-duplex System for Underwater Wireless Optical Communication: Hardware Structure and Optical Link Model. *IEEE Access*, 2017, 8:17.

51. Song Y, Lu W, Sun B, Hong Y, Qu F, Han J, Zhang W, Xu J. Experimental demonstration of MIMO-OFDM underwater wireless optical communication. *Opt. Commun.*, 2017, 403:205-210.
52. Renzo MD, Haas H, Ghayeb A, Sugiura S, Hanzo L. Spatial modulation for generalized MIMO: Challenges, opportunities and implementation. *Proc. IEEE*, 2013, 102(1):56-103.
53. Popoola WO, Poves E, Haas H. Error performance of generalized space shift keying for indoor visible light communications. *Trans. Commun.*, 2013, 61(5):1968-1976.
54. Popoola WO. Merits and limitations of spatial modulation for optical wireless communications. *Proc. 2nd Int. Workshop Opt. Wireless Commun.*, 2014, pp. 152-156.
55. Dong Y, Liu J. On BER performance of underwater wireless optical MISO links under weak turbulence. *Proc. Oceans 2016-Shanghai*, 2016, pp. 1-4.
56. Zhang X, Dimitrov S, Sinanovic S, Haas H. Optimal power allocation in spatial modulation OFDM for visible light communications. *Proc. IEEE 75th Veh. Technol. Conf.*, 2012, pp. 1-5.
57. Fath T, Haas H. Performance comparison of MIMO techniques for optical wireless communications in indoor environments. *IEEE Trans. Commun.*, 2013, 61(2):733-742.
58. Huang A, Tao L, Niu Y. Underwater wireless optical MIMO system with spatial modulation and adaptive power allocation. *Opt. Commun.*, 2018, 412:21-27.
59. Huang A, Fan Y. Flag dual amplitude pulse position modulation for atmospheric FSO communication. *Proc. ICSPCS*, 2013, pp. 1-5.
60. Farr N, Chave AD, Freitag L, Preisig J, White SN, Yoerger D, Sonnichsen F. Optical modem technology for seafloor observatories. *Proc. OCEANS MTS/IEEE*, 2005, pp. 928-934.
61. Baiden G, Bissiri Y, Masoti A. Paving the way for a future underwater omni-directional wireless optical communication systems. *Ocean Eng.*, 2009, 36(9):633-640.
62. Doniec M, Rus D. BiDirectional optical communication with AquaOptical II. *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. Syst.*, 2010, pp. 390-394. DOI: 10.1109/ICCS.2010.5686513.
63. Scholz T. Laser based underwater communication experiments in the baltic sea. *Proc. 4th Underwater Commun. Netw. Conf.*, 2018, pp. 1-3. DOI: 10.1109/UComms.2018.8493174.
64. Li Y, Yin H, Ji X, Wu B. Design and implementation of underwater wireless optical communication system with high-speed and full-duplex using blue/green light. *Proc. 10th Int. Conf. Commun. Softw. Netw.*, 2018, pp. 99-103. DOI: 10.1109/ICCSN.2018.8488232.
65. Hardy ND, Rao HG, Conrad SD, Howe TR, Scheinbart MS, Kaminsky RD, Hamilton SA. Demonstration of vehicle-to-vehicle optical pointing, acquisition, and tracking for undersea laser communications. *Proc. Free-Space Laser Communications XXXI (SPIE)*, 2019, v. 10910: 205-214. DOI: 10.1117/12.2511178.
66. BlueComm 200. *Underwater optical communications and data transfer modem* [Online]. Available: <https://www.sonardyne.com/products/bluecomm-200-wireless-underwater-link/>, access data 09.08.2023.
67. Li J, Yang B, Ye D, Wang L, Fu K, Piao J, Wang Y. Real-time, full-duplex system for underwater wireless optical communication: hardware structure and optical link model. *IEEE Access*, 2020, 8:109372–109387. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3001213.
68. Kong M, Lin J, Guo Y, Sun X, Sait M, Alkhazragi O, Kang CH, Holguin-Lerma JA, Kheireddine M, Ouhssain M, Jones BH, Ng TK, Ooi BS. AquaE-lite hybrid-solar-cell receiver-modality for energy-autonomous terrestrial and underwater internet-of-things. *IEEE Photon. J.*, 2020, 12(4), Art. no. 7904713. DOI: 10.1109/JPHOT.2020.3013995.
69. Kong M, Guo Y, Sait M, Alkhazragi O, Kang CH, Ng TK, Ooi BS. Toward automatic subsea operations using real-time underwater optical wireless sensor networks. *IEEE Photon. J.*, 2021, 14(1), Art. no. 7308408. DOI: 10.1109/JPHOT.2021.3136922.
70. Kong M, Guo Y, Alkhazragi O, Sait M, Kang CH, Ng TK, Ooi BS. Real-time optical-wireless video surveillance system for high visual-fidelity underwater monitoring. *IEEE Photon. J.*, 2022, 14(2), Art. no. 7315609. DOI: 10.1109/JPHOT.2022.3147844.
71. Chowdhury MZ, Hasan MK, Shahjalal M, Hossain MT, Jang YM. Optical wireless hybrid

- networks: trends, opportunities, challenges, and research directions. *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 2020, 22:930-966. DOI: 10.1109/COMST.2020.2966855.
72. Dunbabin M, Corke P, Vasilescu I, Rus D. Data muling over underwater wireless sensor networks using an autonomous underwater vehicle. *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2006, pp, 2091-2098. DOI: 10.1109/ROBOT.2006.1642013.
73. Islam KY, Ahmad I, Habibi D, Zahed MIA, Kamruzzaman J. Green Underwater Wireless Communications Using Hybrid Optical-Acoustic Technologies. *IEEE Access*, 2021, 9:85109-85123. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3088467.

**Широков Игорь Борисович**

*д.т.н., профессор*

Севастопольский государственный университет

**Севастополь 299053, Россия**

**E-mail: shirokov@ieee.org**

**Головин Владислав Викторович**

*к.т.н., доцент*

Севастопольский государственный университет

**Севастополь 299053, Россия**

**E-mail: VVGolovin@mail.sevsu.ru**

**Редькина Елена Александровна**

*к.т.н., доцент*

Севастопольский государственный университет

**Севастополь 299053, Россия**

**E-mail: EARedkina@email.sevsu.ru**

**Сердюк Игорь Владимирович**

*к.т.н.*

Севастопольский государственный университет

**Севастополь 299053, Россия**

**E-mail: IVSerdyuk@mail.sevsu.ru**

**Овчаров Павел Петрович**

*преподаватель*

Севастопольский государственный университет

**Севастополь 299053, Россия**

**E-mail: PPOvcharov@mail.sevsu.ru.**