

Волоконно-оптическая система морского базирования для сбора и передачи данных

В. М. Деревяшкин¹, А. О. Виркунин¹, Н. И. Горлов¹,
А. Е. Малашенко², А. И. Сидоренко²

¹ Сибирский гос. унив. телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ)

² СКБ средств автоматизации морских исследований ДВО РАН (г. Южно-Сахалинск)

Аннотация: В статье представлены принципы построения волоконно-оптической системы морского базирования, предназначенной для двустороннего информационного обмена между подводными станциями и аппаратно-программными комплексами. Предложены методы контроля основных параметров подводных станций. Проанализированы основные принципы мониторинга физической среды передачи. При этом обоснована необходимость применения когерентного оптического рефлектометра, позволяющего улучшить чувствительность мониторинга до квантового предела за счет гетеродинного детектирования.

Ключевые слова: волоконно-оптическая система, донный модуль, аппаратно-программный модуль, коммутатор, модем, система управления, мониторинг, когерентный рефлектометр.

Для цитирования: Деревяшкин В. М., Виркунин А. О., Горлов Н. И., Малашенко А. Е., Сидоренко А. И. Волоконно-оптическая система морского базирования для сбора и передачи данных // Вестник СибГУТИ. 2024. Т. 18, № 1. С. 48–58.

<https://doi.org/10.55648/1998-6920-2024-18-1-48-58>.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Деревяшкин В. М., Виркунин А. О.,
Горлов Н. И., Малашенко А. Е.,
Сидоренко А. И., 2024

Статья поступила в редакцию 24.05.2023;
переработанный вариант – 04.07.2023;
принята к публикации 03.09.2023.

1. Введение

Развитие технологий оптической связи в настоящее время проявляется не только в традиционных телекоммуникационных системах, но и в различных технических приложениях. Ряд существенных преимуществ, таких как высокая скорость передачи, высокая надежность, обеспечение высокой помехоустойчивости, позволяют передавать информацию на большие расстояния, в том числе и в водной среде, обеспечивая при этом необходимые качественные показатели. Сферами применения таких систем являются оборона, экологический и климатический мониторинг водного пространства, освоение подводных месторождений полезных ископаемых, контроль гидротехнических сооружений и т.д.

Волоконно-оптическая система морского базирования (ВОСМБ) сбора и передачи данных предназначена для решения следующих задач:

1. Обеспечение двустороннего информационного обмена между донными модулями (ДМ), в которых находится сетевое оборудование, и аппаратно-программными модулями (АПМ) с оборудованием сбора данных. Оборудование для сбора данных может включать в себя различные датчики и станции, например, станции гидроакустического мониторинга,

видеть оперативные данные о состоянии сети и рационально использовать человеческие ресурсы. Таким образом, происходит максимально эффективная отдача от системы.

Специфика прокладки и особая агрессивность внешней среды накладывают жёсткие требования к волоконно-оптическим и медным кабелям:

- наличие бронепокровов, позволяющих выдерживать высокие разрывные и раздавливающие усилия, возникающие при подводной прокладке;
- наличие в кабеле гидрофобного (битумного) заполнителя, препятствующего прониканию в кабель воды;
- наличие в конструкции стальных и полипропиленовых жгутов, позволяющих справляться с постоянной эксплуатационной нагрузкой;
- минимально возможный вес кабеля, позволяющий работать с большими строительными длинами (до 80 км);
- при прокладке на больших глубинах кабель должен выдерживать высокое гидростатическое давление (свыше 40 МПа);
- токопроводящая жила (ТПЖ) кабеля, предназначенная для питания оборудования, должна обеспечивать минимальное электрическое сопротивление. При протяженной линии важным фактором также будет являться максимальное рабочее напряжение ТПЖ, которое позволит питать самые удаленные модули [5].

3. Испытания системы

С целью проверки работоспособности и надежности системы, а также основных параметров передачи проведены испытания системы на действующем макете (рис. 2) в береговой и морской фазах испытаний.

Основные параметры макета:

- количество ДМ – 4;
- расстояние между донными модулями – 4 км;
- линия связи между донными модулями – оптический кабель;
- интерфейс связи между донными модулями – Ethernet;
- линия связи между ДС и АПМ – медный кабель;
- интерфейс связи между ДС и АПМ – SHDSL;
- питание системы – дистанционное, постоянным напряжением до 700 В;
- питание объекта – дистанционное, вторичное, постоянным напряжением 48 В;
- максимальная допустимая потребляемая мощность питания узла – до 120 Вт.

Все кабели подключаются к оборудованию с помощью специальных герморазъемов.



Рис. 2. Действующий макет ВОСМБ

Береговая фаза включала в себя следующие проверки и исследования:

1. Проверка аппаратной защиты портов (агрегирование портов) при эмуляции аварийных ситуаций.

Контроль за работоспособностью канала связи при эмуляции аварийных ситуаций осуществлялся с помощью специальной программы – генератора трафика (iperf). Физическое повреждение линии имитировалось с помощью перегиба патчкорда либо путем отключения порта приема/передачи.

Логические аварии имитировались путем внесения повышенного затухания в линию с помощью переменного аттенюатора.

2. Проверка системы предупреждения аварийных ситуаций при превышении допустимых значений уровня сигнала в линии.

Проверка предупреждения аварийных ситуаций заключалась в выставлении референсных значений сигнала, равных тем, которые будут сигнализировать о серьезной проблеме на линии. Задавались значения уровня сигнала с помощью специальной команды, в которой указывались следующие значения: низкий – критический, низкий – предупреждающий, высокий – предупреждающий, высокий – критический.

3. Исследование скорости передачи информации между модемами в зависимости от разрядности кода.

SHDSL-модем, используемый в данном макете, поддерживает формат кода ТС-РАМ. На данном оборудовании есть возможность менять разрядность кода от 4 до 128, соответственно, число поддерживаемых основных цифровых каналов меняется от 38 до 178. Разрядность кода выбиралась исходя из длины кабеля между модемами. Необходимо выставить достаточную разрядность для обеспечения необходимой скорости при соблюдении значения отношения сигнал/шум около 11 дБ. Для доступа к настройкам необходимо было войти в графический интерфейс модема, введя в адресной строке его IP-адрес.

4. Исследование зависимости отношения сигнал/шум от скорости передачи информации.

При проведении данных испытаний выбирались оптимальные значения отношения сигнал/шум. Необходимо было добиться значения около 11 дБ. Деградация сигнала начиналась

при значении SNR порядка 3–6 дБ. Значение SNR проверялось с помощью встроенных инструментов анализа в графическом интерфейсе модема.

5. Исследование времени задержки при эмуляции аварийных ситуаций в волоконно-оптическом кабеле.

Исследование проводилось путём имитации наихудших условий передачи сигнала при полностью загруженном канале. Для загрузки канала использовалась специальная программа – генератор трафика iperf.

6. Проверка энергетического запаса (пределов допустимых вносимых потерь) в волоконно-оптическом кабеле.

При проверке энергетического запаса определялись пороговые значения приема SFP-модуля с помощью переменного аттенюатора. При постепенном увеличении вносимого затухания до порогового значения передача сигнала прекращалась.

Морская фаза испытаний проводилась после успешных береговых испытаний. После погружения оборудования в водную среду контролировались следующие основные параметры системы:

- мощность приема/передачи сигнала между сетевыми элементами;
- температура;
- доступность сетевых элементов;
- корректная работа сетевых элементов;
- проверка ошибочно принятых пакетов;
- оценка SNR.

Данные параметры проверялись с помощью системы управления.

4. Мониторинг волоконно-оптической системы морского базирования

В процессе строительства и технической эксплуатации ВОСМБ необходимо проводить комплекс измерений с целью определения технического состояния и предупреждения повреждений волоконно-оптических кабелей (ВОК). В перечень обязательных к контролю параметров ВОК относятся: вносимые потери, коэффициенты затухания и отражения. Для проведения измерений предлагается применение универсальной измерительной системы для тестирования и мониторинга. Оборудование должно быть развернуто на каждой оконечной станции для обеспечения текущего мониторинга с целью технического обслуживания. Мониторинг состояния системы может быть получен путем периодического сбора данных о производительности с подводной станции. Кроме того, для удобства обслуживания оно должно поддерживать или предоставлять интерфейсы для поиска неисправностей. Для конфигурации соединения оборудования мониторинга (monitoring equipment) в подводной кабельной системе можно выбрать два различных способа:

- Терминальное передающее оборудование подключается между оборудованием мониторинга и кабельным оконечным оборудованием (см. рис. 3). Сигналы мониторинга и служебные сигналы объединяются в терминальном передающем оборудовании и передаются в подводную кабельную систему [6].

- Оборудование мониторинга подключается между терминальным передающим оборудованием и кабельным оконечным оборудованием (см. рис. 4), служебные сигналы и сигналы мониторинга объединяются в оборудовании мониторинга и передаются в подводную кабельную систему.

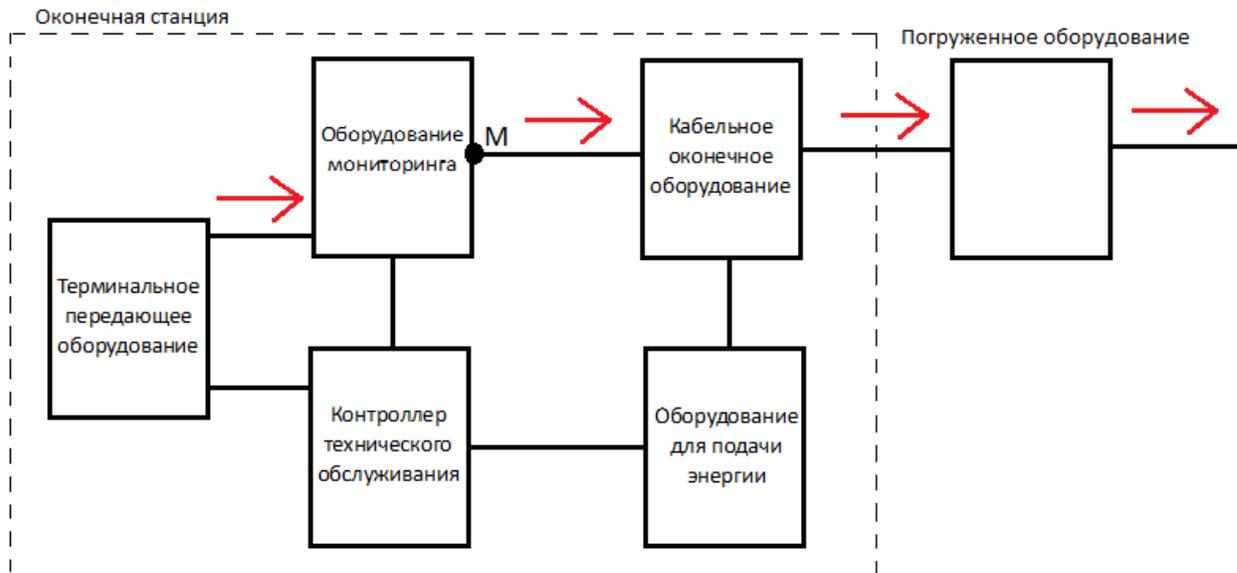


Рис. 3. Схема включения терминального передающего оборудования между оборудованием мониторинга и входом зондируемой кабельной системы

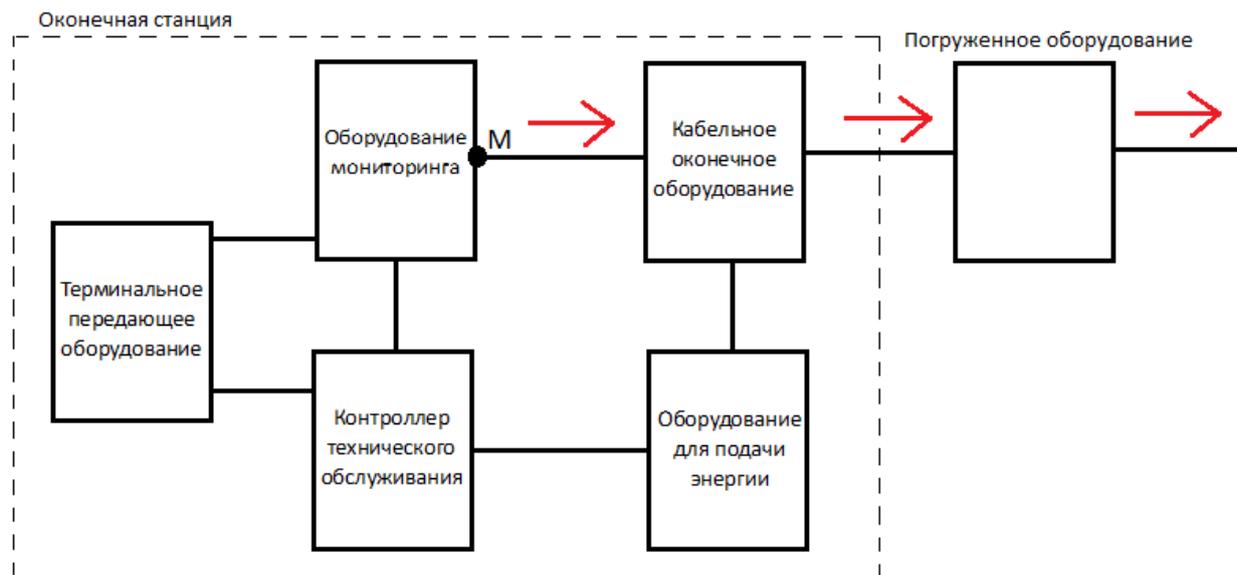


Рис. 4. Схема включения оборудования мониторинга между терминальным передающим оборудованием и входом зондируемой кабельной системы

Контрольные точки (рис. 3, 4) должны соответствовать параметрам, указанным для мониторинга. В точке М выходной интерфейс мониторинга должен соответствовать следующим параметрам:

- выходная мощность зондирующего света, длина волны и ширина импульса (для пассивного мониторинга);
- параметры модуляции (для активного контроля).

При пассивном мониторинге характеристики получают путем обнаружения оптических или электрических сигналов. Сигналы зонда посылаются на погруженную установку, а возвращенные сигналы анализируются для оценки состояния работоспособности системы. Например, рассеянный назад свет рефлектометра/COTDR, описанного в [7], обнаруживается и обрабатывается, обычно в виде кривых зависимостей интенсивности сигнала от расстояния

для анализа и диагностики состояния системы. Одно оборудование для пассивного мониторинга контролирует производительность подводной кабельной системы в одном направлении. Чтобы получить двунаправленную производительность, оборудование для пассивного мониторинга должно быть развернуто на каждой оконечной станции.

При пассивном мониторинге рекомендуется отслеживать изменения состояния в зондируемых оптических путях, такие как обрывы волокон, изменения усиления ретранслятора, а также затухание или отражения волокон. Поскольку пассивный мониторинг получает информацию о состоянии системы косвенным путем, при мониторинге состояния используется сравнение с базовыми показателями. Мониторинг состояния должен использовать те же параметры, что и базовые линии, чтобы обеспечить достоверность сравнения и найти изменения в работе, вызванные повреждениями или неисправностями, которые изменяют состояние системы. Базовые показатели должны быть собраны после надлежащего развертывания системы и должны обновляться после каждого ремонта или изменения конфигурации системы.

Поиск неисправностей часто выполняется вручную в нерабочем состоянии. Это может быть выполнено РМЕ на основе механизма рефлектометрии/COTDR или с помощью коммерческого оборудования рефлектометрии/COTDR. Применение когерентного оптического рефлектометра позволяет улучшить чувствительность мониторинга до квантового предела за счет гетеродинного детектирования. Высокоточное разрешение при поиске неисправностей всегда полезно для технического обслуживания. Рекомендуются удобные функции, например, автоматическое определение места повреждения, быстрое определение места повреждения с меньшей точностью, но за более короткое время. Подводное оборудование должно иметь обратные пути, как описано в [8], для поддержки рефлектометрии/COTDR для поиска неисправностей.

При активном мониторинге оборудование мониторинга запрашивает и собирает непосредственно статус производительности погруженного оборудования. Соответствующими параметрами производительности являются входная мощность, выходная мощность, ток насоса и т.д.

Абсолютная погрешность измерения координаты неоднородности в оптическом волокне определяется длительностью зондирующего импульса. Как и в некогерентной рефлектометрии, она может быть оценена по формуле:

$$\Delta L_{\text{изм.}} = c_0 t_{\text{и}} / 2n_g, \quad (1)$$

где: $\Delta L_{\text{изм.}}$ – абсолютная погрешность измерения координаты;

c_0 – скорость света в свободном пространстве;

$t_{\text{и}}$ – длительность зондирующего импульса;

n_g – групповой коэффициент преломления сердцевины.

Улучшение метрологических параметров оптического рефлектометра предлагается осуществить посредством когерентного приема обратно рассеянного сигнала. Оно позволяет существенно расширить динамический диапазон измерения. Кроме этого, становится возможным применение одного и того же гетеродина в оптическом передатчике и приемнике. Это в значительной степени снижает проблему стабилизации частоты оптического излучения. Техническая реализация метода когерентного приема представлена на рис. 5.

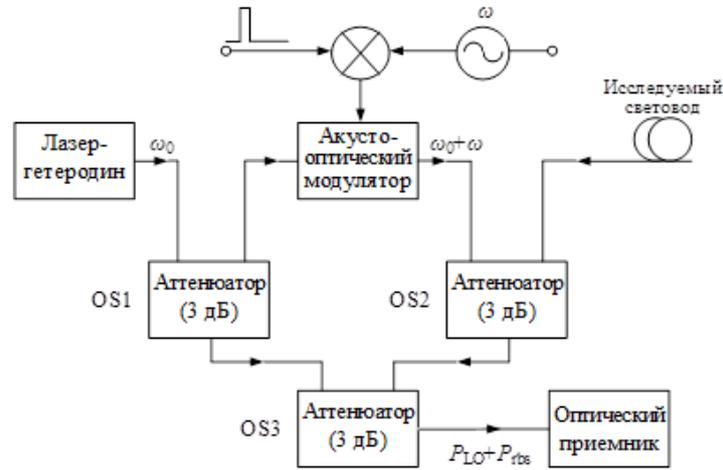


Рис. 5. Техническая реализация метода когерентного приема

При когерентном приеме доминирующими являются шумы оптического приемного устройства и гетеродина. Первые определяются темновым током диода i_d . Результирующий шум гетеродина других компонентов технической реализации для анализа отношения сигнал/шум целесообразно выразить через эквивалентную мощность P_{NEP} . При этих условиях соотношение сигнал/шум примет вид [9]:

$$SNR = \frac{2P_{LO}P_{rbs} \left[\frac{e\eta}{\eta} \right]}{2eB \left\{ i_d + \left[\frac{e\eta}{\eta w_0} \right] + P_{NEP} \left[\frac{e\eta}{\eta w_0} \right] \right\}}, \quad (2)$$

где e – заряд электрона, η – квантовая эффективность фотодетектора, P_{LO} – мощность сигнала гетеродина, P_{rbs} – мощность сигнала обратного рассеяния, B – полоса пропускания оптического приемника, P_{NEP} – эквивалентная мощность шума гетеродина.

Принимая во внимание, что мощность сигнала оптического гетеродина значительно превышает уровень собственного шума, последним можно пренебречь. При этих допущениях формула для отношения сигнал/шум примет следующий вид:

$$SNR = \frac{\eta P_{rbs}}{\eta w_0 B}. \quad (3)$$

Это отношение дает оценку квантовомеханического предела чувствительности когерентного оптического приемника.

Способность системы по пространственному разрешению зависит от длительности зондирующего импульса. Она, в свою очередь, определяется быстродействием акустооптического модулятора.

За счет гетеродинного детектирования чувствительность мониторинга увеличивается до квантового предела. Высокоточное разрешение при поиске неисправностей всегда полезно для технического обслуживания. Рекомендуются удобные функции, например, автоматическое определение места повреждения, быстрое определение места повреждения с меньшей погрешностью, но за более короткое время. Подводное оборудование должно иметь обратные пути, как описано в [3], для когерентного приема. При активном мониторинге оборудование мониторинга запрашивает и собирает непосредственно статус производительности по-

грузенного оборудования. Соответствующими параметрами производительности являются входная мощность, выходная мощность и т.д.

5. Заключение

Предложенные принципы построения волоконно-оптических систем морского базирования для сбора и передачи данных могут быть востребованы в различных сферах жизнедеятельности человека, например, для гидроакустического мониторинга, датчиков сейсмоактивности, охраны периметра и т.д. Работоспособность системы проверена на действующем макете в ходе лабораторных испытаний на водном полигоне СКБ средств автоматизации морских исследований ДВО РАН (г. Южно-Сахалинск).

Выражение благодарности

Авторы выражают благодарность компании ООО «Предприятие «ЭЛТЕКС» за консультационную поддержку и содействие в изготовлении системы.

Литература

1. *Бадеева Е. А., Целикин К. Д., Кабанов А. Г., Куклин Г. С.* Волоконно-оптические системы военного назначения и их элементы // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2021. № 4. С. 106–120. DOI:10.21685/2227-8486-2021-4-10.
2. URL: <https://eltex-co.ru/catalog/management/eltex-ems/> (дата обращения: 09.04.2023).
3. URL: <https://eltex-co.ru/catalog/dsl/mx12e-2/> (дата обращения: 09.04.2023).
4. URL: https://pskovgeokabel.ru/articles/0_10/ (дата обращения: 10.04.2023).
5. Recommendation ITU-T G.979. Characteristics of monitoring systems for optical submarine cable systems. 2012.
6. ИЕС61746-1. Калибровка оптических рефлектометров с временной диаграммой направленности (OTDR). Часть 1: Рефлектометры для одномодовых волокон. 2009.
7. Recommendation ITU-T G.977. Characteristics of optically amplified optical fibre submarine cable systems. 2011.
8. *Айбатов Д. Л., Морозов О. Г., Польский Ю. Е.* Основы рефлектометрии: учебное пособие Казань: ЗАО «Новое знание», 2008. 116 с.

Деревяшкин Владимир Михайлович

к.т.н., доцент кафедры фотоники в телекоммуникациях, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ, 630102, Новосибирск, ул. Кирова, д. 86), e-mail: dvm@sibguti.ru, ORCID ID: 0009-0006-3069-0905.

Виркунин Андрей Олегович

преподаватель кафедры фотоники в телекоммуникациях, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, e-mail: stand.nsk@gmail.com, ORCID ID: 0009-0006-1695-664X.

Горлов Николай Ильич

д.т.н., профессор, профессор кафедры фотоники в телекоммуникациях, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, e-mail: gorlovnik@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0003-3614-8325.

Малашенко Анатолий Емельянович

к.т.н., ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук» (СКБ САМИ ДВО РАН, 693023, Южно-Сахалинск, ул. Горького, 25), e-mail: a.malashenko@skbsami.ru, ORCID ID: 0009-0000-3768-9196.

Сидоренко Артём Игоревич

младший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук» (СКБ САМИ ДВО РАН, 693023, Южно-Сахалинск, ул. Горького, 25), e-mail: sidorenko.artem@inbox.ru, ORCID ID: 0000-0002-2094-7854.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад соавторов: Каждый автор внес равную долю участия как во все этапы проводимого теоретического исследования, так и при написании разделов данной статьи.

Marine-based Fiber-optic Systems for Data Collection and Transmission

Vladimir M. Derevyashkin¹, Andrey O. Virkunin¹, Nikolay I. Gorlov¹,
Anatoliy E. Malashenko², Artem I. Sidorenko²

¹ Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS)

² Special Design Bureau for Marine Research Automation Tools (SKB SAMI FEB RAS)

Abstract: The article presents the principles of sea-based fiber-optic system construction for data collection and transmission intended for two-way information exchange between underwater stations and a hardware and software complex with a controlled flow of information, control of equipment of bottom modules and an apparatus-software module. Methods of the main parameters control of underwater stations are proposed. The basic principles of monitoring the physical transmission medium are analyzed. At the same time, the necessity of using a coherent optical reflectometer is justified that makes it possible to improve the sensitivity of monitoring the quantum limit due to deep detection.

Keywords: fiber-optic system, bottom module, monitoring, coherent reflectometer.

For citation: Derevyashkin V. M., Virkunin A. O., Gorlov N. I., Malashenko A. E., Sidorenko A. I. Marine-based fiber-optic systems for data collection and transmission (in Russian). *Vestnik SibGUTI*, 2024, vol. 18, no. 1, pp. 48-58. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2024-18-1-48-58>.



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Derevyashkin V. M., Virkunin A. O.,
Gorlov N. I., Malashenko A. E.,
Sidorenko A. I., 2024

The article was submitted: 24.05.2023;
revised version: 04.07.2023;
accepted for publication 03.09.2023.

References

1. Badeeva E. A., Tselikin K. D., Kabanov A. G., Kuklin G. S. Volokonno-opticheskie sistemy voennogo naznacheniya i ikh elementy [Military fiber optic systems and their elements]. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve*, 2021, no. 4. pp. 106-120. doi:10.21685/2227-8486-2021-4-10.
2. Available at: <https://eltex-co.ru/catalog/management/eltex-ems/> (accessed: 04/09/2023).
3. Available at: <https://eltex-co.ru/catalog/dsl/mxl2e-2/> (accessed: 04/09/2023).
4. Available at: https://pskovgeokabel.ru/articles/0_10/ (accessed: 04/10/2023).
5. Recommendation ITU-T G.979, "Characteristics of monitoring systems for optical submarine cable systems", 2012.
6. IEC61746-1 (2009), *Kalibrovka opticheskikh reflektometrov s vremennoi diagrammoi napravlenosti (OTDR). Chast' 1: Reflektometry dlya odnomodovykh volokon* [Calibration of optical time-diffraction reflectometers (OTDR) - Part 1: OTDRs for single-mode fibers].
7. Recommendation ITU-T G.977 (2011), *Characteristics of optically amplified optical fiber sub-marine cable systems*.
8. Aibatov D. L., Morozov O. G., Polsky Yu. E. *Osnovy reflektometrii* [Fundamentals of reflectometry]. Kazan', ZAO «Novoe znanie», 2008. 116 p.

Vladimir M. Derevyashkin

Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Photonics in Telecommunications, Siberian State University of Telecommunications and Informatics (SibSUTIS, Russia, 630102, Novosibirsk, Kirov St. 86), e-mail: dvm@sibgut.ru, ORCID ID: 0009-0006-3069-0905.

Andrey O. Virkunin

Lecturer, Department of Photonics in Telecommunications, Siberian State University of Telecommunications and Informatics (SibSUTIS, Russia, 630102, Novosibirsk, Kirov St. 86), e-mail: stand.nsk@gmail.com, ORCID ID: 0009-0006-1695-664X.

Nikolay I. Gorlov

Dr. of Sci. (Engineering), Professor; Professor of the Department of Photonics in Telecommunications, Siberian State University of Telecommunications and Informatics (SibSUTIS, Russia, 630102, Novosibirsk, Kirov St. 86), e-mail: gorlovník@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0003-3614-8325.

Anatoliy E. Malashenko

Cand. of Sci. (Engineering), Leading Researcher of the Federal State Budgetary Institution of Science "Special Design Bureau for Automation of Marine Research of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences" (SKB SAMI FEB RAS, Russia, 693023, Yuzhno-Sakhalinsk, Gorkogo St. 25), e-mail: a.malashenko@skbsami.ru, ORCID ID: 0009-0000-3768-9196.

Artem I. Sidorenko

Junior researcher, Federal State Budgetary Institution of Science "Special Design Bureau for Marine Research Automation Tools of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences" (SKB SAMI FEB RAS, Russia, 693023, Yuzhno-Sakhalinsk, Gorky St. 25), e-mail: sidorenko.artem@inbox.ru, ORCID ID: 0000-0002-2094-7854.