

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ: современное состояние и перспективы развития

Доктор технических наук **А.А. МАКОВЕЦКИЙ**,

кандидат технических наук **В.В. МОИСЕЕВ**

(Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН),

доктор технических наук **Н.Н. БАРАНОВ**

(Объединённый институт высоких температур РАН)

Поступила в редакцию: 13.05.2025

Принята к публикации: 15.06.2025

В статье представлен обзор реализованных к настоящему времени систем передачи энергии и информации по оптическим волокнам (на основе зарубежных источников). Рассмотрен ряд эффективных разработок для научно-исследовательских и практических применений. Сформулированы основные задачи дальнейших исследований оптимизации устройств волоконной оптики и повышения их эффективности, что важно для развития перспективных систем связи и скоростной передачи информации.

История появления волоконной оптики связана с рядом открытий в области физики. Каждое из них причастно к её созданию.

Оптическое волокно (ОВ) состоит из световедущей сердцевины и светотражающей оболочки. Свет распространяется по ОВ за счёт эффекта полного внутреннего отражения (ПВО) от границы раздела сердцевина/оболочка.

В. Снеллиусом был открыт закон преломления света, из которого следует условие ПВО – показатель преломления сердцевины больше показателя преломления оболочки.

Термин “волоконная оптика (оптическое волокно)” был введён в 1956 г. Н.С. Капани (американский физик индийского происхождения), который исследовал короткие отрезки волоконных световодов из многокомпонентных силикатных стёкол

(имеющих оптические потери на уровне 1000 дБ/км).

Самый значительный вклад в развитие современной волоконной оптики внёс китайский (английский, американский) учёный Чарльз Као Куэн (Ч. Као). В 1966 г. он представил в IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) свою научную работу, в которой доказал возможность организовать линию связи при помощи ОВ на основе кварцевого стекла¹. Работа подкреплялась многочисленными экспериментальными исследованиями. Ч. Као установил, что большие (порядка 1000 дБ/км) потери в исследованных им стеклянных ОВ вызваны присутствием в них так называемых “красящих примесей” (окислов металлов). Само же кварцевое стекло, очищенное от них до уровня 10^{-9} мол. %, имеет оптические потери на уровне единиц дБ/км, что приемлемо для передачи сигналов по ОВ на километровые расстояния. В 1970 году фирма Corning Glass создала ОВ с потерями 20 дБ/км ($\lambda \approx 1000$ мкм), реализовав идеи Ч. Као. Именно 1970 год можно считать годом создания прообраза оптического волокна, без которого сейчас сложно представить себе системы телекоммуникаций. Чарльза Као Куэн по праву считают отцом оптоволоконной связи. В 2009 году за свои работы он получил Нобелевскую премию по физике.

С 1975 года началось бурное развитие систем волоконно-оптической связи и оптических волокон для них. В начале 80-х годов прошлого века появились волоконные лазеры, затем

ОВ стали применяться для медицинских целей и в различных сенсорах.

В последние десятилетия оптическое волокно активно используется для передачи электроэнергии. И хотя оптические волокна значительно уступают медным проводам по эффективности передачи, их использование в ряде специальных применений предпочтительнее из-за уникальных свойств этих волокон. Оптическое волокно состоит из диэлектрических материалов и пропускает только свет, оно нечувствительно к электромагнитным помехам, включая искры и молнии, не создаёт радиопомех. При его обрыве нет опасности возгорания и поражения электрическим током. Оптические волокна менее громоздки, способны работать на больших расстояниях, не подвержены коррозии.

Передача энергии по волокну (англ. – *power-over-fiber*, *PoF*) представляет собой систему, в которой лазерный источник света передает по одномодовому (*SMF*) или многомодовому (*MMF*) оптическому волокну излучение мощностью от сотен мВт до нескольких Вт. На приёмном конце волокна закреплён фотоэлектрический преобразователь (англ. – *photovoltaic*, *PV*), преобразующий оптическую мощность в электрическую для питания различных электронных устройств.

Обзор реализованных в настоящее время систем передачи энергии по оптическим волокнам (на основе зарубежных источников)

За последние десятилетия передача энергии по оптоволокну получила существенное развитие.

¹ Kao K.C., Hockham G.A. Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies [англ.] // *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. 2010. Vol. 113. P. 1151–1158: DOI: 10.1049/piee.1966.0189

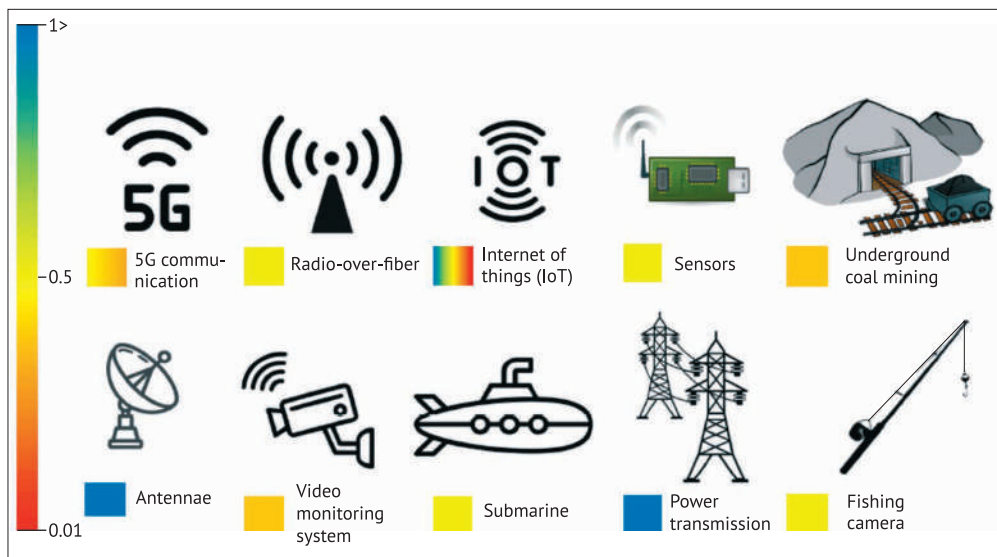


Рис. 1. Применение PoF-систем в различных отраслях промышленности и диапазон выходной мощности для каждого из применений

(Источник: E.P. Putra et al. Technology update on patent and development trend of power over fiber: a critical review. Journal of Photonics for Energy. 2023. Vol. 13(1). P. 1–29)

Она была применена для питания датчиков в электросетях высокого напряжения, для мониторинга агрессивных (взрывоопасных) сред в промышленных помещениях, для питания удалённых антенн (в радиовещании по волокну) и удалённых видеокамер наблюдения, при мониторинге подводных объектов и в ряде других приложений². В Интернете вещей (*Internet of Things*, IoT) технология PoF значи-

тельно упрощает аппаратную реализацию систем датчиков³.

Волоконная оптика сделала возможными многие вещи, без которых современному человеку практически нельзя обойтись (рис. 1).

– Это, во-первых, высокоскоростной интернет, межконтинентальная связь, мобильные сети. Оптоволоконные линии обеспечивают передачу данных на невероятно высокой скорости. Ещё одно достоинство оптоволокна – возможность использования на значительном расстоянии. При этом применение оптоволоконных кабелей для организации линий связи отличается сравнительно небольшими финансовыми затратами. Об использовании оптоволокна в сфере телекоммуникаций

² De Nazaré F.V.B. and Werneck M.M. Temperature and current monitoring system for transmission lines using power-over-fiber technology // IEEE Int. Instrum. and Meas. Technol. Conf. I2MTC – Proc., 2010. P. 779–784; Chenetal Y. Optically powered gas monitoring system using single-mode fibre for underground coal mines // Int. J. Coal Sci. Technol. 2022. 9(1), P. 1–12; Wake D., Nkansah A., Gomes N.J., Lethien C. et al. Optically powered remote units for radio-over-fiber systems // J. Lightwave Technol. 2008. 26(15). P. 2484–2491; Böttger G. et al. An optically powered video camera link // IEEE Photonics Technol. Lett. 2008. 20(1), P. 39–41.

³ Mohammed A.I.A. et al. Power over fiber for internet of things application // IEEE8th Int. Conf. Photonics, ICP. 2020. P. 101–102.

знают все, но этим область его применения не ограничивается.

– Современные рентгеновские аппараты применяют оптическое волокно, чтобы не допустить попадания врачей и пациентов в зону высокого напряжения.

– В распределительном оборудовании электрических подстанций оптоволокно выполняет также защитную функцию. Повышенная радиация, температура, электромагнитное поле и другие экстремальные условия накладывают ограничение на использование электрических измерительных приборов. В таких ситуациях на выручку приходят датчики на базе оптических волокон. Эти элементы способны измерять большое количество различных параметров, среди которых частота вибраций, вращение, смещение, скорость и ускорение, вращающий момент, скручивание.

– На основе оптоволокна изготавливаются гироскопы, достоинство которых – отсутствие подвижных частей. Высокая надёжность и точность измерений сделали такие приборы востребованными для установки в самолётах и аэробусах.

– Охранная сигнализация – ещё один способ использования оптического волокна; попадание постороннего человека в определённую зону изменяет особенности прохождения света, благодаря чему сигнал о правонарушении моментально поступает охране.

– Оптоволокно применяется и в декоративных целях. Его использование в качестве декора особенно востребовано в областях коммерческой рекламы; производства искусственных ёлок; создания объектов искусства.

Тенденции развития технологии передачи энергии по оптоволокну

Прогресс не стоит на месте, появляются инновации, способные расширить сферу применения оптоволокна. Новые разновидности оптических волокон появляются постоянно. Учёные ведут активную работу над разработкой оптоволокна с большим количеством ядер (сердцевин). Появление такого материала позволит многократно увеличить пропускную способность кабельных сетей.

Расширяется востребованность оптоволокна в промышленности (например, при изготовлении мощных лазеров, способных бурить бетон и резать массивные объекты), в медицине (создание и питание новых датчиков), в военном деле (в частности, для управления БПЛА).

Новые разработки, кроме того, помогают улучшить характеристики, влияющие на применение волокна в традиционных областях, таких как телекоммуникация.

Основные компоненты систем PoF

На рис. 2 представлена общая схема PoF-системы. Она состоит из трёх основных компонентов: источника света (лазерный диод с источником электропитания и температурным контроллером), оптического волокна и фотовольтаического преобразователя (PPC) с преобразователем постоянного тока.

Важнейшая задача для PoF-систем – передача оптимальной мощности к нагрузке на максимальное расстояние с максимальной общей производительностью.

Параметры, влияющие на величину электрической мощности,

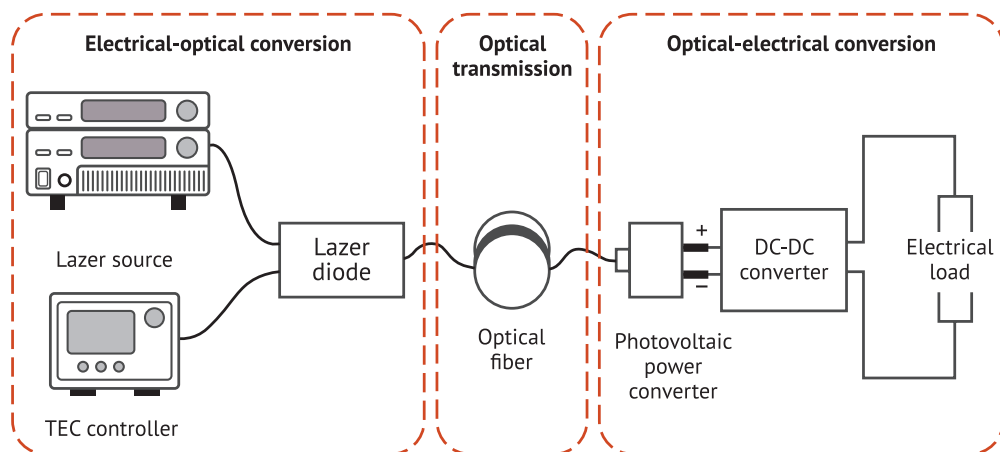


Рис. 2. Схема PoF-системы

(Источник: Пুত্র и др. Последние данные о патентах и тенденциях развития технологии передачи энергии по оптоволокну: критический обзор. Журнал “Фотоника для энергетики”. 011001-7. Январь–март 2023. Т. 13(1))

вырабатываемой системой PoF: оптическая мощность лазера; оптическая мощность на выходе из волокна, которая определяется условиями ввода лазерного излучения в волокно и оптическими потерями в нём; потери выходной мощности при её подведении к PPC; эффективность PPC.

Оптические волокна

На рис. 3 показаны поперечные сечения различных типов кварцевых оптических волокон для PoF-систем⁴.

Обычные одномодовые кварцевые оптические волокна SMF имеют простую волноводную структуру, состоящую из световедущей сердцевины диаметром 6–10 мкм и светотражающей оболочки (рис. 3а). Они подходят для передачи небольших мощностей излучения (меньших

1–2 Вт при $\lambda = 1.06$ мкм) на расстояния порядка 1 км.

У многомодовых волокон MMF (рис. 3б) диаметр сердечника больше, чем у SMF (50–62.5 мкм), и они более подходят для передачи мощностей порядка 10 Вт.

У многосердцевинных волокон MCF несколько световедущих сердцевин (рис. 3в). Диаметры сердцевин MCF соответствуют диаметру сердцевины SMF. То есть MCF – это несколько SMF в одной внешней оболочке. Поэтому они отличаются высокой ёмкостью данных. На каждую сердцевину MCF распространяются все достоинства и ограничения SMF. Но в многосердцевинном волокне оптические сигналы и питающий свет можно передавать по отдельным SMF-каналам одновременно с помощью нескольких сердцевин.

Волокна с двойной оболочкой DCF (рис. 3 г) ранее служили в качестве среды усиления (активного элемента) для мощных оптических

⁴ Putra E.P. et al. Technology update on patent and development trend of power over fiber: a critical review. // Journal of Photonics for Energy. 2023. Vol. 13(1). P. 011001-1–011001-29.

усилителей и лазеров. При использовании волокна DCF в PoF-системах оптический (коммуникационный) сигнал вводится в центральную сердцевину, а свет для передачи энергии – во внутреннюю оболочку большого диаметра. Таким образом можно одновременно реализовать широкополосную передачу оптических сигналов и мощную передачу питающего света.

Потенциально привлекательно для использования в PoF-системах также волокно с полый сердцевинкой (*hollow-core fibers, HCF*)⁵. При этом полая сердцевина заполнена воздухом (или другим газом). В таком волокне основная доля излучения распространяется в сердцевине, то есть в воздухе. Поэтому скорость его распространения и передаваемая мощность будут примерно в 1.5 раза выше, чем в оптических волокнах с кварцевой сердцевинкой.

Применение волокна HCF выгоднее всего в системе мобильной связи 5-го поколения (5G), где требуется передача сигнала со сверхнизкой задержкой. Однако предстоит ещё преодолеть технологические сложности в изготовлении длинных (несколько км) полых волокон HCF для достижения практической стадии.

Источники света (LD)

В качестве источников света в PoF-системах чаще всего используются мощные лазерные диоды (LD).

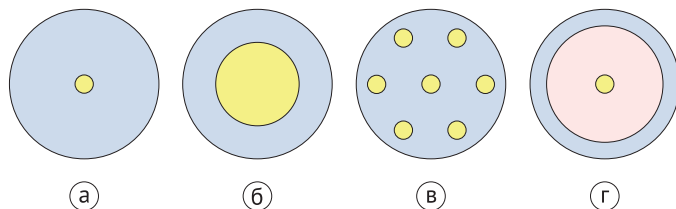


Рис. 3. Поперечные сечения различных типов оптических волокон для PoF-систем:

а – SMF, б – MMF, в – MCF, г – DCF

(Источник: M. Matsuura. Recent advancement

in power-over-fiber technologies. Photonics. 2021. 8. P. 335)

Для облегчения ввода излучения в транспортное волокно они выпускаются с волоконным выходом (*Fiber-pigtailed LDs*). LD – это полупроводниковый лазер с электрической накачкой. Часть энергии, вырабатываемой рекомбинацией электронов и дырок в активной области, высвобождается в виде фотонов. Торцевые грани LD создают эффективный лазерный резонатор. При превышении порогового тока накачки лазерный диод генерирует стимулированное когерентное узконаправленное излучение, в отличие от светодиода (LED), излучающего некогерентный, сильно расходящийся свет.

Рабочая длина волны и выходная мощность лазерного диода для PoF-систем существенно зависят от состава материала. Производители лазерных диодов предлагают широкий диапазон длин волн, начиная от ультрафиолетового (UV) и заканчивая инфракрасным (IR) излучением. Для PoF-систем подходит спектральный диапазон от 780 до 1650 нм, основные длины волн – 808, 830 и 980 нм⁶. Эффективность преобразования электрической мощности

⁵ Li J., Zhang A., Zhou G., Liu J., Xia et al. A large-core microstructure optical fiber for co-transmission of signal and power // IEEE OSA J. Lightwave Technol. 2021. 3. P. 4511.

⁶ Matsuura M. Recent advancement in power-over-fiber technologies // Photonics. 2021. 8(8). P. 335.

в оптическую (Э/О) LD зависит от состава материала и обычно составляет от 30 до 50%.

Максимальная мощность LD с волоконным выводом составляет несколько десятков Вт. Мощность вводимого в волокно излучения увеличивают с помощью нескольких чипов LD. При этом в одномодовое оптическое волокно с диаметром сердцевины около 9 мкм удаётся ввести не более 10 Вт мощности. Для оптических волокон с внешним диаметром 125 мкм, которые обычно применяются в оптоволоконной связи, при использовании второй отражательной оболочки выходная мощность обычно ограничена 40 Вт или менее. Для дальнейшего увеличения вводимой мощности надо использовать волокна с большим (чем 125 мкм) диаметром световедущей сердцевины.

Кроме LD, в протяжённых PoF-системах могут применяться волоконные лазеры и усилители. Однако деградация оболочки волокна, вызванная высокой мощностью, затрудняет их применение.

Фотоэлектрические преобразователи мощности (PPC)

Основные полупроводниковые материалы для фотоэлектрических преобразователей, используемых в PoF-системах: арсенид галлия (GaAs), арсенид индия-галлия (InGaAs), антимонид галлия (GaSb), а также кремний (Si) и германий (Ge).

Фотоэлектрические преобразователи с этими материалами были разработаны в основном для диапазона длин волн 800–860 нм, в котором у них относительно высокая эффективность преобразования (30–50%). Благодаря большому количеству высокопроизводительных лазерных

источников света в этом диапазоне, последний известен как наиболее перспективный диапазон длин волн источников питающего света для PoF. Рекордный результат – 68.9% эффективности преобразования на $\lambda = 858$ нм был получен в работе⁷ за счёт рециркуляции фотонов и оптического резонанса.

В диапазоне длин волн 960–980 нм также ведутся разработки PPC, поскольку и для этого диапазона можно изготавливать высокопроизводительные и недорогие LD. Диапазоны 1310 нм и 1550 нм тоже интересуют специалистов. В частности, диапазон 1550 нм привлекателен с точки зрения безопасности глаз, и это выгодный диапазон длин волн как для PoF, так и для оптической беспроводной передачи энергии.

Перспективные реализуемые системы PoF

Питание датчиков в электросетях под высоким напряжением

Для мониторинга электросетей в реальном времени требуются умные сетевые сенсоры, способные непрерывно снимать и передавать по волокну информацию в контрольное помещение для её анализа. Разработка схемы такой сенсорной системы представлена на рис. 4⁸. Она включает в себя

⁷ Helmers H., Lopez E., Höhn O., Lackner D. et al. 68.9% efficient GaAs-based photonic power conversion enabled by photon recycling and optical resonance // *Phys. Status Solidi Rapid Research Letter*. 2021. 2100113 (4 of 7).

⁸ Bassan F.R., Rosolem J.B., Florida C., Aires B.N. et al. Power-over-fiber smart sensor fully-connected in a hybrid fiber/power distribution cable // in: *Proceedings of the 3rd Optical Wireless and Fiber Power Transmission Conference (OWPT) Online*. 2021. 19–22 April. P. OWPT-6-03.

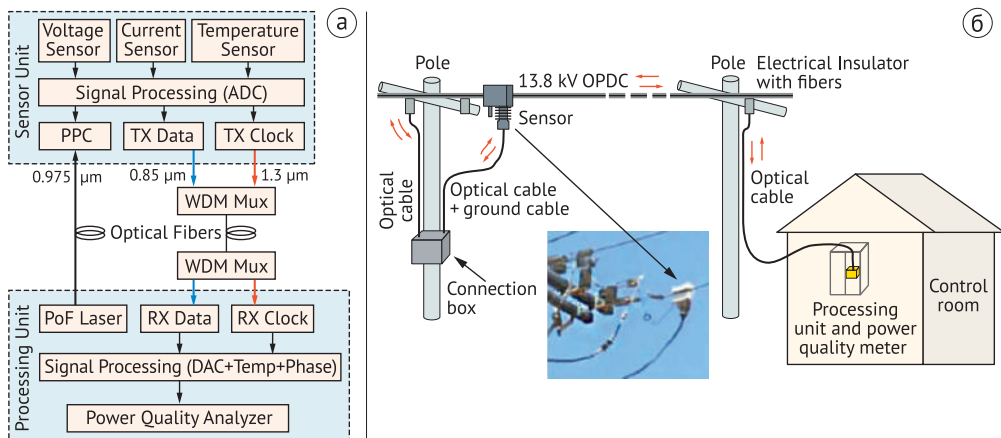


Рис. 4. Блок-схема оптически накачиваемого умного сенсора – а. Схематический вид системы связи между сенсором и комнатой контроля – б. На вставке показана фотография сенсора, установленного в гибридном воздушном оптоволоконном кабеле распределения питания (Источник: Bassan F.R., Rosolem J.B., Florida C., Aires B.N., Peres R., Aprea J.F., Nascimento C.A.M., Fruett F. Power-over-fiber smart sensor fully-connected in a hybrid fiber/power distribution cable. In: Proceedings of the 3rd Optical Wireless and Fiber Power Transmission Conference (OWPT 2021), Online, 19–22 April 2021. P. OWPT-6-03)

сенсорную ячейку и ячейку обработки информации. Питание и связь между ними выполнены с помощью двух обычных MMF с диаметром сердцевины 62.5 мкм, которые обеспечивают электрическую изоляцию между средой под напряжением и землей. Оптическое питание мощностью 2 Вт на длине волны 976 нм из ячейки обработки передается в сенсорную ячейку по одному волокну. Сигналы данных и тактовый, генерируемые лазерами на длинах волн 850 и 1310 нм, передаются в ячейку для обработки по другому волокну.

Питание датчиков в агрессивных условиях среды

На рис. 5 представлена разработанная и испытанная оптически активная, искробезопасная система воздушного мониторинга для измерения четырех основных экологи-

чески опасных газов (CH_4 , CO_2 , CO и O_2), а также температуры и давления окружающей среды в условиях подземных шахт (см. сноску 2.2).

Система основана на трёх ключевых технологиях: 1) питание по оптоволокну (PoF) на длине волны 1550 нм с использованием одноименного волокна SMF длиной 100 м как для подачи питания, так и для передачи информации; 2) оптические преобразователи на основе жидких кристаллов для оптической телеметрии; 3) сверхнизкое энергопотребление конструкции всей электроники. В совокупности этот подход позволяет каждой станции мониторинга газа работать с менее чем 150 мВт оптической мощности, что соответствует требованиям стандартов искробезопасности. Двухмесячные полевые испытания на подземной угольной шахте под-

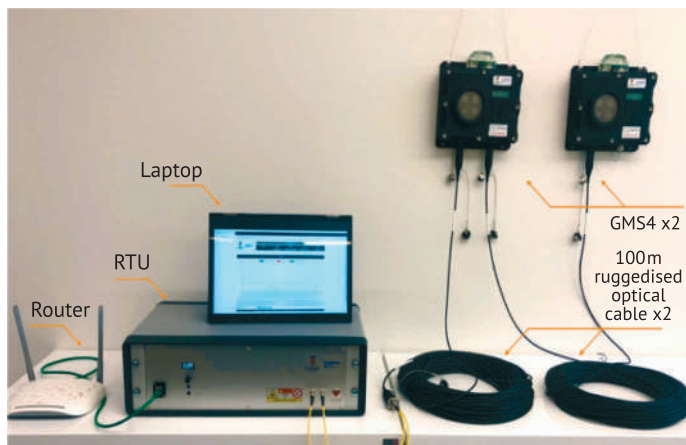


Рис. 5.
Сертифицированная искробезопасная система контроля газа с оптическим питанием и топологией последовательного подключения
(Источник: Y. Chen et al. Optically powered gas monitoring system using single-mode fibre for underground coal mines. Int. J. Coal Sci. Technol. 2022. 9(1). P. 1-12)

твердили совместимость кабелей системы с существующей оптической сетью шахты и стабильность работы системы. По сравнению с обычными электрическими газовыми датчиками эта технология электробезопасна. Кроме того, использование одного волокна для подачи питания и связи обеспечивает более дальнее покрытие, сокращает количество оптических кабелей и увеличивает возможности мультиплексирования и пропускную способность данных для лучшего понимания подземной среды.

RoF-система для питания удалённых антенн с использованием оптического волокна

В публикации Matsuura, Sato⁹ экспериментально продемонстрирована работа системы радиосвязи по волокну (*Radio over Fiber* – RoF) для питания удалённой антенной ячейки с использованием оптического волокна с двойной светоотражающей

оболочкой (*double-clad fiber*). Схема системы и параметры её элементов приведены на рис. 6.

Сердцевина оптоволокна SMF использовалась для одновременной передачи оптических сигналов данных по нисходящей и восходящей линиям связи, внутренняя – для оптической подачи энергии 4 Вт удалённой на 100 м антенной ячейке RAU. Двухнаправленная радиосвязь RoF по оптическому каналу DCF успешно реализована, достигнуты высокие показатели передачи по нисходящей и восходящей линиям связи с точки зрения гарантий измерения величины вектора погрешности.

Видеокамера с дистанционным оптическим питанием

В работе¹⁰ сообщается о камере с дистанционным оптическим питанием, передающей видеопоток 100 Мбит/с с расстояния 200 м со скоростью 15 кадров в секунду с полноцветным разрешением VGA

⁹ Matsuura M., Sato J. Bidirectional Radio-Over-Fiber Systems Using Double-Clad Fibers for Optically Powered Remote Antenna Units // IEEE Photonics J. 2015. Vol. 7. No. 1. 7900609.

¹⁰ Lee H.J. and Jung G.S. Experimental study of a power-over-fiber module and multimode optical fiber for a fishing camera system // Curr. Opt. Photonics. 2017. 1(5). P. 440-455.

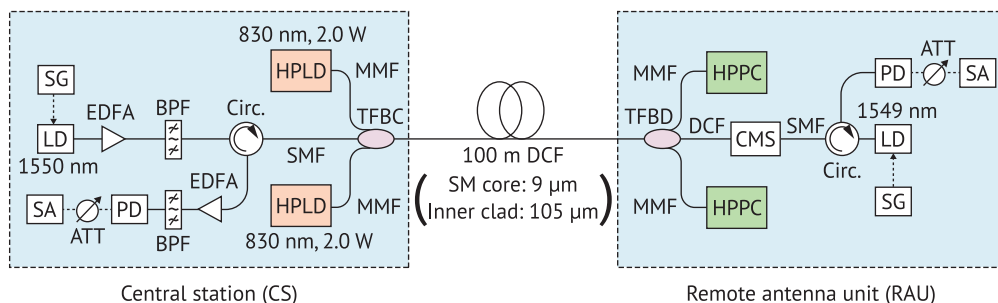


Рис. 6. Схема экспериментальной установки для двунаправленной радиосвязи по волокну (RoF) с оптическим питанием по волокну с двойной отражательной оболочкой DCF: SG – сигнальный генератор, LD – лазерный диод, EDFA – эрбиевый волоконный усилитель, BPF – полосовой фильтр, Circ. – циркулятор, SA – анализатор сигнала, ATT – аттенюатор переменный электрический, PD – фотодиод, HPLD – высокомощный лазерный диод, SMF – одномодовое волокно, MMF – многомодовое волокно, TFBC – тейпированный волоконный объединитель, TFBD – тейпированный волоконный разделитель, HPPC – высокомощный фотовольтаический преобразователь, CMS – фильтр оболочки мод (Источник: M. Matsuura, J. Sato. Bidirectional Radio-Over-Fiber Systems Using Double-Clad Fibers for Optically Powered Remote Antenna Units. IEE Photonics Journal. 2015. Vol. 7. No. 1. P. 7900609)

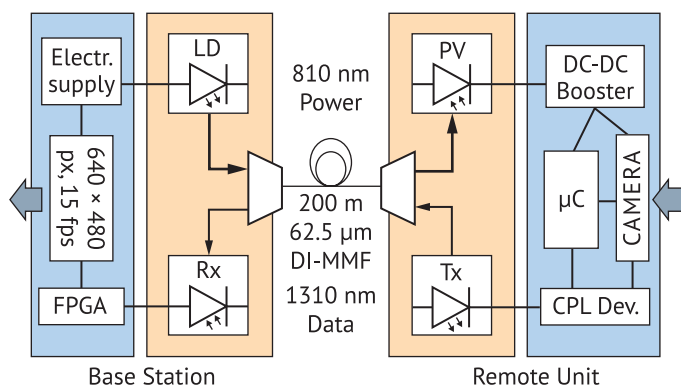


Рис 7. Схема передачи видеосигнала и мощности по одному многомодовому оптическому волокну. Камера запитывается от фотовольтаического преобразователя в отдаленной ячейке (Источник: H.J. Lee, G.S. Jung. Experimental study of a power-over-fiber module and multimode optical fiber for a fishing camera system. Curr. Opt. Photonics. 2017. 1(5). P. 440–455)

(640 × 480 пикселей) обратно на базовую станцию (см. рис. 7). Каналы питания и данных на длине волны 810 и 1310 нм направляются по

одному и тому же волокну. С помощью одноэлементного миниатюрного фотоэлектрического преобразователя и электрического усилителя

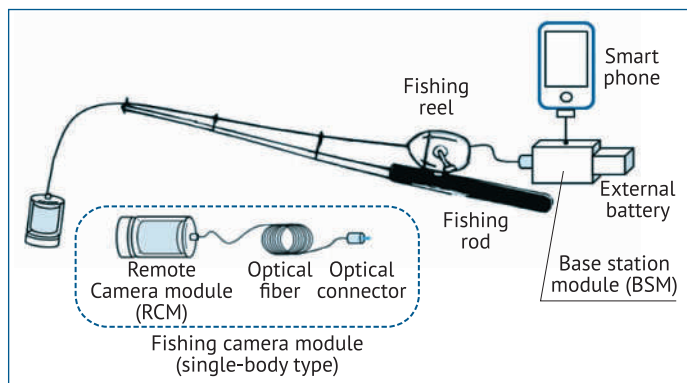


Рис. 8. Концептуальная схема предлагаемой системы рыболовной камеры

(Источник: H.J. Lee, G.S. Jung Experimental study of a power-over-fiber module and multimode optical fiber for a fishing camera system. Curr. Opt. Photonics. 2017. 1(5). P. 440–455)

постоянного тока общая электрическая мощность 100 мВт преобразуется из входящей оптической мощности 400 мВт. Оптическая камера хорошо подходит для работы с датчиками в опасных и электрически чувствительных средах.

PoF-системы питания для подводных применений

Проведено экспериментальное исследование (см. сноску 9) видеокамеры с использованием оптического волокна в качестве лески для ловли рыбы и для питания модуля удалённой камеры (RCM) через многомодовое оптическое волокно по системе PoF (см. рис. 8). Применение RCM без аккумулятора оказалось предпочтительным, поскольку удаление секции для зарядки или замены аккумулятора позволило создать водонепроницаемую конструкцию однокорпусного типа. Средний КПД фотоэлектрического преобразователя мощности в тестируемом модуле PoF составил 32.6% при длине волны 820 нм. Для работы RCM использовалось лазерное излучение мощностью 1.27 Вт при преобразованной мощности в 413 мВт. Поскольку оптическое волокно было намотано на рыболовную катушку, возникли потери

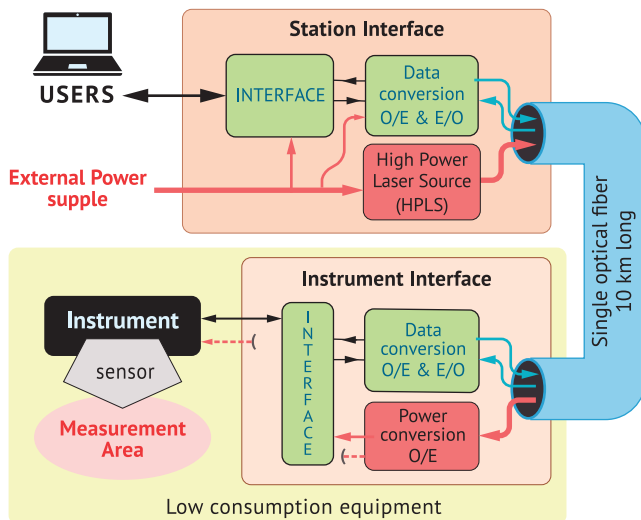
на изгиб и растяжение. Суммарные потери были уменьшены простым держателем, который показал их снижение с 0.8 дБ до 0.38 дБ.

В работе¹¹ представлен прототип PoF – системы для питания удалённого подводного оборудования оптоволоконного кабеля длиной 10 км и обмена по нему данными между береговой станцией и оборудованием. Данная система может быть использована для расширения кабельной сети обсерваторий морского дна.

Схема прототипа системы изображена на рис. 9. Она состоит из интерфейса станции, оптоволоконного (оптического кабеля) и инструментального интерфейса. Последний содержит сенсор (датчик) и два основных блока. В одном из них четыре фотовольтаических преобразователя (E/O), преобразующих оптическую мощность высокомощного лазерного источника ($\lambda = 1480$ нм) в электрическую для питания инструмента (несколько сотен мВт). Второй блок управляет спектраль-

¹¹ Perhirin S., Audo F., Guegan M., Quintard V., Perennou A., Ghisa L., De Blasi S., Auffret Y. A Power-Over-Fiber System and Its Low Consumption Remote Equipment for Submarine Applications. 2013. MTS/IEEE OCEANS – Bergen.

Рис. 9. Схема почти полностью оптического прототипа (Источник: S. Perhirin, F. Audo, M. Guegan, V. Quintard, A. Perennou, L. Ghisa, S. De Blasi, Y. Auffret. A Power-Over-Fiber System and Its Low Consumption Remote Equipment for Submarine Applications. 2013 MTS/IEEE OCEANS – Bergen)



но разделёнными оптическими данными (на длине волны $\lambda = 1550$ нм – для нисходящих данных и 1537 нм – для восходящих) с помощью разработанного протокола.

В реальных условиях (*in situ*) интерфейс станции должен получать данные, поступающие от прибора, и отправлять их в главную обсерваторию морского дна (в лабораторных условиях – на компьютер, как показано на рис. 8).

В экспериментах было продемонстрировано, что по такой десятикилометровой оптической линии можно доставить только около сотни милливатт мощности для питания удалённого оборудования. Дальнейшие исследования планируется посвятить улучшению параметров прототипа и его испытаниям в реальных подводных условиях.

Дроны с питанием и управлением по оптическому волокну для воздушных базовых станций

Услуги мобильной связи могут иметь решающее значение во время различных чрезвычайных ситуаций

и временных событий. Поэтому необходимо, чтобы будущие системы связи были способны оперативно предоставлять такие услуги. В этой связи воздушные базовые станции, использующие дроны, могут быть весьма эффективны в качестве резервных базовых станций мобильной связи в районах, где наземные базовые станции отсутствуют или не работают, а также на временных площадках проведения различных мероприятий. Для этих целей предпочтительно использовать дроны с бесперебойным питанием.

Разработана воздушная базовая станция¹², которая позволяет управлять и маневрировать дронами с помощью оптических волокон (рис. 10). Радиочастотные (РЧ) сигналы данных для воздушной базовой станции и сигналы управления для дрона передавались одновременно. Проведён лётный эксперимент на дроне среднего размера,

¹² Shindo N., Kobatake T., Masson D., Fafard S., Matsuura M. Optically Powered and Controlled Drones Using Optical Fibers for Airborne Base Stations // *Photonics*. 2022. 9. P. 882.

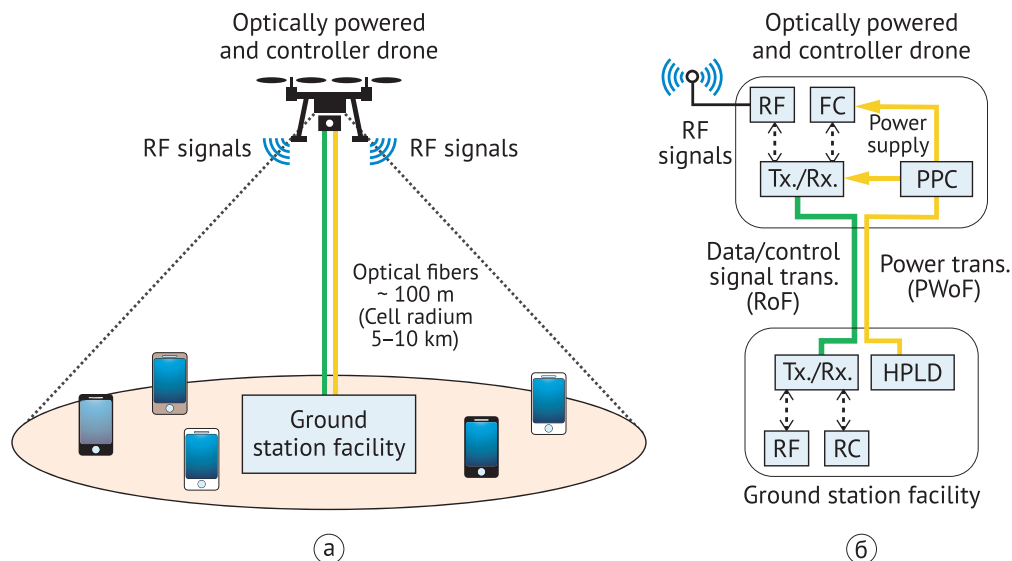


Рис. 10. Схема (а) и конфигурация оптически питаемого дрона с использованием оптического волокна для воздушных базовых станций (б). Здесь PPC – фотовольтаический преобразователь, RC – удалённый контроллер, HPLD – высокоомощный лазерный диод
(Источник: N. Shindo, T. Kobatake, D. Masson, S. Fafard, M. Matsuura. Optically Powered and Controlled Drones Using Optical Fibers for Airborne Base Stations. Photonics. 2022. 9. P. 882)

работающем на оптических волокнах. Оценены характеристики передачи радиочастотных сигналов и управляемость дрона.

Сейсмические съёмки и мониторинг с применением питания по оптическому волокну

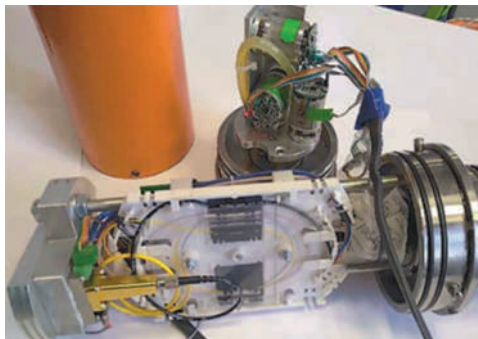
Авторами¹³ разработана и испытана экспериментальная система сейсмической съёмки и мониторинга с питанием по оптическому волокну (см. рис. 11). Она включала в себя GPS-приёмник, блок синхронизации, трёхканальный драйвер

собственного производства для лазерных диодов, информационно-энергетический волоконный кабель и модуль с сейсмодатчиками (в герметичном исполнении, пригодном для применения в подводных условиях). Данные с донного модуля по кабелю передавались на береговую центральную станцию для сбора, обработки и хранения информации.

Оптическое излучение мощностью до 30 Вт, генерируемое лазерным диодом на длине волны 975 нм, транспортировалось по многомодовому волокну кабеля с диаметром сердцевины волокна 105 мкм. Для экспериментов использовались отрезки кабеля длиной 500–1000 м. В подводном модуле были размещены фотовольтаический преобразо-

¹³ Антонов А.Н., Головин С.В., Марков Р.М., Мельников И.В. и др. Применение питания по оптическому волокну в экспериментальной системе сейсмической съёмки и мониторинга // Геофизические исследования. 2022. Т. 23. № 4. С. 55.

Рис. 11. Модуль регистрации
в разобранном виде
(на переднем плане – фотовольтаический
преобразователь, на заднем – корпус
модуля оранжевого цвета) и система
геофонов и гидрофон
(Источник: А.Н. Антонов, С.В. Головин,
Р.М. Марков, И.В. Мельников и др.
Применение питания по оптическому волокну
в экспериментальной системе сейсмической
съемки и мониторинга. Геофизические
исследования. 2022. Т. 23. № 4. С. 55)



ватель, набор датчиков, регистрирующих температуру основных узлов модуля, а также система ориентации модуля.

Устройство было успешно испытано в подводных условиях на реке Волга в районе г. Дубна (с одним подводным модулем) и в Кандалакшском заливе Белого моря, Карелия (с тремя подводными модулями). Точки расположения донных модулей были выбраны так, чтобы расстояние между модулями было не менее 100 м. Результаты испытаний показали, что системы *PoF* – хорошая альтернатива традиционному (но чувствительному к помехам) способу питания сейсмических донных модулей и дают информационную картину сейсмических событий не хуже, чем при обычных способах энергопитания устройств постоянным током с берега или аккумуляторами. Однако энергетическая эффективность предложенной системы пока невелика и требует доработки.

Заключение

Волоконно-оптические системы передачи энергии (*PoF*-системы), исследование и практическое исполь-

зование которых началось с конца 1970-х годов, к настоящему времени продемонстрировали свой потенциал в ряде эффективных разработок для научно-исследовательских и практических применений¹⁴.

Однако их энергетическая эффективность пока ещё недостаточно высокая.

Необходимы дальнейшие исследования по оптимизации преобразования энергии в *PoF*-системах и повышению их эффективности, снижению потерь при передаче мощности, а также по обеспечению способности оптоволоконных систем одновременно передавать электроэнергию и данные, что важно для развития перспективных устройств связи и скоростной передачи информации.

Это позволит в будущем обеспечить экономические преимущества и коммерческую привлекательность волоконно-оптических систем передачи энергии.

¹⁴ Соколовский А.А., Моисеев В.В., Земцов А.И., Ковалев Д.И. Характеристики систем питания электронных устройств оптическим излучением // *Электротехника*. 2020. № 8. С. 42–46.