

УДК 621.372.082.5

DOI: 10.15593/2411-4375/2023.1.03

**А.А. Гаркушин^{1,2}, В.В. Криштон^{1,2,3}, В.А. Максименко¹, М.А. Гарипова^{1,2},
Н.С. Милюков^{1,2}, К.Д. Трапезников^{1,2}, Е.В. Нифонтова^{1,2}, П.В. Зуева^{1,2}**

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

²Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь, Россия

³Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ POWER-OVER-FIBER

Проведен обзор перспективной и развивающейся технологии Power-over-Fiber – передача энергии большой мощности по оптоволокну удалённым потребителям. Рассмотрены преимущества данной технологии, а также возможность её применения на пожаро- и взрывоопасном производстве. Приведены плюсы и минусы разработки прецизионных измерительных систем на основе PoF-технологии. Отмечено, что технология PoF становится все более востребованной в сфере энергоснабжения телекоммуникационных и IT-систем.

Ключевые слова: передача энергии, оптическое волокно, прецизионные измерения, сети 5G, энергоэффективность.

**A.A. Garkushin^{1,2}, V.V. Krishtop^{1,2,3}, V.A. Maksimenko¹, M.A. Garipova^{1,2},
N.S. Milyukov^{1,2}, K.D. Trapeznikov^{1,2}, E.V. Nifontova^{1,2}, P.V. Zueva^{1,2}**

¹Perm National Research Polytechnic university, Perm, Russia

²Perm Research and Production Instrument-Making company, Perm, Russia

³Perm State National Research university, Perm, Russia

PROSPECTS FOR APPLICATION OF POWER-OVER-FIBER TECHNOLOGY

A review of the promising and developing Power-over-Fiber technology – the transmission of high-power energy via optical fiber to remote consumers was carried out. The advantages of this technology, as well as its possible application in fire and explosion hazardous production, are considered. The advantages and disadvantages of developing precision measuring systems based on PoF technology are presented. It is noted that PoF technology is becoming more and more in demand in the field of power supply of telecommunications and IT systems.

Keywords: power transmission, optical fiber, precision measurements, 5G networks, energy efficiency.

Введение

В последние десятилетия происходит активное развитие технологий, так или иначе связанных с оптикой: волоконная оптика, интегральная оптика, квантовая оптика, оптоэлектроника и т.д. Для всех этих направлений в настоящее время применяется обобщающий термин – «фотоника».

Основной упор в фотонике закономерно делается на разработке и совершенствовании оптических инфокоммуникационных систем, т.е. систем передачи и обработки информации, работающих в оптическом частотном диапазоне. Однако имеются не связанные с инфокоммуникационными задачами направления (по крайней мере, напрямую), в которых могут оказаться востребованы технологии фотоники.

Одним из таких перспективных направлений является развитие технологии передачи энергии в виде оптического излучения на значительные расстояния для энергоснабжения потребителей различных типов (датчики, прецизионные системы исполнительные механизмы и др.) [1]. В рамках такого подхода можно выделить два отдельных направления: передача оптической энергии большой мощности в воздухе/вакууме – технология PoA/V (Power-over-Air/Vacuum) [2] и передача оптической энергии большой мощности по оптическим световодам (волокнам) – технология Power-over-Fiber (PoF) [3].

Передача энергии через воздушный канал на современном этапе развития науки и техники не очень эффективна из-за большого поглощения излучения в атмосфере и подвержена влиянию погодных условий, например, становится невозможной в дождь или снег. Решением могут стать волоконно-оптические технологии, которые сегодня являются основным способом передачи информации.

Power-over-fiber – это инновационная технология питания электронных устройств по оптическому волокну [4]. Технология позволяет осуществлять питание устройства с передаваемой мощностью от десятков милливатт до десятков ватт, при этом длина передачи варьируется от нескольких метров до 100 км, обеспечивая при этом электрическую изоляцию между устройством и источником питания [5]. Основными элементами системы PoF (рис. 1) являются источник лазерного излучения (800, 950, 1050, 1480 нм и др.),

волоконно-оптический кабель и фотоэлектрический преобразователь (конвертер оптической энергии).

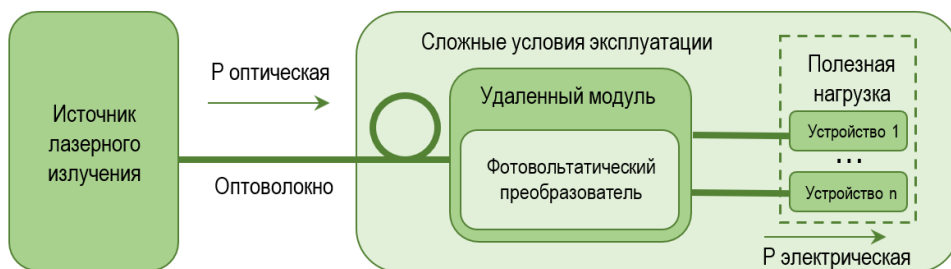


Рис. 1. Структурная схема системы PoF

Оптическая технология передачи энергии большой мощности позволяет передавать энергию оптического (лазерного) излучения удаленным потребителям с её последующим преобразованием в электрическую энергию с помощью фотоэлектрического преобразователя (ФЭПРВС) (рис. 2).

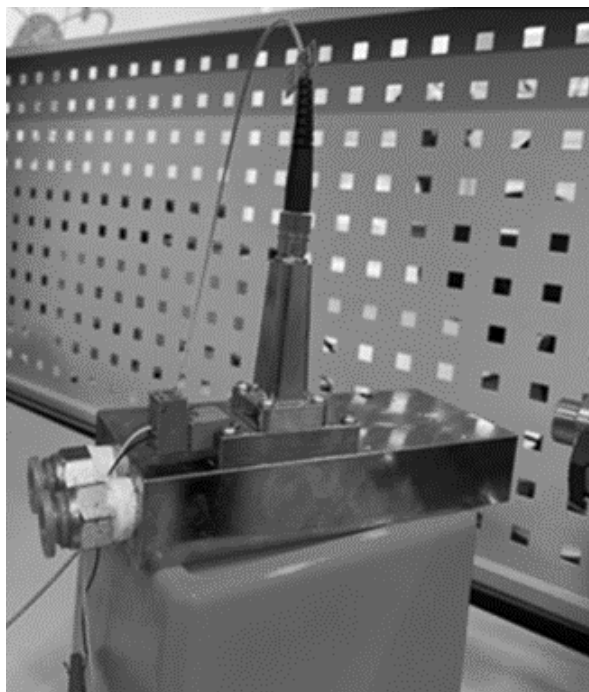


Рис. 2. Фотоэлектрический преобразователь YCH-H6424-25-FC-A фирмы «MH GoPower»

Использование данной технологии позволяет отказаться от металлических проводников и аккумуляторов в тех случаях, когда их применение связано с серьезными проблемами с точки зрения технической реализации. Например, когда это может повлиять на функциональность оборудования или же представлять угрозу для обслуживающего персонала.

Можно выделить следующие основные преимущества технологии PoF:

- полная гальваническая развязка питаемого устройства от источника питания;
- помехозащищенность линии питания;
- отсутствие влияния на соседние линии связи;
- снижение риска возгорания проводки вследствие повреждения изоляции;
- уменьшение габаритов и веса линии питания.

Технологии PoF применяются в контрольно-измерительных системах для электрических сетей (высоковольтные датчики, камеры для контроля подстанций), в судовом и бортовом оборудовании (во взрывоопасных зонах), телекоммуникационных сетях (антенны сотовой связи) и в медицинской технике (высоковольтные элементы лечебно-диагностического оборудования) [6]. Также такие системы могут использоваться для защиты системы энергопитания от опасных электромагнитных импульсов, например, от молнии или для снижения риска воспламенения функциональных узлов системы энергоснабжения в сложных производственных условиях. Энергоснабжение через оптическое волокно также может быть востребовано в приложениях, в которых важно избегать воздействия на чувствительные элементы устройств со стороны электромагнитных полей, создаваемых переменным электрическим током. Также PoF-технологии могут найти применение в военных приложениях, требующих скрытности [4].

Ниже охарактеризованы основные направления, в которых технологии PoF могут быть наиболее востребованы (рис. 3):

- пожаро- и взрывоопасные производства;
- прецизионные датчики и системы на их основе;
- телекоммуникации и специализированные системы, требующие скрытности.

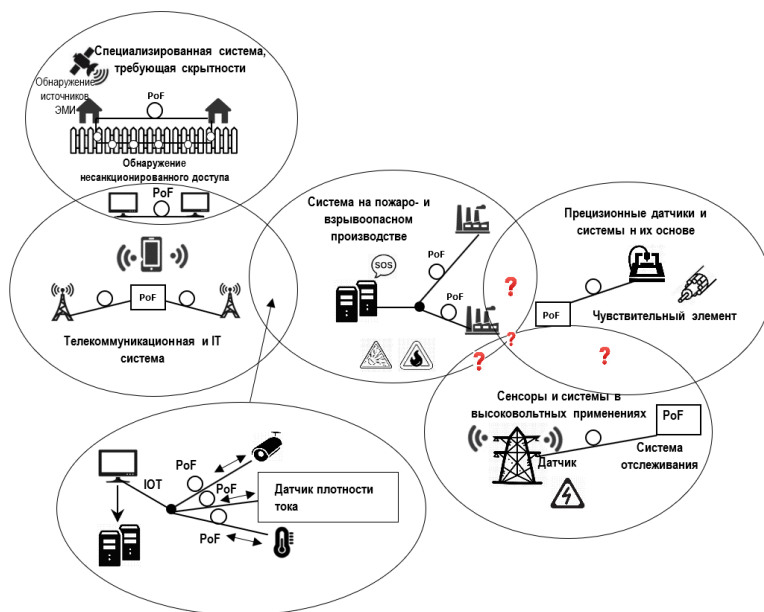


Рис. 3. Основные направления применения систем с использованием технологии PoF

1. Энергоснабжение систем на пожаро- и взрывоопасном производстве

Технология PoF может быть успешно применена для питания сенсоров, средств мониторинга и контроля доступа во взрывоопасном и пожароопасном производстве. К взрывоопасному производству традиционно относят следующие промышленные направления: горнодобывающая промышленность, нефтегазовый сектор, опасные производства военного назначения и другие аналогичные промышленные объекты.

Системы, разработанные с применением технологии PoF, могут успешно применяться для контроля предельно допустимой концентрации взрывоопасных, легковоспламеняющихся и вредных веществ в воздухе, мониторинга параметров окружающей среды, таких как температура, влажность, освещенность, а также для контроля доступа с целью предотвращения проникновения посторонних лиц на критически важные объекты инфраструктуры промышленных предприятий [7, 8].

Сегодня широко распространены традиционные технологии энергоснабжения сенсорных сетей, телеметрических систем и других аналогичных приборов, основанные на питании устройств от проводной

электрической сети. Такие технологии хорошо развиты и широко используются в непрерывном процессе добычи полезных ископаемых, нефти и газа, а также в производственных процессах, связанных с высоким риском возгорания или взрыва.

Однако в научных статьях последнего времени исследователи все чаще заявляют, что оптическая система является более современным, эффективным и безопасным методом передачи энергии для энергоснабжения подобных потребителей. В своих работах авторы публикаций описывают применение технологии передачи энергии большой мощности по волокну исключительно в положительном свете, обходя сложные исследовательские инженерные задачи, которые необходимо решить для внедрения систем на основе технологии PoF в инфраструктуру промышленных объектов.

Авторы многих статей [9, 10] априори считают, что технология Power-over-Fiber пожаро- и взрывобезопасна. Только в немногочисленных источниках, например [11], исследователи проводят работы с целью определения реального уровня безопасности данной технологии. В данной публикации отмечается, что предельная оптическая мощность, которая может быть передана по технологии PoF в условиях пожаро- взрывоопасной среды, не превышает 50 мВт.

С учетом реальной эффективности преобразования энергии оптического излучения в электрическую энергию КПД фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) для используемых длин волн (808, 980, 1064, 1330, 1550 нм) [3, 12] сегодня не превышает 35 % [13]. Исходя из вышеизложенного, получается, что система, установленная на удаленном конце волоконного кабеля, питаемая от фотоэлектрического преобразователя, должна обладать очень низким энергопотреблением, в районе 15–20 мВт. А это, в свою очередь, сужает количество сенсоров, модулей сбора и обработки данных с датчиков физических величин, а также исполнительных устройств, которые могут быть одновременно запитаны по данной технологии, при этом выдерживая строгие требования по пожаро- и взрывобезопасности. Данный факт означает, что существенно сужается число реальных применений, где на промышленных объектах может использоваться технология PoF в ее современном виде.

Также необходимо отметить, что для внедрения технологии PoF в такую ответственную и социально значимую сферу потребуются

колоссальные финансовые вложения, а также огромные трудозатраты, связанные с проведением испытаний и сертификацией с целью подтверждения соответствия требованиям по уровням пожаро- и взрывобезопасности. Отсюда можно сделать вывод, что рентабельность проектов на основе PoF-технологии для промышленных объектов с повышенными требованиями к пожаро- и взрывобезопасности на сегодняшний день находится на крайне низком уровне.

Отметим, что если добиться необходимого повышения КПД системы энергоснабжения удаленных объектов, основанной на технологии PoF, то решения, реализованные с применением этой технологии, имеют все шансы стать конкурентоспособными и востребованными в данном сегменте рынка.

Повысить КПД преобразования оптической энергии в электрическую можно, например, используя нелинейный регулятор для формирования обратной связи между лазерным источником и фотоэлектрическим преобразователем и/или используя новые типы волокна для снижения затухания в линии.

Кроме того, целесообразно направить усилия ученых и инженеров на совершенствование архитектуры PoF-систем. Например, изучить возможность уменьшения массогабаритных параметров системы за счет передачи энергии и обмена данными между блоком управления и датчиками по одному оптоволоконному кабелю. Такой подход существенно сократит объем кабельного хозяйства, а это, в свою очередь, приведёт к уменьшению себестоимости системы в целом.

Таким образом, если сосредоточить усилия ученых и инженеров на конструктивной оптимизации технологии PoF, топологии оптоволоконных сетей и алгоритмов функционирования систем на их основе, а также оптимизировать их с точки зрения потребления электроэнергии, то в конечном итоге это положительно отразится на рентабельности и востребованности таких систем на рынке.

2. Энергопитание прецизионных датчиков и систем на их основе с применением технологии PoF

Прецизионные измерения требуют особо тщательной стыковки всех компонентов системы между собой с целью минимизации паразитных эффектов, таких как шумы (температурный, дробовый и др.) электрические и магнитные поля, возникающие как снаружи системы,

так и порождаемые ее внутренними компонентами. Другими важными аспектами являются затухание полезного сигнала и его целостность при передаче между функциональными узлами. С этой точки зрения технология PoF может внести существенный положительный вклад для достижения новой ступени в прецизионных измерениях. На текущий момент примеры реализации прецизионных измерительных систем с применением технологии PoF описаны в достаточно небольшом перечне научных работ. Обзор наиболее значимых, на наш взгляд, работ представлен ниже.

Например, в статье [13] описываются результаты эксперимента по использованию двухспектрального волоконно-оптического пирометра, имеющего 2 рабочие длины волны, в основу которого входят InGaAs (арсенид галлия-индия) фотодетекторы и малошумящие трансимпедансные усилители с высоким коэффициентом усиления. Нововведением, описанным в статье, является особенная конструкция затвора. Суть её реализации заключается в использовании оптоволоконного переключателя опорной волны, питание которого осуществляется с применением технологии PoF. По сравнению с традиционным методом питания такой подход позволяет поместить переключатель максимально близко к объекту измерения. Рабочий диапазон температур, в котором проводились испытания пирометра с волоконно-оптическим датчиком, составлял 170–530°C. Целью использования данного пирометра является быстрое измерение температуры в процессах обработки материалов или при работе роторного двигателя [14] в тех случаях, когда необходимо определить температуру в конкретной области. Однако в случае быстровращающегося резака или при наличии сильных электромагнитных помех, создаваемых работой двигателя, использование привычных радиационных пирометров, инфракрасных камер и электрических датчиков ограничивается множеством факторов [15, 16]. Такими факторами являются: сложность позиционирования аппаратуры, высокая чувствительность датчиков к электромагнитным помехам, а в случае применения радиационных пирометров накладываются ограничения, связанные с необходимостью компромисса между обеспечением подходящего пространственного разрешения и сбором достаточного количества излучаемого света.

Использование волоконно-оптического пирометра в перечисленных случаях позволяет непосредственно контролировать изменения

температуры с высокой скоростью в точно заданных областях диаметром не более 1 мм. Однако возникает проблема недостаточной точности измерений низких температур. Такая проблема возникает, например, когда требуется измерить температуру полимерных композиционных материалов или металлов с низкой излучательной способностью.

В другой статье, посвящённой применению PoF-технологий при проектировании прецизионных систем [17], описываются принципы построения волоконно-оптической системы, регистрирующей сейсмическую активность в естественных акваториях. Ключевыми элементами данной системы являются молекулярно-электронные датчики-приёмники упругих волн, волоконно-оптические интеррогаторы (системы сбора данных с датчиков), оптоэлектронные компоненты для организации энергоснабжения чувствительных элементов регистратора сейсмоактивности с помощью технологии PoF, оптоволоконные кабели для телеметрии и передачи оптической энергии большой мощности. Такие системы применяют, когда необходимо провести сейсмические исследования акватории мирового океана, в том числе перед началом разработки нефтегазовых месторождений [18]. При решении задач мониторинга со значительной протяжённостью донных кос и долговременной инсталляцией возникает проблема с появлением электромагнитных помех, к ней добавляются и потери при передаче сигнала на большие расстояния, а также необходимость организации пожаробезопасных цепей энергоснабжения компонентов устройства. Следовательно, возникает задача по улучшению отношения сигнал/шум и обеспечению необходимой надёжности работы системы. Известные активно используемые методы хотя и позволяют добиться приемлемых результатов [17], но, в свою очередь, сильно усложняют итоговую схему, делая её более громоздкой и финансово затратной, а нововведённые компоненты также подвергаются влиянию электромагнитных помех. Соответственно, энергоснабжение донной регистрирующей системы для морской сейсморазведки, реализованное на основе технологии PoF, оказалось оптимальным решением указанных проблем [17].

В целом в вышеприведённых статьях авторы отмечают, что применение PoF-технологии уменьшает количество компонентов в системе, что позволяет избежать проблем с синхронизацией между ними. Экспериментальные результаты с использованием оптического

переключателя также дают положительный результат при работе в верхней границе температурного диапазона, увеличив чувствительность измерений на два порядка с мВ/°С до десятых долей мкВ/°С. Но одновременно с этим такой подход усложнил аналогичные измерения на более низких температурах диапазона измерений. Применение технологии PoF в сейсмических регистрирующих системах решает проблему энергоснабжения сейсмодатчиков и гидрофонов, открывая возможность пассивного гидроакустического мониторинга акватории в месте её развёртывания.

Таким образом, плюсы от использования технологии PoF при разработке прецизионных измерительных систем следующие:

- Технология PoF снижает общую сложность схемы, упрощая ее за счет уменьшения числа компонентов.
- Технология PoF обеспечивает быстрое и точное измерение определяемых физических величин, без искажений, связанных с наличием сильных электромагнитных помех.
- Технология PoF упрощает синхронизацию между компонентами устройства за счёт уменьшения их общего числа в сравнении с типовыми конструкциями измерительных приборов.
- Технология PoF обеспечивает пожаробезопасность за счёт отсутствия возможного электрического замыкания.
- Технология PoF уменьшает конечную стоимость системы за счёт минимизации числа используемых компонентов по сравнению классическими подходами.

Однако стоит отметить, что использование технологии PoF при разработке прецизионных измерительных систем в настоящий момент сопряжено с рядом сложностей. Основные из них перечислены ниже:

- Использование оптических компонентов в некоторых случаях может оказывать негативное влияние на процесс измерения физических величин при низких температурах без использования дополнительного усилителя [13].
- Интегрирование решений на базе технологии PoF зачастую связано с изменением архитектуры построения измерительной системы, а также сопряжено с использованием дополнительных оптоэлектронных компонентов, отсутствующих в опробованных ранее решениях. В таких случаях достаточно сложно достоверно оценить

вклад самой технологии PoF в получаемые точностные характеристики измерительных систем.

Например, если обратиться к задачам пирометрии, то необходимо отметить, что на сегодня в научных статьях отсутствуют данные об использовании пирометра для измерения температуры при быстро протекающих циклах нагрева или охлаждения. Это не позволяет сделать вывод о пригодности такого подхода для решения большого числа прикладных задач.

В целом, при создании широкой номенклатуры измерительных приборов с применением технологии PoF в настоящее время имеется еще одна существенная проблема – она заключается в том, что необходимые фотоэлектрические преобразователи для энергоснабжения прецизионных измерительных систем (регистраторов сейсмической активности, пирометров и др.) пока что малодоступны в серийном промышленном производстве, несмотря на их теоретическую проработанность.

3. Энергоснабжение телекоммуникационных и IT-систем (RF: 5G, ARoF, и т.д.) за счет PoF-технологии

Сегодня оптические линии связи успешно конкурируют с традиционными медными линиями и беспроводными технологиями. Основой систем передачи оптического излучения является оптическое волокно. Именно оптическое волокно позволяет многократно увеличить объемы и скорость передаваемой информации по сравнению с традиционной электрической кабельной связью. Технология PoF становится все более востребованной в сегменте передачи данных стандарта 5G.

Для внедрения технологии 5G нового поколения необходимо решить большой перечень сложных задач. Среди них особо стоит выделить следующие: высокая скорость передачи данных, низкая задержка и малое потребление энергии. Совершенствование сетей широкополосного доступа направлено на повышение их рентабельности и предусматривает интеграцию технологии передачи оптической мощности, а также пакетов данных в одном и том же канале одномодового волокна (SMF). Централизованные сети радиодоступа (C-RAN) на основе «аналоговой передачи радиочастотных сигналов по

оптическому волокну» (Analog Radio over Fiber /ARoF) могут справиться с задачами, указанными выше.

Технология ARoF с архитектурой «front-haul» для сетей 5G обладает рядом важных преимуществ, таких как низкие потери при передаче и конструктивная простота, требуемая для реализации технологии удаленных антенных блоков, а также соответствие закладываемым требованиям по пропускной способности, необходимой для сетей 5G нового поколения. Благодаря этому направление развития технологии передачи данных имеет большие перспективы для воплощения в сфере мобильного волоконного соединения, где будет использовано мультиплексирование с пространственным разделением каналов (SDM) [5].

Развитие технологии 5G идет в направлении уменьшения размера ячеек удаленных антенных блоков, что позволяет обеспечить требуемые полосы пропускания радиочастотных сигналов. Однако такой подход приводит к многократному увеличению необходимого количества используемых удаленных антенных блоков. При этом существует потенциальная возможность упростить конструкцию удаленных антенных блоков и снизить их энергопотребление до типовых значений порядка 100 мВт. Для оптического питания удаленных антенных блоков можно использовать решения на базе PoF [3, 19]. В данном случае применение технологии PoF позволит существенно улучшить показатели энергоэффективности инфраструктуры сетей передачи данных нового поколения. Для энергоснабжения удаленных объектов по технологии PoF необходимо использовать оптоволоконные световоды. В настоящий момент в существующих сетях доступа повсеместно используют именно оптическое волокна для организации инфраструктуры передачи данных. Таким образом, оптическое волокно проложено именно в тех местах, где оно требуется для организации сетей доступа «малых сот», а кроме того, оно максимально доступно для потенциальных клиентов. Также стоит отметить, что высоких показателей энергоэффективности можно добиться за счет использования специальных алгоритмов оптимизации энергопотребления в случае организации динамического энергоснабжения удаленных антенных блоков оптической энергией по оптоволоконному кабелю.

Трафик данных стандартов квадратурной амплитудной модуляции – 64QAM, 16QAM 256QAM и квадратурной фазовой моду-

ляции – QPSK с полосой пропускания 100 МГц возможно передавать одновременно с передачей оптической энергии большой мощности по технологии PoF. Сегодня передача радиочастотных сигналов по оптическим световодам (технология RoF) через одномодовое волокно с одновременным введением сигнала PoF осуществима для оптических линий длиной от 100 м до 10 км и мощностью от 0,5 до 2 Вт. При этом величина вектора ошибки соответствует стандарту 5G «New Radio» и связана обратной зависимостью с величиной мощности передаваемой энергии. Величина вектора ошибки 4,3 % может быть достигнута с помощью радиочастотного сигнала с частотой 20 ГГц при использовании квадратурной фазовой модуляции при одновременной передаче 870 мВт оптической мощности на фотоэлектрический элемент, установленный на конце одномодового волокна линии протяженностью 10 км [3].

Таким образом, при разработке систем оптического энергоснабжения телекоммуникационных систем нового поколения следует рассмотреть следующие наиболее важные аспекты:

- 1) увеличение передаваемой мощности;
- 2) увеличение длины передачи;
- 3) использование более сложных конструкций волоконных кабелей;
- 4) увеличение КПД платформ PoF, используемых в телекоммуникационных системах;
- 5) повышение частоты сигнала;
- 6) увеличение скорости передачи данных.

Рассматривая положительные стороны описываемой PoF-технологии с точки зрения ее использования в телекоммуникациях, можно выделить ряд основных преимуществ:

- возможность встраивания в имеющуюся телекоммуникационную инфраструктуру, при этом улучшается технологичность процесса построения материально-технической базы, что позволяет использовать технологию PoF повсеместно;
- внедрение технологии PoF обеспечивает экономное потребление мировых энергоресурсов, а также помогает снизить выбросы углекислого газа в окружающую среду [20], что положительно отразится на мировой экологической обстановке.

Все перечисленные выше преимущества в итоге позволяют интегрировать систему на базе PoF в технологию передачи данных стандарта 5G, тем самым увеличивая ее конкурентоспособность.

Стоит отметить, что в статьях, посвященных проблемам внедрения технологии PoF в телекоммуникациях, авторы зачастую используют упрощенные инфраструктурные модели. Это не позволяет провести полноценный анализ преимуществ и недостатков таких разработок. Например, в статье [3] рассматривается лишь один объект для внедрения технологии PoF – стадион. Следовательно, нельзя определить точно, как данная система будет работать в менее благоприятных условиях и покажет себя в критических ситуациях при использовании в гражданской, промышленной или военной инфраструктуре. К вышеизложенному следует добавить, что результаты исследований, приводимых в статьях по данной тематике, зачастую представлены только с использованием одних лишь методов моделирования. Так, в статье [19] рассматриваются два способа передачи данных и энергоснабжения по оптическому волокну: с одной общей сердцевиной, используемой одновременно для передачи данных и энергоснабжения по оптическому волокну, и с несколькими сердцевинами многосердцевинных оптических волокон, выделенными для передачи данных, а также несколькими выделенными сердцевинами для энергоснабжения. При этом все результаты получены с помощью программного обеспечения, а опытные данные авторами публикации не приведены. Для объективной оценки требуется больше результатов натурных испытаний.

Еще одним минусом при внедрении решений на базе PoF следует указать сложность реализации на практике данной технологии. При этом, рассматривая сложность реализации технологии PoF для 5G, нужно отметить, что при одновременной передаче и данных, и энергии по одному оптическому каналу возникает дополнительная хроматическая дисперсия, особенно на высоких (десятки ГГц) несущих частотах, что значительно ограничивает доступную дальность передачи энергии [2].

Если рассматривать вопрос интеграции PoF в существующую телекоммуникационную инфраструктуру, можно предположить, что она теоретически возможна, но потребует мощных источников лазерного излучения [21], фотоэлектрических преобразователей и пассивных устройств. Также для ее реализации целесообразно предо-

ставить доступ к централизованной конфигурации большому числу пользователей, тем самым разделив накладные расходы на содержание инфраструктуры между всеми абонентами.

Отдельно стоит отметить, что компоненты, необходимые для реализации гибридной системы 5G с оптическим питанием, такие как лазерные диоды большой мощности, весьма дорогостоящи, что в целом негативно отражается на конкурентоспособности систем, разработанных на базе технологии PoF. Данная проблема может быть решена, если рассматривать использование альтернативных, более дешевых источников оптического излучения большой мощности, например, мощных светоизлучающих диодов видимого или ИК оптического диапазона.

До конца непроработанным является и вопрос надежности систем, реализованных с применением технологии PoF. Учитывая, что в данном случае используются сложные оптоэлектронные компоненты: лазерные диоды высокой мощности и фотоэлектрический преобразователь, то в конечном итоге это отразится на времени бесперебойной работы всей системы, а также на том, как часто будут проводиться регламентное техническое обслуживание и ремонтные работы.

В целом технология PoF обеспечивает простой, менее энергозатратный, экономичный, а главное, быстровнедряемый способ одновременной передачи данных и оптической энергии большой мощности по уже проложенным телекоммуникационным оптоволоконным каналам связи.

Заключение

Возможность внедрения PoF-технологии в настоящее время изучается во многих научно-исследовательских и коммерческих организациях. Соответственно, можно предположить, что работы по развитию данного направления будут востребованы в ближайшем будущем. Технология PoF может успешно применяться в сфере энергоснабжения систем на пожаро- и взрывоопасном производстве, для энергоснабжения прецизионных датчиков и систем на их основе, а также для энергоснабжения телекоммуникационных и IT-систем. Данная технология обладает рядом плюсов: взрыво- и пожаробезопасность, экологичность, доступность, эффективность, возможность быстрого внедрения, экономичность и надёжность. Однако

существуют и нерешенные проблемы. Они связаны с дефицитом надежных и энергоэффективных излучателей, фотоэлектрических преобразователей и с отсутствием оптимальных алгоритмов управления такими системами. Решение указанных проблем является необходимым условием для внедрения PoF-технологии не только в исследовательских лабораториях, но и на предприятиях реального сектора промышленности.

Список литературы

1. Передача энергии лазерным излучением в свободном пространстве Бойчук Е.С., Киреева Н.М., Гаркушин А.А., Струк В.К., Криштоп В.В., Карпец Ю.М., Ливашвили А.И // Бюллетень научный сообщений: сб. науч. тр. Вып. 25. – 2020. – №. 25. – С. 91–102.
2. Charging a smartphone across a room using lasers / V. Iyer [et al.] // Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies. – 2018. – Т. 1. – №. 4. – С. 1–21.
3. Optically Powered Radio-Over-Fiber Systems in Support of 5G Cellular Networks and IoT / Fahad M.A. Al-Zubaidi, Student Member, IEEE, J.D. López Cardona, D.S. Montero, C. Vázquez, Senior Member // IEEE Journal of lightwave technology. – 2021. – Vol. 39. – №13.
4. Системы передачи энергии по оптическому волокну / А.А. Гаркушин, В.К. Струк, В.В. Криштоп, Е.С. Бойчук, Ю.М. Карпец // Бюллетень научный сообщений: сб. науч. тр. Вып. 25. – 2020. – №. 25. – С. 48–53.
5. Carmen Vázquez, Multicore fiber scenarios supporting power over fiber in radio over fiber systems / Juan Dayron López-cardona, Pedro Contreras Iallana, David Sánchez Montero, Fahad Mohammed Abdulhussein Al-Zubaidi, Sandra Pérez-Prieto, Isabel Pérez Garcilópez // IEEE journal of lightwave technology. – 2019.
6. Крюков Ю.А., Антонов А.Н. Интегрированная система передачи электрической энергии и данных на основе волоконно-оптического кабеля связи. – № RU114236U1 – 2011.
7. Remote Optical Powering Using Fiber Optics in Hazardous Environments / J.D. Lopez-Cardona, Carmen Vazquez, Senior Member, IEEE, David Sanchez Montero, Pedro Contreras Lallana // IEEE journal of lightwave technology. – 2018. – Vol. 36, № 3. – February 1.

8. Smart Remote Nodes Fed by Power Over Fiber in Internet of Things Applications / Juan D. López-Cardona, David Sánchez Montero, Carmen Vázquez, Senior Member // IEEE sensors journal. – 2019. – Vol. 19, № 17.

9. Progress towards vertically stacked InAlGaAs photovoltaic power converters for fiber power transmission at 1310 nm. / Wilkins M.M., Beattie M.N., Xia, D. Tam, M.C. Zamiri, M. Valdivia, C.E. Fafard, S., Masson D.P., Krich, J.J. Wasilewski, Z.R. // Yokohama. – Japan, 23–25 April 2019.

10. Klamouris. C. Condition monitoring of wind turbine rotor blades using optically powered sensors / Worms K., Wegh F., Leuthold J., Stork W // Yokohama, Japan. – 23–25 April 2019. – P. OWPT-7-02.

11. Задворнов С.А., Соколовский А.А. О пажаро- и взрыво-безопасности волоконно-оптических гибридных измерительных систем // Бюллетень научных сообщений: сб. науч. тр. Вып. 3. – 2007. – №. 3. – С. 11–14.

12. Зависимость характеристик системы PoF от расстояния передачи энергии / А.А. Гаркушин, Е.С. Бойчук, И.Р. Дроздов, В.К. Струк, Ю.А. Конин, В.А. Щербаков, В.А. Максименко, В.В. Криштоп // Бюллетень научных сообщений: сб. науч. тр. Вып. 6. – 2021. – №. 6. – С. 42–43.

13. Fiber-Optic Pyrometr with Optically Powered Switch for Temperature Measurements / C. Vazques, S. Perez-Prieto, J. Lopez-Cardona // Scopus. – 2018. – С. 1–10.

14. Temperature fiber optic pyrometer for fast time resolved temperature measurements / M. Willsch, T. Bosselmann, D. Gaenshirt, J. Kaiser, M. Villnow, M. Banda // Low Proceedings of Sixth European Workshop on Optical Fibre Sensors. – Limerick, Ireland, 31 May–3 June 2016. – Paper 99160R.

15. Esenowo K, Etu I., Ukanide V.N. The design of a signal conditioning & acquisition elements of a chopped broadband radiation pyrometer // Int. J. Res. Eng. Technol. – 2015. – Vol. 4. – P. 461–470.

16. Burgess G.K., Foote P.D. Characteristics of Radiation Pyrometers; Bulletin of Bureau of Standards / University of Michigan: Ann Arbor, MI, USA, 1915. – Vol. 12.

17. Российский опыт и перспективы создания систем сейсмического 4D мониторинга / С.В. Головин, Ю.А. Разин,

С.В. Курков, Е.Р. Надеждин // Геофизические исследования. – 2019. – Т. 20, № 4. – С. 52–64.

18. Разин А.Ю., Головин С.В. 4D сейсмический мониторинг нефтегазовых шельфовых месторождений акваторий северных морей с помощью донных регистрирующих систем // Научный аспект. – 2018. – № 4. – С. 779–798.

19. Modes J.D. Optically feeding 1.75 W with 100 m MMF in efficient C-RAN front-hauls with Sleep / J.D. Modes, López Cardona, P.C. Lallana, R. Altuna, A. Fresno-Hernández, X. Barreiro, C. Vázquez Senior Member // Journal of lightwave technology. – 2021. – Vol. 39, № 24. – December 15.

20. Vázquez C., MulticoreFiber Scenarios Supporting Power Over Fiber in Radio Over Fiber Systems / J.D. López-Cardona, P.C. Lallana, D.S. Montero, F.M.A. Al-Zubaidi, S. Pérez-Prieto, I.P. Garcilópez // IEEE Access 2019.

21. Kuboki H., Matsuura M. Optically powered radio-over-fiber system based on center- and offset-launching techniques using a conventional multimode fiber // Opt. Lett. – 2018. – Vol. 43, no. 5. – P. 1067–1070.

References

1. Boichuk E.S., Kireeva N.M., Garkushin A.A., Struk V.K., Krishtop V.V., Karpets Iu.M., Livashvili A.I. Peredacha energii lazernym izlucheniem v svobodnom prostranstve [Energy transfer by laser radiation in free space]. *Biulleten' nauchnyi soobshchenii. Sbornik nauchnyi trudov*, 2020, iss. 25, no. 25, pp. 91-102.

2. Iyer V. et al. Charging a smartphone across a room using lasers. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 2018, vol. 1, no. 4, pp. 1-21.

3. Fahad M.A. Al-Zubaidi, Student Member, IEEE, López Cardona J.D., Montero D.S., Vázquez C., Senior Member. Optically Powered Radio-Over-Fiber Systems in Support of 5G Cellular Networks and IoT. *IEEE Journal of lightwave technology*, 2021, vol. 39, no. 13.

4. Garkushin A.A., Struk V.K., Krishtop V.V., Boichuk E.S., Karpets Iu.M. Sistemy peredachi energii po opticheskomu voloknu [Optical fiber power transmission systems]. *Biulleten' nauchnyi soobshchenii. Sbornik nauchnyi trudov*, 2020, iss. 25, no. 25, pp. 48-53.

5. Juan Dayron López-cardona, Pedro Contreras Iallana, David Sánchez Montero, Fahad Mohammed Abdulhussein Al-Zubaidi, Sandra Pérez-Prieto, Isabel Pérez Garcilópez. Carmen Vázquez, Multicore fiber scenarios supporting power over fiber in radio over fiber systems. *IEEE journal of lightwave technology*, 2019.

6. Kriukov Iu.A., Antonov A.N. Integririvannaia sistema peredachi elektricheskoi energii i dannykh na osnove volokonno-opticheskogo kabelia sviazi [Integrated system for the transmission of electrical energy and data based on a fiber-optic communication cable]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. RU114236U1 (2011).

7. Lopez-Cardona J.D., Vazquez Carmen, Senior Member, IEEE, Sanchez Montero David, Contreras Lallana Pedro. Remote Optical Powering Using Fiber Optics in Hazardous Environments. *IEEE journal of light-wave technology*, 2018, vol. 36, no. 3, february 1.

8. Juan D. López-Cardona, Sánchez Montero David, Vázquez Carmen, Senior Member. Smart Remote Nodes Fed by Power over Fiber in Internet of Things Applications. *IEEE sensors journal*, 2019, vol. 19, no. 17.

9. Wilkins M.M., Beattie M.N., Xia, D. Tam, M.C. Zamiri, M. Valdivia, C.E. Fafard, S., Masson D.P., Krich, J.J. Wasilewski, Z.R. Progress towards vertically stacked InAlGaAs photovoltaic power converters for fiber power transmission at 1310 nm. Yokohama. Japan, 23-25 April 2019.

10. Worms K., Klamouris C., Wegh F., Leuthold J., Stork W. Condition monitoring of wind turbine rotor blades using optically powered sensors. Yokohama, Japan. 23-25 April 2019, OWPT-7-02 p.

11. Zadvornov S.A., Sokolovskii A.A. O pazharo- i vzryvobezopasnosti volokonno-opticheskikh gibridnykh izmeritel'nykh sistem [About fire and explosion safety of fiber-optic hybrid measuring systems]. *Biulleten' nauchnyi soobshchenii. Sbornik nauchnyi trudov*, 2007, iss. 3, no. 3, pp. 11-14.

12. Garkushin A.A., Boichuk E.S., Drozdov I.R., Struk V.K., Konin Iu.A., Shcherbakov V.A., Maksimenko V.A., Krishtop V.V. Zavisimost' kharakteristik sistemy PoF ot rasstoianiiia peredachi energii [Dependence of PoF system characteristics on power transmission distance]. *Biulleten' nauchnyi soobshchenii. Sbornik nauchnyi trudov*, 2021, iss. 6, no.6, pp. 42-43.

13. Vazques C., Perez-Prieto S., Lopez-Cardona J. Fiber-Optic Pyrometr with Optically Powered Switch for Temperature Measurements. *Scopus*, 2018, pp. 1-10.

14. Willsch M., Bosselmann T., Gaenshirt D., Kaiser J., Villnow M., Banda M. Temperature Fiber Optic Pyrometer for Fast Time Resolved Temperature Measurements. *Low Proceedings of Sixth European Workshop on Optical Fibre Sensors*. Limerick, Ireland, 31 May-3 June 2016, Paper 99160R.
15. Esenowo K., Etu I., Ukanide V.N. The design of a signal conditioning & acquisition elements of a chopped broadband radiation pyrometer. *Int. J. Res. Eng. Technol.*, 2015, vol. 4, pp. 461-470.
16. Burgess G.K., Foote P.D. Characteristics of Radiation Pyrometers; Bulletin of Bureau of Standards. University of Michigan: Ann Arbor, MI, USA, 1915, vol. 12.
17. Golovin S.V., Razin Iu.A., Kurkov S.V., Nadezhdin E.R. Rossiiskii opyt i perspektivy sozdaniia sistem seismicheskogo 4D monitoringa [Russian experience and prospects for creating 4D seismic monitoring systems]. *Geofizicheskie issledovaniia*, 2019, vol. 20, no. 4, pp. 52-64.
18. Razin A.Iu., Golovin S.V. 4D seismicheskii monitoring neftegazovykh shel'fovykh mestorozhdenii akvatorii severnykh morei s pomoshch'iu donnykh registriruiushchikh sistem [4D seismic monitoring of offshore oil and gas fields in the waters of the northern seas using bottom recording systems]. *Nauchnyi aspekt*, 2018, no. 4, pp. 779-798.
19. Modes J.D., López Cardona, Lallana P.C., Altuna R., Fresno-Hernández A., Barreiro X., Vázquez C. Senior Member. Modes J.D. Optically feeding 1.75 W with 100 m MMF in efficient C-RAN front-hauls with Sleep. *Journal of lightwave technology*, 2021, vol. 39, no. 24, December 15.
20. Vázquez C., López-Cardona J.D., Lallana P.C., Montero D.S., Al-Zubaidi F.M.A., Pérez-Prieto S., Garcilópez I.P. MulticoreFiber Scenarios Supporting Power Over Fiber in Radio Over Fiber Systems. *IEEE Access*, 2019.
21. Kuboki H., Matsuura M. Optically powered radio-over-fiber system based on center- and offset-launching techniques using a conventional multimode fiber. *Opt. Lett.*, 2018, vol. 43, no. 5, pp. 1067-1070.

Сведения об авторах

ГАРКУШИН Алексей Алексеевич
e-mail: garkushin@pnppk.ru

Заместитель директора научно-образовательного центра по проектам, Пермская научно-производственная приборостроительная компания; Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, Россия)

КРИШТОП Виктор Владимирович
e-mail: Krishtop@pnppk.ru

Главный научный сотрудник НИИ радиопотоники и оптоэлектроники, заместитель директора научно-образовательного центра по проектам, Пермская научно-производственная приборостроительная компания; Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, Россия)

МАКСИМЕНКО Виталий Александрович
e-mail: mva30@mail.ru

Доцент, кандидат физико-математических наук, Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, Россия)

ГАРИПОВА Мария Альфритовна
e-mail: GaripovaMA@pnppk.ru

Техник, Пермская научно-производственная приборостроительная компания; Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, Россия)

ТРАПЕЗНИКОВ Кирилл Дмитриевич
e-mail: tkd@pnppk.ru

Техник, Пермская научно-производственная приборостроительная компания; Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, Россия)

About the authors

GARKUSHIN Alexey Alekseevich
e-mail: garkushin@pnppk.ru

Deputy Director of the Scientific and Educational Center for Projects Perm Research and Production Instrument-Making Company; Perm National Research Polytechnic University (Perm, Russia)

KRISHTOP Viktor Vladimirovich
e-mail: Krishtop@pnppk.ru

Chief Researcher of the Research Institute of Radiophotonics and Optoelectronics, Deputy Director of the Scientific and Educational Center for Projects Perm Research and Production Instrument-Making Company; Perm National Research Polytechnic University (Perm, Russia)

MAKSIMENKO Vitaly Aleksandrovich
e-mail: mva30@mail.ru

Associate Professor, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Perm Scientific and Production Instrument-Making Company, Perm National Research Polytechnic University (Perm, Russia)

GARIPOVA Maria Alfritovna
e-mail: GaripovaMA@pnppk.ru

Technician, Perm Research and Production Instrument-Making Company; Perm National Research Polytechnic University (Perm, Russia)

TRAPEZNIKOV Kirill Dmitrievich
e-mail: tkd@pnppk.ru

Technician, Perm Research and Production Instrument-Making Company; Perm National Research Polytechnic University (Perm, Russia)

НИФОНТОВА Елизавета Васильевна
e-mail: *NifontovaEV@pnppk.ru*

Техник, Пермская научно-производственная приборостроительная компания; Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, Россия)

NIFONTOVA Elizaveta Vasilievna
e-mail: *NifontovaEV@pnppk.ru*

Technician, Perm Research and Production Instrument-Making Company; Perm National Research Polytechnic University (Perm, Russia)

ЗУЕВА Полина Владимировна
e-mail: *ZuevaPV@pnppk.ru*

Техник, Пермская научно-производственная приборостроительная компания; Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, Россия)

ZUEVA Polina Vladimirovna
e-mail: *ZuevaPV@pnppk.ru*

Technician, Perm Research and Production Instrument-Making Company; Perm National Research Polytechnic University (Perm, Russia)

Финансирование: исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0005)

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Получена: 09.01.2023

Одобрена: 15.01.2023

Принята к публикации: 01.02.2023

Financing: the research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FSNM-2023-0005).

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors have made an equivalent contribution to the publication.

Received: 09/01/2022

Approved: 15/01/2023

Accepted for publication: 01/02/2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Перспективы применения технологии POWER-OVER-FIBER / Гаркушин А.А., Криштоп В.В., Максименко В.А., Гарипова М.А., Милуков Н.С., Трапезников К.Д., Нифонтова Е.В., Зуева П.В. // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 1. – С. 46–67.

Please cite this article in English as: Garkushin A.A., Krishtop V.V., Maksimenko V.A., Garipova M.A., Milyukov N.S., Trapeznikov K.D., Nifontova E.V., Zueva P.V. Prospects for application of POWER-OVER-FIBER technology // Applied photonics, 2023, no. 1, pp. 46-67.