

# Перспективы и безопасность оптоволоконных линий на основе GOF, ROF, PSF, а также формата SMPTE и РЭА для потоковой передачи данных

Вадим Экземплярский

Сегодня создание устойчивой и безопасной связи зависит от совершенствования разработчиками материалов оптоволоконных кабелей разного назначения и РЭА, безошибочно воспринимающей в потоке цифровой сигнал на расстояниях в несколько километров. Благодаря новым технологиям и разработкам оптоволоконные кабели теперь могут надёжно обеспечивать питание электронных устройств, двустороннюю передачу видео- и аудиоданных, что делает их идеальными для систем безопасности, видеонаблюдения на больших территориях и массового звукового оповещения. В статье представлены примеры современного оборудования, используемые протоколы и технические решения для оптоволоконных линий связи.

## Аргументы защиты систем безопасности

Поскольку передача сигналов по радиоканалу, в том числе посредством спутниковой, сотовой (LTE) и радиосвязи, сопряжена с рисками перехвата, «глушения» внешними средствами и в целом довольно слабой помехозащищённостью, устройства двусторонней связи используются не только в производстве и в инженерных целях, но и в системах критической инфраструктуры и безопасности. До сего дня проводная передача данных остаётся наиболее надёжной и востребованной в системах «ответственной» связи, в то время как радиоканал на разных частотах применяется либо дублирующим средством доставки информации, либо в устройствах и системах бытового назначения. Дополнительная системная надёжность обеспечивается тем, что при оптоволоконном кабельном соединении имеется резервный канал для устране-

ния неполадок в случае сбоя основного. Стандартное 10-контактное соединение для двусторонней связи с помощью преобразователя-конвертера применяют в условиях, когда соединения гарнитуры необходимо подключить к нескольким источникам и к оператору. В случае аварийной ситуации резервный канал обратной связи автоматически управляется с конвертера и становится основным: потоки данных переключаются с использованием дополнительной пары в кабеле, если оптоволокно повреждено.

## Разновидность оптоволоконных кабелей для линий связи

Рассматривая разновидности оптоволоконных кабелей современного производства, уместно разделить их по назначению и конструктивным особенностям (в том числе количеству оптических каналов), а также по способу прокладки;

наблюдаются существенные различия в строении и материалах (разного поглощения) – от изоляции-диэлектрика, гидрофобного заполнителя как водоблокирующего элемента, бандажной ленты, оцинкованных проволок до непосредственно оптоволоконной жилы (рис. 1). По способу прокладки различают оптоволоконные кабели стационарной или временной прокладки. К последнему случаю относится кабель (рассмотрим далее на примерах), используемый в линиях связи больших расстояний, но с разъёмными соединениями и возможностью стыковки с помощью специальных муфт. Он подключается к движущейся, мобильной или съёмной РЭА, в том числе для обеспечения потоковых данных аудио- и видеосвязи с высокой пропускной способностью и минимальными потерями сигнала.

Оптические (оптоволоконные) кабели производятся в разных модификациях. При общем функционале их можно разделить по сферам применения и условиям эксплуатации: наземной (в том числе навесной, воздушной прокладки), подземной, подводной, специальной. Самонесущий оптоволоконный кабель – полностью диэлектрическая конструкция с центрально расположенным оптическим модулем. Может содержать от 1 до 24 оптических волокон (каналов для передачи данных), причём каждый канал – отдельное стандартное одномодовое волокно с подавленным «водяным пиком». К примеру, плоский диэлектрический оптоволоконный кабель наружного исполнения с силовыми элементами из ERP-пластика модификации RS-Link-GYFXTBY-12 состоит из 12 волокон (рис. 2). Одна катушка (объём) рассчитана на длину прокладки 2 км. Тип волокна – одномодовое G.652D с негорючим диэлектриком типа LSZH. Типичная область применения такого оптоволоконного кабеля – подключение по технологиям GEPON и GPON. GPON (GigabitPON) – пассивная оптическая технология, обеспечивающая многофункциональ-

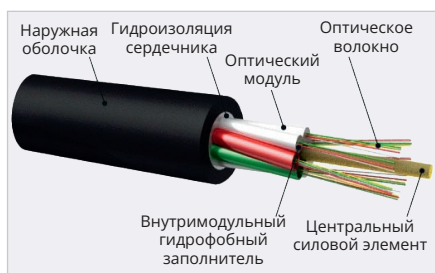


Рис. 1. Составляющие оптоволоконного кабеля

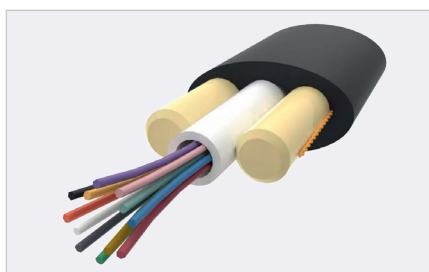


Рис. 2. Самонесущий оптоволоконный кабель модификации RS-Link-GYFXTBY-12

ный широкополосный доступ в Интернет с качественным и надёжным соединением на скоростях до 1 Гбит/с. По одному оптоволоконному кабелю, проведённому непосредственно в квартиру или частный дом, современный абонент получает услуги передачи данных и телефонии с гарантированным качеством обслуживания. Сочетается с разными абонентскими терминалами, к примеру, GPON ONU ZXA10 F601 (RS-GPON-ZXA10-F601), 1xGE, 1x10/100/1000 Base-T с внешним источником питания и напряжением 12 В. Оптоволоконный кабель ZXA10 F601 как элемент оптической GPON для построения сети доступа с одним Ethernet-портом 10/100/1000М для применения в режиме FTTH и с GPON-интерфейсом 2,488 ГГц используется в случаях, когда иные типы оптоволоконных кабелей типа FTTH не могут обеспечить необходимую надёжность кабельной инфраструктуры. К примеру, в условиях повышенных ветровых и гололёдных нагрузок, а также на линиях электропередач для монтажа требуются полностью диэлектрические кабели.

Разумеется, оптоволоконный кабель, предназначенный для эксплуатации в особых условиях, оснащают дополнительной внешней защитой: в трубах, кофрах или кабель-каналах. Отдельный вариант – экранированный помехозащищённый кабель-канал. Частные случаи применения – на дне речной и морской акваторий. Количество волокон (каналов) указано также в конце маркировки кабеля цифрами или другими символами. Устойчивость к продольным натяжениям кабелю придана конструктивно введением двух FRP-прутков (Fiber-epoxy Reinforced Plastic) диаметром 0,8 мм. Наружная оболочка изготовлена из устойчивого к ультрафиолету и негорючего полиэтилена для защиты волокон от воздействия водорода. Может крепиться анкерами типа ODWAC-22, что значительно экономит средства на монтаже [2, 4, 11]. В отличие от рассмотренного выше кабеля технологии GPON, дроп-кабель (DROP) почти незаменим для подвешенного монтажа. Такую востребованность связывают с развитием PON в малоэтажном (частном) секторе, когда участок дроп-кабеля применяют заключительным (оконечным) элементом линии связи. Дроп-кабель с оболочкой из негорючего безгалогенного низкодымного материала LSZH соединяет абонента (пользователя) с сетью телеком-оператора, предоставляющего почти неограниченный спектр услуг, касающихся доступа в сеть Интернет, видеосервис

(просмотр видео любых форматов, в том числе удалённого домофона), стационарный телефон и соединения в системе IoT (видеонаблюдение, удалённое управление датчиками и устройствами). Технология PON позволяет быстро и качественно передавать данные посредством всего одного оптического волокна-канала. Таким является оптический самонесущий плоский дроп-кабель RS-Link-FTTH с типом волокна G.652D. В кабеле от 1 до 12 волокон (рис. 3). Силовой элемент – 2 стальные проволоки диаметром 0,45 мм, одна стальная проволока диаметром 1 мм. Такая особенность конструкции кабеля позволяет выдерживать нагрузку при растяжении 900 Н. Применяется в условиях протяжки линий связи между зданиями и опорами на расстоянии до 50 м. В названии, как правило, указана технология и предназначение FTTH и количество волокон. Особенным техническим достоинством оптоволоконных кабелей в пожаробезопасной и притом гибкой оболочке LSZH специалисты признают их пригодность для общественных мест с массовым пребыванием людей. Материалы класса LSZH не распространяют горение, не содержат галогенов и не выделяют коррозионно-активных продуктов, что при прокладке в помещениях является обязательным условием.

Специалисты в области телекоммуникаций сталкиваются с проблемой обеспечения устойчивой связи, когда необходимо размещать видеокамеры на расстоянии до 2 км от контроллеров и серверов. Частные случаи решаются специалистами телевидения, видео- и киностудий. В этой сфере также необходим один многофункциональный, помехозащищённый, прочный, а потому и удобный во многих отношениях кабель питания и передачи данных длиной в несколько километров, чтобы обеспечивать работу от переносной камеры до передвижной студии (на автомобильном шасси). Гибридный оптоволоконный кабель NOVACORD SMPTE 311 HD предназначен для камерных каналов для мобильного и стационарного применения, обеспечивающих передачу сигналов высокой чёткости в соответствии с форматом SMPTE. Каждый кабель содержит медные линии: 4 силовые для питания камер AWG 20 (4×0,6 мм) и 2 для передачи команд управления AWG 24 (2×0,22 мм), а также 2 одномодовых канала оптоволоконного Corning Single-Mode 9/125 мкм (2×SM) для передачи цифровых потоков видео- и аудиосиг-

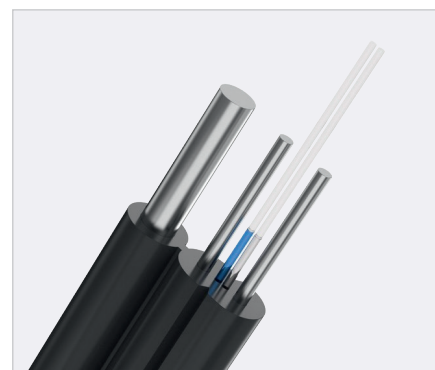


Рис. 3. Оптоволоконный кабель RS-Link-FTTH

налов. Совместим с профессиональными и вещательными камерами Sony, JVC, Panasonic, Grass Valley (и др.) и Blackmagic Design (через Blackmagic Fiber Converter) в соответствии со стандартами SMPTE-311M/304. Рабочая температура эксплуатации в диапазоне  $-40...+80^{\circ}\text{C}$ . Оболочка FRNC – пожаробезопасная.

*Технические характеристики оптоволоконного кабеля ADSS8-1 (рис. 4):*

- допустимое растягивающее усилие: 1 кН;
- допустимое раздавливающее усилие: не менее 0,3 кН/см;
- диапазон рабочих температур:  $-60...+70^{\circ}\text{C}$ ;
- продольное проникновение воды: не более 3 мл за 24 часа на 1 метр длины;
- диаметр кабеля, мм:  $5,2 \pm 0,2$ ;
- масса кабеля, кг/км, не более: 25, в катушке 2 километра кабеля.

Оптический кабель CO-ADSS8-1 применяется для подвеса (при высоких требованиях по устойчивости к внешним электромагнитным воздействиям) на опорах воздушных линий связи, опорах контактной сети железных дорог, линий электропередач с максимальной величиной потенциала электрического поля до 12 кВ, а также между зданиями и сооружениями.

Оптический модуль состоит из 8 одномодовых стандартных оптических волокон G657A1/G.652D (ITU-T G.652) с окраской. Оптический модуль выполнен в виде трубки из полибутилентерефталата, заполненной гидрофобным наполнителем. Наружная оболочка из полиэтилена высокой плотности с упрочняющими стержнями.

На рис. 5 представлены разъемы для подключения такого кабеля к оборудованию.

Ещё одна классификация подразделяет оптические кабели для Интерне-



Рис. 4. Оптоволоконный кабель ADSS8-1

та по материалу, из которого изготовлены оптоволокна:

- GOF – стекловолокно (Glass Optic Fiber);
- POF – полимерное волокно (Plastic Optic Fiber);
- PCF – стеклянно-кристаллическое волокно с защитным покрытием из полимера (Plastic Crystal Fiber).

Как рассмотрено выше, современный оптоволоконный кабель для дальних прокладок с пропускной способностью 12 Гбит/с состоит из двухсторонней пары на основе оптоволокна PSF, пары для потоковой передачи данных и пары питания, а также центрального силового элемента, обеспечивающего необходимую долговечность для непрерывного использования в течение нескольких лет. В данном случае под понятием «пара» предполагают оптоволоконный парный канал. Оптоволоконное соединение представляет собой канал Ethernet 10G открытого стандарта. Обеспечиваются потоковое видео и обратные взаимосвязанные каналы передачи цифровых данных в формате IP-видео с использованием высококачественного 10-битного кодирования и качественного декодирования. Формат 10G Ethernet для IP-видео признан как супербыстрый канал связи в том числе для сетей интернет-коммуникации с крайне низкими значениями задержки и потерь сигнала. Отсюда – с применением оптоволокна высокого качества – у разработчиков появилась возможность значительного, до нескольких километров, удаления источника данных от устройств и систем их обработки и дальнейшей трансляции.

Для сращивания участков оптоволоконного кабеля применяют оптическую муфту, форм-фактор которой может отличаться. На рис. 6 представлен вид на круглую оптоволоконную муфту GJS-8004 (GJS-1-D) на 96 волокон, предна-

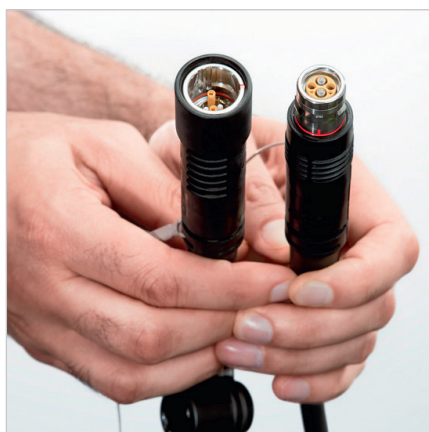


Рис. 5. Разъёмы для подключения кабеля к оборудованию

значенную для установки на столбах, подвесах, вертикальных поверхностях.

Устройство крепления кабеля внутри оптической муфты GJS-8004 обеспечивает стойкость при внешнем вытягивании кабеля, его скручиваниях, а также при воздействии ударных нагрузок. Муфта GJS-8004 состоит из двух частей, скрепляемых специальным механическим хомутом, а резиновое кольцо, расположенное по периметру, обеспечивает надёжную герметизацию и препятствует проникновению влаги. Класс защиты IP65, габаритные размеры 178×288 мм, рабочая температура устойчивой эксплуатации в диапазоне –40...+65°C. Муфта имеет возможность вместить до четырёх сплайс-кассет, размещённых в одном ряду, с общей ёмкостью до 24 гильз или 48, если использовать два ряда. Стандартные преобразуют телевизионный сигнал с помощью специального оборудования – конвертера, который может применяться при коммутации с помощью Blackmagic Camera Fiber Converter. На всех профессиональных современных видеокамерах выпуска последнего десятилетия имеются разъёмы для систем обратной связи с коммутаторами. Профессиональные камеры URSA Broadcast и URSA Mini и другие – отличная иллюстрация к этому примеру. А оптоволоконные конвертеры-преобразователи сигнала типа Blackmagic и аналогичные оснащены системой 12G-SDI для работы со всеми современными форматами передачи цифровых данных, в том числе видео HD и Ultra HD до 2160p60.

Преобразователи-конвертеры сигналов разделяют по их функциональному назначению: для студийной или камерной работы. Одна из выдающихся технических особенностей конвертера в том, что при нарушении контактно-соедини-



Рис. 6. Круглая оптоволоконная муфта GJS-8004 (GJS-1-D) на 96 волокон

тельных элементов в кабеле – его обрыве или внутреннем замыкании (несанкционированном слиянии) потоков данных – конвертер в течение нескольких миллисекунд отключает высоковольтное питание электронного устройства и тем самым устраняет опасность потери или порчи элементов дорогостоящего оборудования. Так, при обнаружении повреждённого канала или утечки «на землю» в случае механического повреждения изоляции кабеля подача электроэнергии (питания) мгновенно отключается, чем дополнительно исключается опасность контактного поражения электротоком (при нарушении пары-канала высоковольтного питания).

### Технические особенности волоконного преобразователя

Волоконно-оптические преобразователи адаптированы для связи стандартными гибридными электрическими и оптоволоконными кабелями SMPTE 311M со стандартными разъёмами SMPTE 304. После подключения устройство в автоматическом режиме выполняет тест-проверку безопасности, а затем включается, передавая стандартное напряжение 200 В ±10% по кабелю SMPTE для видеокамеры и её аксессуаров. С такой конфигурацией можно устанавливать камеры в удалённых местах и не беспокоиться при этом о перепадах напряжения на больших расстояниях. Особенность оборудования также и в том, что студийный и камерный преобразователи на каждом конце оснащены специальными микроконтроллерами с функцией постоянного контроля питающего РЭА канала. Обмен данными между контроллерами обеспечивает стабильный сигнал в оптическом канале и бесперебойную работу источника питания в пределах

безопасных параметров. Контроллеры-преобразователи на примере Blackmagic Camera Fiber Converter и Blackmagic Studio Fiber Converter используют формат IP-видеосигнала (рис. 8). Поэтому почти любые потоковые данные в коммуникации, такие как двусторонняя связь, сигнализация, сигналы управления и оповещения, дистанционное управление камерой и объективом, также преобразуются в IP с малой задержкой. Отсюда многофункциональность, надёжность и высокое качество, что несомненно свидетельствует о перспективах применения оптоволоконного кабеля в сочетании с преобразователем-конвертером, являющимся элементом конфигурируемого и настраиваемого (в том числе дистанционно, с использованием одного кабеля) электронного оборудования и инфраструктуры систем РЭА.

Для качественной обработки видео в преобразователе используют современные карты видеозахвата. К примеру, новейшую карту захвата видеосигнала типа DeckLink PCI Express устанавливают на рабочие станции и серверы на базе Mac, Windows и Linux, что делает её универсальной для применения в современных системах РЭА. Оптоволоконный преобразователь имеет двусторонний канал для работы камеры Ultra HD и 3 обратных канала HD на основе IP-видео, обеспечивает питанием видеокамеру типа URSA Broadcast и другую РЭА на расстоянии до 2 км. Для соединения используется разъём SMPTE 304 (штекер); видеовход формата 12G SDI, видеовыход формата 3G SDI для обратного канала камеры и ещё три канала 3G SDI для обратных выходов SDI. Система передачи звука Talkback Audio организована с помощью двух 5-контактных разъёмов типа XLR для гарнитуры с трёхполосным аудиомикшером на каждый выход и одним выходом типа Tracker. Аналоговое аудио обеспечено двумя 3-контактными входами XLR для AES линейного или микрофонного типа с фантомным питанием.

Конвертер-преобразователь (рис. 7) имеет разъёмы для подключения камеры Ultra HD, 3 обратных канала HD, полное удалённое управление камерой, PTZ, несколько каналов обратной связи. Разъём оптоволоконного кабеля удобно расположен на передней панели рядом со встроенным 5-дюймовым ЖК-дисплеем, даёт возможность мгновенно контролировать изображение с нескольких удалённых камер. Волоконный преобразователь-конвертер крепится к задней части видеокамеры. Кроме многофункционального управления с возможностью микши-

рования программно-настраиваемого звука, управления записью, фокусировкой и диафрагмой, конвертер также включает в себя крепёжную пластину VLock для крепления аксессуаров, таких как профессиональный видеискатель Studio Viewfinder. Прочная металлическая конструкция с компонентами высокого качества обеспечивает поддержку стандартной аккумуляторной пластины, что особенно важно в критичных условиях: в полевых условиях круглосуточной работы. Встроенная монтажная пластина VLock полезна для установки студийного видеискателя. Особенность конструкции конвертера предполагает установку нескольких в ряд в стандартной стойке для оборудования с помощью монтажного комплекта. Рабочая температура в диапазоне 0...+40°C, а температурная среда консервации и хранения в диапазоне -20...+45°C при условии относительной влажности в диапазоне 0...90%. Устройству добавляет универсальности и функциональности монтажный кронштейн с винтами для крепления к камерам, 3 кабеля 12G SDI для подключения входа и выхода SDI.

### Особенности ПО и кодеков

Компьютерный интерфейс оформлен одним разъёмом USB-C. Порт USB-C также позволяет обновлять внутреннее программное обеспечение. Доступные операционные системы: Mac OS 10.14 Mojave, Mac OS 10.15 Catalina и поздних версий, Windows от 8.1 и выше. Внутреннее обновление ПО связано с тем, что прошивка встроена в программный драйвер. Загружается при запуске системы или через программу обновления. Программное обеспечение работает с 8-канальным PCI Express II поколения, совместимым с 8- и 16-канальными слотами PCI Express в Mac OS, Windows и Linux. Для систем Mac OS требуется компьютер Mac Pro со слотами PCI Express. Типично используется DaVinci Resolve, Media Express, Disk Speed Test, LiveKey, Blackmagic Desktop Video Utility и драйвер Blackmagic для Mac OS и Windows. Media Express, Blackmagic Desktop Video Utility и драйвер Blackmagic для Linux. Среди поддерживаемых и популярных приложений более 70 позиций, об этом можно прочитать в [10]. Поддерживаемые кодеки – AVC-Intra, AVCHD, Canon XF MPEG2, цифровая зеркальная фотокамера, DV-NTSC, DV-PAL, DVCPRO50, DVCPROHD, DPX, HDV, XDCAM EX, XDCAM HD, XDCAM HD422, DNxHR и DNxHD, Apple ProRes 4444, Apple ProRes 422 HQ, Apple ProRes 422, Apple ProRes



Рис. 7. Оптоволоконный конвертер Blackmagic для работы с 12G-SDI

LT, Apple ProRes 422 Proxy, 8-битное без сжатия 4:2:2, 10-битное без сжатия 4:2:2, 10-битное без сжатия 4:4:4.

Стандарты HD-видео имеют широкий формат от «анахронизмов эпохи» 720p50 и 720p59.94 до 1080PsF23.98, 1080PsF24, 1080PsF25, 1080PsF29.97, 1080PsF30, 1080i50, 1080i59.94 и 1080i60. Стандарты видео Ultra HD представлены форматами 2160p23.98, 2160p24, 2160p25, 2160p29.97, 2160p30, 2160p60, соответствие SDI SMPTE 259M, SMPTE 292M, 296M, 372M, 424M уровень В, 425M. Выборка видеоматрицы 4:2:2 с параметром точности цветопередачи 10 бит, цветовое пространство стандартов PEK 601, PEK 709, PEK 2020. Десять популярных стандартов видео Ultra HD от 2160p23.98 до 2160p60 также отличаются от стандартов SD-видео (525i59, 94 NTSC, 625i50 PAL). Стандарты видео 3D SDI различаются с 22 стандартами видео 2K (только SDI – от 2КП23 до 2КПсФ30 ДКИ), 10 стандартами видео 4K (от 4Кп23, 98 DCI до 4КП60 DCI), 3D-видео HDMI (формат 720p50, 1080i60). Поддержка метаданных обеспечивается SDI ПП 188/СМПТЭ 12М-2 и субтитрами с точностью цветопередачи SDI: 8-, 10-, 12-битный RGB 4:4:4 во всех режимах до UHD 30p и 8-, 10-битный YUV 4:2:2 во всех режимах. Поддержка нескольких скоростей SDI обеспечивается переключением между HD, 3G-SDI, 6G-SDI и 12G-SDI. Стандартная телевизионная частота дискретизации 48 кГц, 24-битное аналого-цифровое преобразование определяет сэмплирование аудиосигнала.

### Особенности обработки и преобразования сигнала

Потоковое видео считается будущим вещания. Вкратце, организация потокового видео и аудио происходит так. Согласно



Рис. 8. Блок-схема формирования потоковой передачи данных

блок-схеме рис. 8, создается файл (видео и аудио – отдельно), проходящий этапы усиления сигнала, кодирование, мультиплексирование, сжатие и транспортировку до потребителя. Транспортировка потоковых данных, особенно в условиях удалённости видеокамеры от потребителя, обеспечивается с помощью современного оптоволоконного кабеля. Raw-изображения и аудио после сжатия (для уменьшения объёма файла и улучшения скорости трафика) посредством кодека совмещаются в пакет с помощью мультиплексора, и далее сигнал передаётся по кабелю (или беспроводным способом).

### Разные протоколы для передачи данных по IP

Приложения (расширения) и протоколы SDI, SMPTE, SRT, NDI (и др.) унифицируют и подготавливают данные в пакетную форму, объединяя компоненты видео-, аудио- и метаданных в единый поток. Единый поток удобно обрабатывать и транслировать, в том числе по одному кабелю. Формат SMPTE ST2110, выпущенный обществом инженеров кино и телевидения, – это набор стандартов для взаимодействия по IP с разными расширениями файлов, передачи мультимедиа, включая цифровое видео-, аудио- и метаданные. Тайм-код SMPTE известен как формат медиа-метаданных, то есть набор взаимодействующих стандартов для маркировки отдельных кадров видео или фильма тайм-кодом. Тайм-коды добавляются к фильму, видео или аудиоматериалу, а также адаптированы для синхронизации и идентификации во времени для редактирования. Так, расширение файлов SDI вполне подходит для потокового вещания по форматам (от старых – к новым) SMPTE 259M, SMPTE 292M, SMPTE 296M, SMPTE 372M, SMPTE 425M, SMPTE 435, SMPTE 2022, SMPTE 2081, SMPTE 2082, SMPTE 2082-10, SMPTE 2108-1, SMPTE 2110, апробиро-

ванных с применением оптоволоконка типа ITU-R BT.656 и ITU-R BT.601 и др. Особое назначение имеют оптоволоконные кабели для аудио- и видеоконтента с кодированием SMPTE. Разница в кодировании между SMPTE и типичным машинным форматом представлена на рис. 9.

Отличительное свойство SMPTE 2110 в сравнении с предыдущими стандартами передачи видео, такими как SDI или SMPTE 2022, в том, что позволяет быстро распределять производственные рабочие процессы. С помощью SMPTE 2110 видео-, аудио- и элементы метаданных отдельно друг от друга доступны для обработки и редакторской работы.

Там, где технически ограничена пропускная способность, значимую роль играет NDI, который сжимает видео и аудио до 100 Мбит/с (или меньше). Для ST 2110 требуются IP-сети, способные поддерживать пропускную способность 10 Гбит/с и более. SRT-транспортный протокол с открытым исходным кодом, разработанный компанией Haivision, используется для широкоэмительных рабочих процессов в дополнение к SMPTE 2110. Требования к пропускной способности – не менее 2–3 Гбит/с для HD-видео в зависимости от сжатия без потерь и других ресурсов. Это означает, что он не всегда подходит для таких ситуаций, как удалённое производство (REMI) через Интернет, где битрейт должен быть намного ниже [8, 11]. Формат SRT не привязан к кодекам, поэтому используется для передачи сжатых потоков в HEVC или H.264 в производственные рабочие процессы. SMPTE 2110 может заменить SDI, но пока существует потребность в потоковой передаче видео с условно низкой задержкой и пропускной способностью через Интернет при отправке видео из одной части мира в другую или через облачные платформы для дальнейшего про-

изводства видео, такой формат будет актуален.

Преобразование между форматами HD в SD происходит с понижающим сжатием сигнала на выходе в SDI в компонентный и композитный сигнал формата NTSC/PAL. Особенности выходного сигнала SD дают возможность выбора между кратким форматом (максимальное сжатие), анаморфотным форматом 16:9 и форматом 4:3. Встроенный высококачественный аппаратный понижающий преобразователь выводит Ultra HD в HD с понижающим преобразованием сигнала на выходы SDI C и D, притом что выход HDMI предназначен для подключения к монитору, поддерживающему только HD. Но ещё более востребовано встроенное высококачественное аппаратное кросс-преобразование из SD в 720 HD или 1080 HD и обратно из 1080 HD в 720 HD при воспроизведении. Тут также возможен выбор между масштабом изображения 4:3, масштабированием 14:9 или масштабированием 16:9. Вывод HD происходит через HD-SDI, HDMI и компонентный аналоговый сигнал. Эффекты в реальном времени обеспечиваются приложениями и ПО, такими как DaVinci Resolve, Premiere Pro CC Mercury Playback Engine, с дополнительными эффектами – Final Cut Pro X и Avid Media Composer. 3D-обработка обеспечена двойным потоком и захватом кадров и воспроизведения. Функционал DeckLink 4K Экстрим 12G (рис. 10) обеспечен платой-адаптером HDMI и ещё одним разводным кабелем для аналогового управления и управления по RS-422. Температурные условия эксплуатации, хранения и относительной влажности соответствуют всей линейке оборудования и параметрам, указанным выше для преобразователь-конвертеров.

Особенности оборудования есть и в поддержке HDR. Поскольку стандарт HDMI поддерживает только статические метаданные HDR с точностью цветопередачи 8, 10 и 12 бит (глубокий цвет), для расширения метаданных HDR используются характеристики передачи HLG и PQ 4:4:4, 4:2:2 и 4:2:0. К примеру, HDMI 2.0b поддерживает Deep Color и HDR с автоматической настройкой под параметры подключённого дисплея. Так, соединения по видео HDMI и SDI переключаются между SD/HD/2K и 4K. Компонентные аналоговые видеосоединения переключаются между SD и HD.

## Особенности двухканальной двусторонней связи по оптоволокну

Использование IP-видео ввиду технологической гибкости и эффективности открывает перспективные возможности для создания и редактирования разного современного контента. Ещё один иллюстративный пример, когда двухканальные каналы обратной связи применяются в разных, в том числе удалённых системах, таких как домофон с резервным копированием данных. Это удаётся с помощью оптоволоконных кабельных соединительных линий, совместимых с профессиональными 5-контактными XLR-гарнитурами двусторонней связи. С помощью гарнитуры двусторонней связи можно дистанционно, не прерывая поток данных, регулировать разные параметры, к примеру громкость, а также общаться в режиме «конференции» одновременно с несколькими абонентами.

Этот способ с помощью преобразователя удобен для всех линий связи, используемых с помощью оптоволоконного кабеля с большой протяжённостью. Вход/выход 12G-SDI используют для подключения оптоволоконного преобразователя. Другой из возможных вариантов – выход 12G SDI конвертера подключают к входу 12G SDI на видеооборудовании. Два 5-контактных разъёма XLR типа «female» позволяют подключить ещё 2 гарнитуры. 10-контактный разъём Hirose обеспечивает дополнительный выход внутренней связи и «сигнальный» выход (управляющего сигнала, которым можно управлять включением другого оборудования, к примеру, поворотом камеры, включением СГУ (сирены) или активацией стационарного средства электрошокового оборудования). Три выхода SDI позволяют выводить три обратных канала от коммутатора к дополнительному оборудованию через 3G SDI. Для этого используют гибридный разъём для подключения оптоволоконного кабеля. Аудиовходы XLR для подключения внешнего аналогового звука от профессионального оборудования, микрофонов и аудиомикшеров. В устройстве используются разъёмы Molex для подключения электропитания оборудования от преобразователя. Разъём DTap: выход 12 В для питания аксессуаров (внешний монитор и аналогичные) с напряжением питания в диапазоне 11,9...14 В DC при силе тока 2 А. Потребляемая мощность < 30 Вт. 9-контактный разъём PTZ позволяет подключать PTZ-головку с электроприводом.

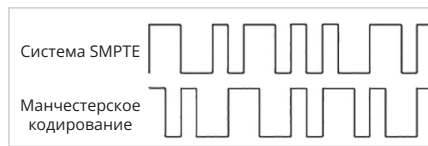


Рис. 9. Разница в кодировании между SMPTTE и типичным машинным форматом

## Перспектива технологии

Рассмотрим перспективы современной потоковой технологии передачи данных по оптоволоконному кабелю на примере передачи видеосигнала. Формат видео Ultra HD со скоростями 4K–12K и совместимый с SD- и HD-SDI-оборудованием примерно в 16 раз превышает разрешение типичного HD-видео 1080 при условно большом масштабе трансляции и разрешении дисплея с изображением, к примеру, 7680×4320 точек на дюйм. Усовершенствованная модель DeckLink 8K Pro имеет четырёхканальный скоростной режим 12G-SDI, а модель DeckLink 4K Extreme 12G стоимостью почти \$1000 с двухканальными соединениями 12G-SDI обеспечивает ещё более высокое качество цветового разрешения при поддержке двухпоточкового стереоскопического 3D и соответствующей частоты кадров до 100р. В дополнение – аудио AES/EBU, повышающее, понижающее и перекрёстное преобразование и встроенный стереоскопический 3D-выход с полной полосой пропускания 4:4:4 RGB. DeckLink 8K Pro позиционируют как усовершенствованную систему захвата III поколения с 8-канальным интерфейсом PCI Express и карту воспроизведения для рабочих процессов с высоким разрешением. DeckLink 8K Pro обеспечивает не только 8-, 10-битный формат YUV 4:2:2, но также 10- и 12-битный RGB 4:4:4. Благодаря 4 разъёмам 12G-SDI DeckLink 8K Pro поддерживает все форматы SD, HD, Ultra HD, 4K DCI, 8K и 8K DCI. Соединения 12G-SDI дополнительно можно настроить для многоканального захвата и воспроизведения 4 различных видеопотоков при частоте кадров до 4K DCI 60р с помощью бесплатного ПО DeckLink SDK по каждому каналу.

По таким характеристикам рассматриваемые устройства вполне конкурентоспособны и востребованы для цветовой коррекции программными инструментами, включая и популярный редактор DaVinci Resolve. На выходе системы получают видеопоток 12-битного RGB и качество изображения 4:4:4, подготовленное для последующей и

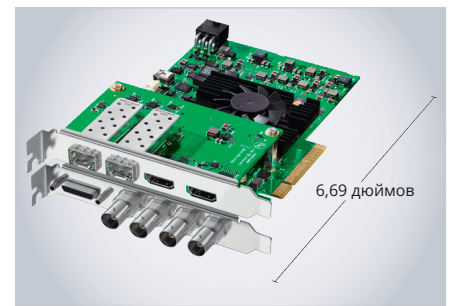


Рис. 10. DeckLink 4K Экстрим 12G

глубокой цветопередачи и работы с широким динамическим диапазоном, поддержку высокой частоты до 100 кадров в секунду.

Это реальные шаги к построению стереоскопического 3D. Модели DeckLink поддерживают рабочие процессы на основе файлов или лент, что обеспечивает мониторинг в комплексах монтажа и цветокоррекции с использованием профессиональных мониторов SDI, телевизоров HDMI и цифровых кинопроекторов. И всё это на дистанции в несколько километров от источника видеопотока до оператора его обработки. Модели DeckLink SDI 4K и DeckLink Studio 4K обеспечивают 6G-SDI. Для других, более простых случаев выпускается модель DeckLink SDI Micro – мини-атюрная карта M2 с разъёмами 3G-SDI для одновременного захвата и воспроизведения во всех форматах до 1080p60. Компактная по форм-фактору 1-полосная карта mini PCIe с HD-SDI и HDMI для захвата одного канала во всех популярных форматах обработки видео до 1080p30. Из новинок уместно отметить мини-монитор DeckLink HD с картой воспроизведения 10-битного SDI и HDMI PCIe для форматов SD и HD до 1080p60 и 2Kp60 DCI, включая HDR.

## Особенности коммутации и соединений

Оптоволоконные входы/выходы рассчитаны на подключение соответственно двух оптических кабелей с пропускной способностью 12 Гбит/с. Видеовходы и видеовыходы для цифрового потокового видео аналогичны: 2×12 Гбит/с SD/HD/2K/4K с поддержкой одиночного/двойного соединения 4:2:2/4:4:4 и переключения между форматами 2D/3D. Аналоговые видеовходы и видеовыходы аналогичны и рассчитаны на 1-компонентный YUV на трёх разъёмах BNC с возможностью переключения на S-Video или композитный сигнал с поддержкой HD и SD. Видеовходы и видеовыходы HDMI по форм-фактору аналогичны: разъём HDMI типа A с поддержкой 2160p60.



Рис. 11. Иллюстрация электронных возбуждений в полупроводниковом полимере

Аналоговые аудиовходы и аудиовыходы аналогичны и представляют собой 2 канала профессионального балансного аналогового звука, подключаемые через разъёмы XLR. Аудиовходы AES/EBU – два небалансных с преобразователем частоты дискретизации канала. Аудиовходы и аудиовыходы SDI аналогичны: 16 каналов, встроенных в SD/HD/2K/4K. Аудиовходы и выходы для HDMI: 8 каналов, встроенных в SD/HD/4K. Синхронный вход Tri-Sync или Black Burst. Управление устройствами организовано так: совместимый с Sony™ порт управления RS-422 сочетается с последовательными портами передачи данных, где с помощью настраиваемого ПО организовано TxRx-реверсивное направление. Компьютерный интерфейс – 8-канальный PCI Express второго поколения, совместимый с 8- и 16-канальными слотами PCI Express с картой HDMI или SDI.

### Условные недостатки оборудования

Они не касаются качеств кабеля. Тем не менее в рассматриваемом оборудовании преобразователей сигнала по входу HDMI нельзя захватывать данные из источников, защищённых от копирования. Сначала нужно снять защиту программным способом. Среди «сложных моментов» можно назвать и растущую цену оптоволоконна, и особенности его производства, связанного с добычей газа гелия [3].

### Оптоволоконно и фотоника

С перспективами оптоволоконных линий связи связано развитие в области фотоники. Не только из-за уменьшения энергетических потерь, особенно чувствительных пропорционально расстоянию линий связи, но и с улучшенной возможностью к миниатюризации

оборудования, удешевлению его производства и рентабельности, а это важный экономический фактор для любой страны, поэтому высока конкуренция в разработках и совершенствовании технологий для фотоники и оптоволоконна. Проблематика также связана с тем, что полезную энергию из тепла до сих пор принято получать в основном в виде электричества. Поэтому для оптоволоконна важна не столько сила светового потока, модулированного цифровыми данными, сколько его неискusstvenное происхождение. Когда удастся получать и модулировать полезный для передачи по оптоволокону сигнал (да ещё и в потоковом формате) с помощью источника от солнца, огня свечи или костра, тогда наступит новая эра и фотоники, и оптоволоконных передатчиков. Определённые успехи есть: в 2021 году на ускорителе Брукхейвенской национальной лаборатории Министерства энергетики США впервые удалось получить материальное вещество/антивещество напрямую из фотонов, то есть из чистой энергии [11].

Субтерагерцовый диапазон от 100 до 300 ГГц будет использоваться передатчиками и приёмниками 6G. Исследованиями японских учёных установлено, что на верхнем конце этих частот многоуровневая модуляция сигнала становится заметно чувствительной к шуму. При этом фазовый шум ухудшает качество модуляции многоуровневого сигнала [10]. Эта проблема до сих пор ограничивала возможности связи на частоте 300 ГГц. Тем не менее удалось создать и беспроводную линию связи субтерагерцового диапазона (ТГц), использующую передатчик и приёмник со сверхнизким фазовым шумом на основе фотоники. Исследователи из Университе-

та Осаки и IMRA America разработали одноканальную оптическую беспроводную линию со скоростью до 240 Гбит/с, опубликовав результаты своей работы в начале 2024 года. На рис. 11 представлена иллюстрация эксперимента.

Оптическая беспроводная линия связи основана на лазере вынужденного рассеяния Бриллюэна для генерации сигналов на частоте 300 ТГц и нацелена на мультиплексированную многоканальную скорость передачи данных до 1 Тбит/с. Отсюда понятно, что на сверхвысоких частотах генератор сигналов на основе фотонного устройства имеет гораздо меньший фазовый шум, чем типичный генератор электрических сигналов. Максимальная скорость передачи данных, достигнутая ниже порога прямой коррекции ошибок с жёстким решением (HD-FEC) с использованием оперативной обработки сигналов, составила 240 Гбит/с с 64-квадратурной амплитудной модуляцией (64QAM) на одной несущей частоте 275 ТГц. Успешная передача потоковых данных пока на расстояние 20 метров, но беспроводным способом со скоростью более 200 Гбит/с зафиксирована и описана в [11]. Пока это самая высокая одноканальная производительность, полученная посредством беспроводной связи в субтерагерцовом диапазоне частот.

### На пути к оптронному процессору

Существенная и определяющая разница между электроном и фотоном в том, что у фотона нулевая масса, а абсолютная у электрона –  $9,109 \cdot 10^{-31}$  кг. Это также влияет на потери сигнала в протяжённых линиях связи. Поэтому фотонный переключатель предпочтительнее как элемент устройства передачи данных на оптических каналах связи (на порядок увеличивает пропускную способность канала). При применении сигнала, модулированного лазерным лучом малой мощности, тот же фотонный ключ – мультиплексор действует в качестве усилителя, повышая интенсивность входящего сигнала в тысячи раз (рис. 12). Для установки состояния 0 или 1 и переключения между ними фотонное устройство использует два лазера: очень слабый «затравочный» лазер (Seed) и основной лазер накачки (Pump). Лазер накачки создаёт в одном месте тысячи идентичных квазичастиц, образуя конденсат Бозе–Эйнштейна, который кодирует логические состояния низкого («0») и высокого («1») уровня. Эти состояния – основа цифровой передачи данных.

На рис. 13 представлена иллюстрация электронных возбуждений в полу-

проводниковом полимере. Красным цветом обозначены экситоны, синим – поляритоны. Экситон – это квазичастица, представляющая собой электронное возбуждение в диэлектрике, а именно: связанное состояние электрона и дырки. Поляритон – квазичастица, возникающая при взаимодействии фотонов с элементарными возбуждениями среды: оптическими фононами, экситонами, плазмонами, магнонами и др. [1, 7]. Взаимодействие в материале плоскости фотонов с экситонами приводит к появлению короткоживущих образований, называемых экситон-поляритонами, являющимися квазичастицами, лежащими в основе функции фотонного переключателя. Переключение состояния происходит внутри микрополости тонкого органического полупроводникового полимера полипарафенилена (MeLPPP) толщиной 35 нм между высокоотражающими неорганическими структурами. Микрополость построена так, чтобы входящий свет максимально задерживался внутри для его «сцепления» с плёнкой.

Для переключения между двумя состояниями управляющий импульс «засевает» конденсат незадолго до включения лазера накачки. Начальный импульс возбуждения стимулирует преобразование энергии от лазера накачки, увеличивая количество квазичастиц в конденсате. Большое количество частиц соответствует состоянию «1» устройства, что отражается на излучении, выходящем из системы. Эта открытая учёными зависимость подтвердила особенность однофотонной нелинейности при комнатной температуре. Чтобы снизить энергопотребление устройства, исследователи использовали несколько приёмов. Во-первых, энергетический зазор между состояниями накачки и конденсата соответствовал энергии одной молекулярной вибрации в полимере. Во-вторых, удалось найти оптимальную длину волны для настройки лазера и реализовать схему для быстрого обнаружения конденсата Бозе–Эйнштейна. В-третьих, «затравочный» лазер и схема обнаружения конденсата подобраны таким образом, чтобы подавить шум от фонового излучения устройства. Эти меры позволили максимизировать соотношение сигнал/шум и предотвратить поглощение избыточной энергии микрополостью, что в противном случае приводило к её нагреву за счёт молекулярных колебаний.

В недалёком будущем разработчики будут использовать суперкристаллы с кристаллической решёткой, как у перовскита, из почти правильных октаэдров, развёр-

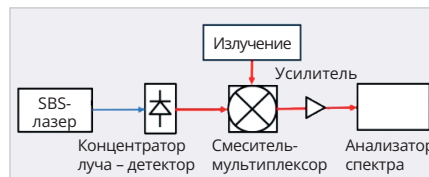


Рис. 12. Блок-схема лазерной установки при исследованиях в области фотоники

нутых под небольшим углом относительно идеальных положений. Несмотря на то что оптоволоконный кабель и линии связи на его основе ещё не изжили себя и будут долго в XXI веке применяться в РЭА, на смену им приходят инновационные материалы, известные редкими физическими характеристиками, в том числе сильной связью (корреляцией) между световым пучком и опорным веществом. Эта связь приводит к мощному квантовому отклику в виде сверхфлуоресценции [1, 7]. Больше всего энергии в системе потребляет лазер накачки, поддерживающий линию связи в рабочем состоянии.

### Перспективы и недостатки оптоэлектрических линий связи

Основные потери в фотоэлектрических линиях связи происходят в интерфейсе при оцифровке сигнала. Особенно это значимо для потокового сигнала в трансляции с большой скоростью. Как совершенствуют системы модуляции-демодуляции в оптоволоконных линиях связи? Можно проиллюстрировать примером исследования для получения/передачи изображений огромного масштаба с площадью в 1 км<sup>2</sup> и более. Разработчики технологии производства кабелей с минимальными потерями сигнала пытаются решить проблему применением и конфигурацией деформируемого зеркала (для свёртки/развёртки) или кольца (для частотной фильтрации). А потоковую информацию (данных) для обработки спроецируют через оптическую систему на матрицу камеры, чтобы на третьем условном этапе процесса считывать экспозицию. Процесс в совокупности занимает несколько миллисекунд, притом что в таком процессе возможно достижение скорости более 1 триллиона операций в секунду, что примерно в 500 раз быстрее, чем у современных высококачественных полупроводников.

### Выводы

Многое в развитии отечественных успехов в области РЭА зависит от оперативного введения технологий. Оптические линии связи сегодня при-

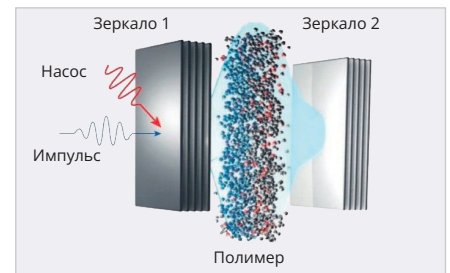


Рис. 13. Механизм передачи электронных возбуждений в полупроводниковом полимере

меняются даже в глухих деревнях, но мы шли к этому в течение 30–40 лет. Помним и о том, что примерный срок выхода теоретической работы в практическое использование в современном мире всё ещё составляет от 10 до 30 лет, хотя он и сократился за последние полвека вдвое.

### Литература

1. Заседателев А. и др. Однофотонная нелинейность при комнатной температуре. *Nature*, 2021. URL: <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03866-9>.
2. Кабель оптический ADSS8-1. URL: <http://rftel.ru/magazin/product/adss8-1>.
3. Каушаров А.П. Мировой инфляционный кризис оптоволоконка // *Современная электроника*. 2023. № 1. URL: <https://www.cta.ru/articles/soel/2023/2023-1/166489/>.
4. Классификация оптических кабелей связи. URL: <https://kabel-s.ru/blog/interesnoe-o-kabele/klassifikaciya-opticheskikh-kabeley-svyazi/>.
5. Конвертеры Blackmagic Fiber. URL: <https://www.blackmagicdesign.com/products/blackmagicfiberconverters/>.
6. Новый оптический «транзистор» ускоряет вычисления в 1000 раз. URL: <https://habr.com/ru/companies/itsumma/news/579574/>.
7. Оптоволоконные датчики Scaime. URL: <https://testsol.ru/catalog/eto-i-kip/scaime/otpovolokonnye-datchiki>.
8. Самонесущий кабель. URL: <https://hub.rs-link.ru/index.php/category/opticheskiy-kabel-samonesushchiy/?yclid=14008749631347097599>.
9. Что такое SMPTE 2110 и как его использовать в распределённом видеопроизводстве? URL: <https://haivision.ru/blog/all/chto-tekoe-smpte-2110/>.
10. Collisions of Light Produce Matter/Antimatter from Pure Energy. URL: <https://www.bnl.gov/newsroom/news.php?a=119023>.
11. Single-channel 240-Gbit/s sub-THz wireless communications using ultra-low phase noise receiver. URL: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/elex/advpub/0/advpub\\_20.20230584/\\_article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/elex/advpub/0/advpub_20.20230584/_article).

