



# РАДИОЧАСТОТНЫЕ МИКРОВОЛНОВЫЕ ФОТОННЫЕ СИСТЕМЫ. СОВРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ОБОРОННЫХ ПРОЕКТОВ

Дж. Л. Корсон, Р. Дж. Стюарт, *Microwave Photonic Systems*

Начиная с 1980-х годов внимание исследователей привлекло создание радиочастотных (РЧ) микроволновых фотонных каналов. Первоначально выходу РЧ-фотонной технологии на гражданский и оборонный рынки препятствовала высокая себестоимость оборудования и ограничения по допуску к использованию диапазона радиочастот, а также строгие требования к соблюдению размеров, массы и потребляемой мощности (РМПМ, англ. size, weight and power, SWaP). За прошедшие годы разработчики научно обосновали принципы работы радиофотонных устройств и разработали технологии их изготовления. Благодаря этому в производстве радиофотонных систем наблюдался постоянный прогресс.

Системы передачи радиосигнала по оптическому волокну или радиочастотные фотонные подсистемы и модули, компоненты и встроенное ПО используются в различных оборонных проектах, имеющих критически важное значение. Их разработка в первую очередь направлена на поддержку удаленной спутниковой связи для задач обороны (англ. Satellite Communications, SATCOM), на радиоэлектронную борьбу (РЭБ, англ. electronic warfare, EW), организацию наземных радиочастотных коммуникаций, а также на обеспечение работы глобальной системы позиционирования (англ. global positioning system, GPS), для навигации и временной синхронизации. По своим эксплуатационным возможностям волоконно-оптические линии связи намного превосходят традиционные системы связи, базирующиеся на медных кабелях. Это происходит благодаря следующим преимуществам:

- увеличенному расстоянию передачи аналоговых микроволновых сигналов по увеличенному расстоянию кабельной передачи,
- увеличенной полосе пропускания (ПП, англ. bandwidth, BW) и высокому динамическому диапазону,
- иммунитету к высотным электромагнитным импульсам,
- иммунитету к электромагнитным помехам (ЭМП),
- более широкому диапазону частот радиочастотной передачи: С-диапазон, S-диапазон, L-диапазон, X-диапазон и Ku-диапазон, и
- размеру, массе и потребляемой мощности.

Технические решения по передаче радиосигнала по оптическому волокну используются

во многих оборонных программах, в том числе в глобальной широковещательной системе, широкополосной глобальной сети SATCOM, в авиации, на гидроакустических станциях с буксируемой антенной, на наземных станциях УВЧ-SATCOM, в бортовых антенных GPS и в бортовых радиосистемах спутникового мультиплексирования данных. Передача радиосигнала по волокну стала стандартным решением при конструировании современных военных и гражданских самолетов, транспортных средств, кораблей и подводных лодок. Старые устройства связи с медными кабелями теперь предстоит модернизировать до нового стандарта.

Современные телекоммуникационные радиосистемы, установленные на кораблях и крейсерах, предъявляют высокие требования к традиционным системам на основе коаксиальных кабелей и волноводов. Системные требования по увеличению ширины передаваемых радиочастот трудно реализовать без таких негативных последствий, как увеличение веса и диаметра кабельных трасс. В морских системах также очень важна безопасность передачи и защита кабеля связи от электромагнитных помех, так называемый электромагнитный иммунитет. Способ передачи радиосигнала по оптическому волокну удобен тем, что оптический сигнал обеспечивает конфиденциальность сообщений и отсутствие возможных электромагнитных наводок, а также защиту от внешних воздействий морской воды и атмосферных разрядов. В дополнение к перечисленным преимуществам можно назвать легкость и удобство установки волоконно-оптических линий. Масштаб применения волоконно-оптических систем на судах



легко представить себе хотя бы по такому факту: в 2016 году компания "Newport News Shipbuilding" завершила прокладку 1200 км волоконно-оптического кабеля на авианосце Gerald R. Ford (CVN78).

Стандартный способ передачи радиочастотного аналогового радиосигнала на антенну и от антенны – это коаксиальный передающий кабель, по которому распространяется сигнал. В случае использования частоты микроволнового диапазона, конструкцию кабеля выполняют в виде волновода. Современные антенны, предназначенные для кабелей с медным проводом, не подходят для задач радиофотоники из-за возникающих многочисленных технических проблем, влекущих за собой значительные затраты на техническое обслуживание. Проблема заключается в сильном ослаблении сигнала в медном кабеле (например, для частоты 1,7 ГГц ослабление в кабеле LDF4-50 составляет 9 дБ/100 м). Это часто становится причиной использования дополнительных промежуточных усилителей для медных кабелей при расширении диапазона частот.

Сборка кабелей в удаленной системе – тоже очень сложная техническая задача. Особенно это заметно в установках, в которых питано несколько антенн, а проводка очень плотная. В радиосистемах, установленных на судах, отсутствие свободного пространства затрудняет размещение толстых и негибких медных кабелей (обычный размер диаметра радиочастотных кабелей варьируется от 16 до 55 мм) и волноводов. Поэтому ограничения по радиусу изгиба кабеля становятся основной проблемой. Минимальный радиус изгиба/множественный изгиб кабеля LDF4-50 составляет 127 мм. Не стоит забывать, что в результате обрыва кабеля часто возникают аварийные ситуации. Надежность соединений требует очень аккуратной сборки разъемов. Конечный результат ошибок сборки – это снижение уровня сигнала и интермодуляционные искажения передаваемого сигнала. Большое влияние на вес и конструкцию корабельных мачт имеет также вес медных кабелей. Так, например, вес кабеля LDF4-50 с диаметром 16 мм, может достигать 220 кг/км.

Современные эксплуатационные условия, имеющие постоянно меняющийся радиочастотный ландшафт, требуют от радиочастотных систем большой гибкости и многозадачности. Следовательно, системы должны использовать надежные, безопасные и распределенные сети

### Microwave Photonic Systems (США)

[www.b2bphotronics.com](http://www.b2bphotronics.com)

Компания специализируется на разработке и производстве радиочастотных, микроволновых и волоконно-оптических компонентов. Производитель производит преобразователи радиочастотного сигнала в оптический в диапазоне от 1 МГц до 40 ГГц. Трансмиттеры и ресиверы компании рассчитаны на работу в расширенном температурном диапазоне (от -60 °C до 85 °C).

Компания "ОЭС Спецпоставка" представляет весь спектр продукции компании Microwave Photonic Systems на территории РФ и предлагает наиболее выгодные условия поставки продукции, полную техническую поддержку, а также поставку образцов.



ые топологии. В результате оборонная промышленность переходит на использование волоконно-оптических кабелей вместо коаксиальных кабелей или волноводов в основных системах связи и вооружения. Эта тенденция привела к повышению требований, предъявляемых к РЧ-характеристикам оптических линий связи для достижения улучшенных возможностей динамического диапазона, свободного от гармоник (SFDR). Таким образом, при прошёте бюджета системы более нельзя жертвовать параметром SFDR и использовать неоптимальные оптоэлектронные технологии.

Сегодня индустрия микроволновой фотоники может пользоваться 30-летним опытом разработки микроэлектронных компонентов и их современного производства (благодаря развитию индустрии сотовых телефонов и беспроводных технологий). Для удовлетворения текущих потребностей пользователей в оперативной деятельности требуются жесткие решения типа "нейтральной хост-системы". В тех случаях, когда РМПМ имеет решающее значение, радиочастотная фотонная технология может предложить инженерам-конструкторам и системным интеграторам жизнеспособные варианты интегрирования в традиционные подсистемы радиосвязи для частот до 40 ГГц для транспортных расстояний более 100 км. При этом будут сохранены значения SFDR более 116,0 дБ- Hz<sup>2/3</sup>.

На рис. 1 представлен двунаправленный волоконно-оптический трансивер с тактовой частотой 20 ГГц.



Рис. 1. 20 Гц, двунаправленный волоконный трансивер, пригодный для авиационного использования  
Fig. 1. 20 GHz, Bi-Directional Fibre Transceiver, airborne qualified

## КОНСТРУКЦИЯ И СВОЙСТВА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ КАНАЛОВ, ИСПЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ МИКРОВОЛНОВЫХ СИГНАЛОВ

В технологии передачи радиосигналов по волокну используются аналоговые волоконные каналы для передачи и распределения микроволновых сигналов от центров обработки радиосигналов (например диспетчерская или командная станция) от/до определен-

ного числа удаленных мест, где размещаются антенны. Система передачи радиосигналов по волокну – это система одно- или двунаправленных оптических каналов, состоящих из стандартных систем Tx/Rx (оптический приемопередатчик) с лазерным диодом и фотодиодом, соединенных оптоволоконными кабелями [1-8].

Высокочастотный аналоговый радиосигнал передается по оптическому волокну. Часто при этом используется передача с мультиплексированием поднесущих частот, где исходные мультиплексированные сигналы конкретных радиочастотных каналов модулируют несущий оптический сигнал. Основу такой схемы составляет лазер, работающий в режиме модуляции интенсивности излучения входным РЧ-сигналом, а приемник работает в режиме прямого обнаружения. Этот тип канала называется прямое обнаружение с модуляцией интенсивности светового потока (IMDD), а его блок-схема представлена на рис. 2.

Второй вариант передачи РЧ-сигнала – использование в системе лазера с внешней модуляцией. Способ дороже, однако обеспечивает лучшие параметры передачи для радиосистем, работающих с несущей волной с частотой выше, чем 10 Гц. Оптическая система обеспечивает очень низкие потери на затухание для радиочастотного сигнала. Подходящие для высокочастотных сигналов свойства передачи достижимы благодаря линейным широкополосным оптическим компонентам и малошумящим усилителям (МШУ, англ. low-noise

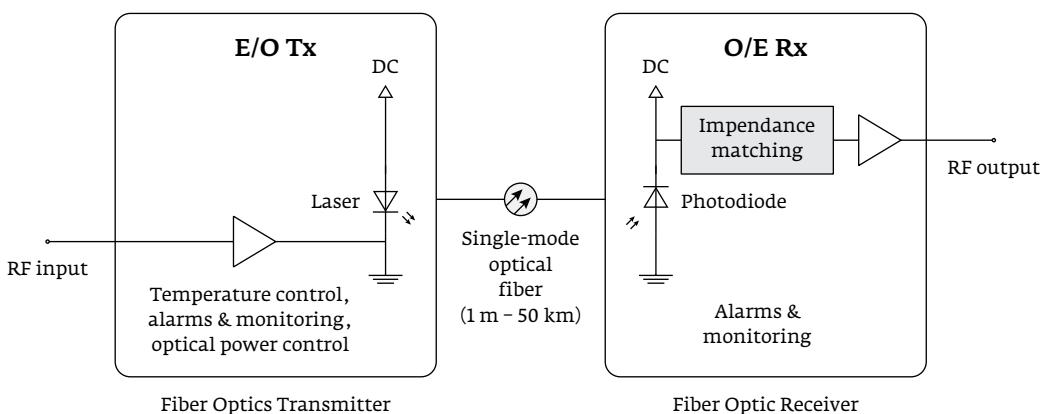


Рис. 2. Канал передачи радиосигналов по волокну в системе прямого детектирования с модуляцией интенсивности светового потока  
Fig. 2. Radio over fibre link in the intensity-modulated direct detection system.



amplifier, LNA) с низким коэффициентом шума (КШ, англ. noise figure, NF).

Лазерные источники света для аналоговых широкополосных систем передачи должны отвечать ряду таких требований, как высокая выходная мощность, идеальная линейность, низкий уровень шума и высокий динамический диапазон, свободный от гармоник (англ. spurious-free dynamic range SFDR). Для этих целей используются вертикально излучающие лазерные диоды (VCSEL), лазеры с распределенной обратной связью (DFB-лазеры, англ. distributed feedback laser) и лазеры с распределенным брэгговским отражателем (DBR-лазеры, англ. distributed Bragg reflector laser). Лазер может работать в оптическом окне 1310 или 1550 нм (С-диапазон: 1525–1562 нм и L-диапазон: 1570–1615 нм). В оптических приемниках используются PIN и APD-диоды, обеспечивающие малошумящее оптико-электрическое преобразование. Такие системы способны передавать радиосигналы в следующих диапазонах: 5–200 МГц, 50–1000 МГц, 500–2500 МГц, 0,1–5,0 ГГц и 0,1–10,0 ГГц. Поэтому указанные линии передач можно использовать для разных применений в диапазонах: 70/140 МГц (промежуточная частота ПЧ, англ. intermediate frequency, IF), УВЧ (UHF), GSM, PCS, L-диапазон, GPS, S-диапазон, С-диапазон, Х-диапазон, сверхширокая полоса пропускания (1,0 МГц–10,0 ГГц) и для нужд линий задержки в радиолокационных системах.

Типичные рабочие параметры этого канала включают усиление (0–10 дБ), КШ (5–25 дБ), точку перехвата третьего порядка IP3 (25–30 дБм) и SFDR (100–110 дБ \* Гц<sup>2/3</sup>). Типичные значения параметров линии передачи радиосигналов по волокну, полученные с учетом дополнительных МШ усилителей в канале передачи даны в скобках.

Существует три типа систем передачи радиосигналов по волокну:

- РЧ (RF) по одномодовому волокну (ОМВ, англ. single-mode fibre, SMF);
- ПЧ (IF) по многомодовому волокну;
- цифровой сигнал по ОМВ.

Наиболее часто используется система передачи РЧ по ОМВ, которая является относительно дорогой из-за использования лазерных источников, отвечающих требованиям к использованию в радиочастотной передаче.

Для устранения этих проблем вводится система передачи ПЧ по многомодовому волокну [9]. Тем не менее, ее недостатком является высокая стоимость более сложного антенного блока с модулем преобразования ПЧ/РЧ.

В цифровой системе используется цифровое преобразование А/Д (аналоговое в цифровое) микроволнового сигнала. Несмотря на то, что использование специальных лазерных диодов для аналоговой передачи не требуется, стоимость цифрового решения оказывается существенной. В современных телекоммуникационных радиосистемах 4G используются сигналы мультиплексирования с ортогональным частотным разделением (англ. orthogonal frequency-division multiplexing, OFDM) с общей полосой пропускания 100 МГц и модуляцией 256-QAM (квадратурная амплитудная модуляция, англ. quadrature amplitude modulation, QAM) для поднесущих частот. Цифровые решения для передачи данных, способные передавать такой сигнал, должны иметь емкость 40 Гбит/с [7]. Сравнение затрат в [7] для аналоговых и цифровых каналов передачи радиосигналов по волокну с аналогичной способностью передачи сигналов OFDM показало, что аналоговая система передачи радиосигналов по волокну в шесть раз более выгодна. В настоящей работе цифровая система передачи сигналов больше обсуждаться не будет.

Система передачи радиосигналов по оптическому волокну может работать как односторонняя связь (симплекс) или двунаправленная связь (дуплекс). Выделяются два варианта двунаправленных каналов: двухволоконные и одноволоконные [1–5]. Локальная подсистема подключается к центру обработки радиосигналов с помощью радиочастотного интерфейса (коаксиальный кабель). Подсистема включает модули оптических передатчиков, осуществляющих Е/О преобразования (электрического сигнала в оптический), пассивные радиочастотные компоненты и микроконтроллер. Удаленное устройство подключается с помощью одномодового оптического волокна. Оно также имеет модули преобразования О/Е (оптического сигнала в электрический) и модули усилителя мощности. Каждый порт подключается к коаксиальному кабелю антенны. Для двусторонней передачи необходимо использовать два волокна или спектральное уплотнение с разделением по длине волны (англ. wavelength division multiplexing, WDM), чтобы получить систему из двух или нескольких каналов на одно оптическое волокно. Стандартным решением является использование трансиверов WDM для передачи сигналов в двухсторонней системе (от антенны и к ней) в одном волокне. Этого можно достигнуть, если использовать два лазер-

ных передатчика, работающих на двух длинах волн – 1310 и 1550 нм.

## ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВОЙ ФОТОНИКИ

Традиционные системы связи на основе медных проводов на современном этапе развития боевой техники имеют несколько недостатков, которые препятствуют тактической эксплуатации развернутых систем. К ним относятся необходимость размещения персонала, транспортных средств и оборудования рядом с излучающими антеннами, ограничение дальности прокладки медных кабелей, возможность повреждения громоздкого и тяжелого оборудования и более высокие затраты на инфраструктуру для необходимого вспомогательного оборудования, например, усилителей, корректоров наклона и подстанций для повторителей. Такой значительный логистический "отпечаток", уже зависящий от требований РМПМ, ограничивает гибкость действий тактического подразделения.

Если РМПМ-требования не является основными, то системным инженерам следует принять во внимание преимущества, которыми обладает волоконно-оптический кабель:

- увеличенная пропускная способность;
- иммунитет к нарушениям высотного электромагнитного импульса;
- иммунитет к электромагнитным помехам;
- более широкий диапазон частот радиочастотной передачи – равномерная потеря по частоте;
- разделение красного/черного или высокого/низкого уровня безопасности и изоляция сигнала;
- возможность оптического мультиплексирования многих сигналов на существующих волоконно-оптических магистралях.

## НАЗЕМНЫЕ И БОРТОВЫЕ РАДИОФОТОННЫЕ МЕЖОБЪЕКТОВЫЕ ЛИНИИ СВЯЗИ

Радиофотонный межобъектовый канал (МОК, англ. antenna interfacility link, IFL) представляет собой специализированную подсистему передачи, предназначенную для преобразования, передачи и распределения широкого спектра сигналов, таких как видеосигналы с точной синхронизацией и временными интервалами (англ. precision timing and time interval, PTI) и традиционно используемые радиочастоты. МОК обе-

спечивает двунаправленную передачу сигнала с высоким динамическим диапазоном и низким уровнем шума, что находится за пределами возможностей обычного коаксиального кабеля. Архитектура РЧ-распределения МОК включает в себя набор быстросъемных блоков (БСБ, англ. line replaceable units, LRUs), которые обеспечивают возможность передачи по волоконно-оптическим каналам сигналов в двух направлениях между радиостанциями и антеннами.

Волоконно-оптические МОК могут поддерживать широкополосные передачи радиочастотных сигналов до 40 ГГц на расстояния более чем 100 км. Волоконно-оптический кабель (неметаллический сигнальный проводник) по своей природе невосприимчив к эффектам RFI, EMI, EMP и ударам молнии и является ключевым элементом архитектурного решения для наземных или морских систем.

Эти атрибуты позволяют волоконно-оптическим системам безопасно маршрутизировать и распространять радиочастотный трафик к удаленным позициям, которые, в противном случае, были бы недоступны для обычных коаксиальных систем – крыши домов, антенные мачты и вышки сотовой связи. Это увеличенное разделение обеспечивает архитектурное преимущество – надежную связь независимо от конструкции здания, географического ландшафта, видимости горизонта или других инфраструктурных препятствий. Кроме того, существует снижение риска для персонала, который больше не пребывает в зоне действия активной излучающей антенны.



Рис. 3. Бортовой прочный четырехпроводной волоконно-оптический трансивер с интегрированным многоканальным коммутатором Ethernet передачи сигналов по волокну

Fig. 3. Shipboard Rugged, Quad Channel Fibre Optic Transceiver with Integrated Ethernet over Fibre Multi-Switch



На рис. 3 показан защищенный четырехканальный волоконно-оптический приемопередатчик.

## ДИАПАЗОНЫ ПРИМЕНЕНИЯ И АНТЕННЫ ДЛЯ РАЗНЕСЕННОГО ПРИЕМА

Радиочастотные фотонные подсистемы успешно интегрированы с оптическими матрицами переключения для обработки многосигнального трафика в компактном форм-факторе. Эта интеграция позволяет пользователю заменить громоздкие электро-механические коаксиальные матрицы, необходимые для радиочастотных сигналов. Использование оптического коммутатора в качестве основы для маршрутизации трафика является ключевой технологией для любой платформы, от которой требуется многозадачность и динамическая конфигурируемость.

Реализация сетецентрического принципа при маршрутизации и распределении радиочастотных сигналов позволяет использовать методологию "plug-and-play". Применение методологии полезно при работе с закрытыми центрами управления сетью, постоянно поддерживающими протоколы секретности информации, и позволяет минимизировать возможность проникновения в систему с "поверхностного слоя" сети, что может поставить под угрозу целостность защищенного "центра" сети. Также эта методология полезна внутри оперативных зон, таких как испытательные полигоны, в которых требуется использование оптических коммутаторов для создания разнесенных сетевых путей и архитектуры многоточечного распределения. Эта архитектура обеспечивает упрощенную интеграцию, оптимизацию структуры стоек и снижение тепловых нагрузок (чистая экономия энергии и требований к охлаждению).

## МАСШТАБИРУЕМЫЕ РЕШЕНИЯ И КОНКРЕТНЫЕ ПРОЕКТНЫЕ РАЗРАБОТКИ

Радиофотонные системы представляют собой технические решения, которые не только масштабируемые, но и предлагают решения для специфических задач. Для масштабируемых решений системные инженеры должны учитывать программные требования, первоначальные затраты на развертывание, будущие обновления и логистику жизненного цикла. Доступны базовые строительные блоки, которые включают в себя блоки крепления фланцев или стойки высотой 1RU – 4RU для традиционных решений

для монтажа в стойку, которые часто располагаются в наземных терминалах, под радиорубками и прослушивающими станциями. Прочные износостойкие кожухи и портативные решения поддерживают полевое развертывание систем традиционной спутниковой связи и радиоэлектронной разведки, где миниатюрные форм-факторы представляют интерес для специалистов в области дистанционного зондирования, безопасности и обслуживания бортовых систем.

На рис. 4 показана компактная 5-канальная плата передачи видеосигнала по волокну.

В конкретные проекты включены:

- Спутниковая связь: L, S, C, X, Ka, Ku-диапазон.
- Глобальное позиционирование: L1 (1575,42 МГц) – L5 (1176,45 МГц).
- Точная синхронизация и временные интервалы: IRIG, 1PPS, 10 МГц.
- Голос и данные: Iridium / Inmarsat и 802.1 Wi-fi.
- Программно-определенная радиосвязь: системы связи ARC-210, многодиапазонная радиосвязь PRC-117.

Решения радиофотоники также можно найти в следующих сегментах рынка:

- Привязанные аэростаты, беспилотные летательные аппараты (БПЛА), дроны и автономные транспортные средства.
- Радарные линии задержки и сетевые эмуляторы действительной временной задержки.
- Встроенные распределенные антенные системы.



**Рис. 4.** Компактная 5-канальная видеоплата передачи сигнала по волокну 1,5" × 1,5" × 0,25"

**Fig. 4. Compact 5 Channel Video over Fibre 1.5" × 1.5" × 0.25"**



## ВЫВОДЫ

Технологическая разработанность и коммерциализация микроволновой фотоники дали новое и надежное поколение волоконно-оптических коммуникационных компонентов, соединительных конструкций и активных устройств, которые не только экономически эффективны, но также обеспечивают лучшие показатели радиочастот и характеристики SFDR. Эти технические усовершенствования в сочетании с растущим списком проверенных на практике радиофотонных систем успешно позиционировали "Microwave Photonic Systems" как ведущую компанию по проектированию, разработке, производству и внедрению радиофотонных архитектур.

Компания находится в Уэст-Честере, штат Пенсильвания. Она является разработчиком и проектно-конструкторским бюро радиочастотных систем. Специалисты компании обладают знаниями в радиочастотных, микроволновых и фотонных технологиях. Это позволяет компании Microwave Photonic Systems создавать продукты, легко интегрируемые в сети связи как оборонных, так и гражданских субъектов в современных электромагнитных эксплуатационных реалиях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Jamison W.D., Herczfeld P. R., Vieira A., Rosen W., Rosen A., Paolella A., Joshi A. Hybrid fiberoptic millimeter wave links. – IEEE Microw Mag., 2000, 1(2), 44–51.
2. Ackerman E.I., Cox C. H. RF fiber-optic link performance. – IEEE Microw Mag., 2001, 2(4), 50–58.
3. Wake D., Dupont S., Lethien C., Vilcot J., Decoster D. Radiofrequency transmission over multimode fibre for distributed antenna system applications. – Electron Lett., 2001, 37(17), 1087–1089.
4. Cox C.H., Ackerman E.I., Betts G.E., Prince J.L. 2006. Limits on the performance of RF-over-fiber links and their impact on device design. – IEEE Trans Microw Theory Technol., 54, 906–920.
5. Seeds A.J., Williams K.J. Microwave photonics. – IEEE J. Lightw Technol., 2006, 24(12), 4628–4641.
6. Lim C., Nirmalathas A., Bakaul M., Gamage P., Lee K. L., Yang D., Novak D., Waterhouse R. Fiber-wireless networks and subsystem technologies. – J. Lightw Technol., 2010, 8(4), 390–405.
7. Wake D., Nkansah A., Gomes N.J. Radio over fiber link for next generation wireless system. – J. Lightw Technol., 2010, 28(16), 2456–2464.
8. Lysiuk A., Godziszewski K., Yashchyshyn Y. Lowcost E / O and O / E modules for radio over fibre link. – Microw. Opt. Technol. Lett., 2013, 55(10), 2423–2425.
9. Wake D., Dupont S., Lethien C., Vilcot J., Decoster D. Radiofrequency transmission over multimode fibre for distributed antenna system applications. – Electron Lett., 2001, 37(17), 1087–1089.

## КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



Цена 1090 руб.

### ОСНОВЫ МИКРОВОЛНОВОЙ ФОТОНИКИ

Урик Винсент Дж.-мл., МакКинни Джейсон Д., Вилльямс Кейт Дж.  
перевод с английского д. т. н. М. Е. Белкина, к. ф.-м. н. И. В. Мельникова, к. ф.-м. н. В. П. Яковлева  
под редакцией д. т. н., д. э. н., проф. С. Ф. Боеva, акад. РАН, д. ф.-м. н., проф. А. С. Сигова  
при поддержке ОАО "РТИ"

М: ТЕХНОСФЕРА, 2017. – 376 с.,  
ISBN 978-5-94836-445-2

Данное издание представляет собой фундаментальное последовательное описание физических основ исследований и разработок в области компонентной базы и оборудования радиофотонных систем.

Важной методической особенностью книги является согласованное изложение методов, принципов и подходов, изученных еще в прошлом столетии и введенных в последние 2–3 года.

Книга предназначена главным образом для студентов высшей школы и аспирантов, обучающихся по направлению «Фотоника», но также может быть полезна для преподавательского состава, для разработчиков аппаратуры в рамках этого только развивающегося в России направления науки и техники, а также для научных и технических специалистов в смежных областях.

### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; ☎ +7 495 956-3346; [knigi@technosphera.ru](mailto:knigi@technosphera.ru), [sales@technosphera.ru](mailto:sales@technosphera.ru)