

Анализ современного мирового развития радиоэлектронных систем СВЧ диапазона показывает, что наиболее эффективным путем решения стратегически важной проблемы, заключающейся в улучшении пропускной способности, массогабаритных и стоимостных характеристик, энергопотребления, надежности современных радиоэлектронных систем (РЭС) СВЧ диапазона гражданского и военного назначений, является применение для формирования и обработки сигналов методов и подходов радиофотоники (микроволновой фотоники): нового междисциплинарного направления, созданного на стыке СВЧ радиоэлектроники и фотоники. Реализация данного подхода в РЭС СВЧ диапазона помимо значительного улучшения вышеуказанных технико-экономических показателей дополнительно приведет к улучшению таких важных характеристик РЭС двойного назначения, как электромагнитная совместимость, стойкость к внешним воздействиям (в том числе преднамеренным), экологичность.

Устройства и узлы радиоэлектронной аппаратуры СВЧ диапазона на базе фотонной и радиофотонной технологий, в том числе устройства обработки радиосигналов, а также радиоэлектронные системы двойного назначения с применением радиофотоники широко исследуются и разрабатываются в университетах и научных секторах крупных фирм промышленно развитых зарубежных стран [1, 2], однако данное, важное для оборонного потенциала страны, направление очень слабо развивается в России, и уже наметилось значительное отставание. Для поиска путей и создания условий его преодоления в последние годы при НТС ОПК создана специальная рабочая группа по радиофотонике, которой разработана Программа развития отечественной радиофотоники на 2016-2025 годы. Кроме того, Фондом перспективных исследований ОПК разработана Дорожная карта по фотонике и радиофотонике. Реализация намеченных планов в настоящее время осуществляется целым рядом университетов, учреждений Российской академии наук и предприятий радиоэлектронной промышленности.

Фундаментальные и практические преимущества внедрения радиофотоники

В современном понимании фотоника означает обширную область знаний, в которой изучаются разнообразные явления, связанные с оптическим излучением (светом). Одним из новых направлений фотоники является сверхвысокочастотная оптоэлектроника [3], появившаяся в результате интеграции оптоэлектроники и СВЧ радиоэлектроники. В развитие СВЧ оптоэлектроники в последнее время используется новый термин «радиофотоника» (РФ), охватывающий более широкую область знаний. Основные объекты исследования РФ: полупроводниковые лазеры, фотодиоды и фототранзисторы, СВЧ диоды и транзисторы с дополнительным оптическим вводом, а также узлы и модули на основе их сочетания между собой и со сверхскоростной цифровой и аналоговой компонентной базой микроэлектроники. Цели и задачи РФ: исследование и разработка сверхбыстродействующих активных оптоэлектронных приборов и устройств с полосой пропускания в радиодиапазоне и их применения в различных оптических и радиотехнических системах передачи информации, а также активных приборов и устройств формирования и обработки сигналов радиочастотного диапазона с использованием оптических и оптоэлектронных средств.

К фундаментальным преимуществам радиофотонной технологии, позволяющим совершенствовать характеристики радиоэлектронной аппаратуры СВЧ диапазона, можно отнести следующие:

Базирующиеся на фундаментальных свойствах носителей информации: фотон - безмассовая элементарная частица, способная существовать, только двигаясь со скоростью света. Электрический заряд фотона равен нулю. Это обеспечивает:

- повышенное быстродействие (до десятков фемтосекунд)
- расширенную полосу пропускания (до терагерцевого диапазона)

В результате улучшаются тактико-технические показатели традиционных узлов формирования и обработки СВЧ сигналов: генератора, преобразователя частоты, линии задержки, фильтра и т.д.

Базирующиеся на свойствах среды распространения: кварцевое оптическое волокно

- малые потери при передаче ($<0,2$ дБ/км) и независимость их от частоты модуляции в радиочастотном диапазоне (см. рис. 1);
- расширенная рабочая полоса частот (до 15 ТГц)
- гораздо лучшие массогабаритные характеристики (волоконный кабель: масса 1,7 кг/км, диаметр 250 мкм; коаксиальный кабель: масса 560 кг/км, диаметр 10 мм)
- нечувствительность к электромагнитным наводкам (диэлектрик): улучшение электромагнитной совместимости внутри системы, повышение имитостойкости аппаратуры;
- значительно лучшие фазо-температурные характеристики: фазовая стабильность и возможность когерентного приема и обработки сигналов (см. рис. 2). Относительное изменение задержки на единицу длины и градус температуры для волокна без покрытия составляет 8×10^{-6} [4], если оно не прикреплено механически к другому материалу с большим коэффициентом температурного расширения.

В результате улучшаются тактико-технические показатели и характеристики передачи радиосредств.

Принципиальным недостатком использования радиофотонной технологии в РЭС является необходимость операций прямого и обратного преобразований в оптический диапазон, в ходе которых возникают существенные потери мощности сигнала. Тем не менее, их влияние в значительной степени компенсируется за счет малых собственных потерь в волокне. В подтверждение этого на рис. 3 приведены расчетные интервальные характеристики полных потерь, из которых следует преимущество использования фотоники при длине линии передачи более 100 м на частоте радиосигнала 1 ГГц и более 30 м на частоте 10 ГГц. При необходимости передачи радиосигналов более высоких частот баланс потерь достигается при еще меньшей длине линии.

Использование вышеуказанных фундаментальных достоинств обеспечивает конкретные практические преимущества, приводящие к возможности улучшения ключевых тактико-технических характеристик (ТТХ) РЭС, что иллюстрируется на примере радиолокационной системы на базе активной фазированной антенной решетки (АФАР).

- Возможность работы с пространственным (сейчас до 7 сердцевин в одном волокне (см. рис. 4), в дальнейшем до 19 сердцевин) или/и спектральным (до 80 оптических несущих по одной сердцевине с шагом 50 ГГц) уплотнением: передача с терабитными скоростями, улучшение массогабаритных характеристик и упрощение схемы диаграммообразующего устройства (ДООУ), многофункциональное (локация, радиоэлектронная борьба (РЭБ), связь, мониторинг), многодиапазонное (от L- до K_a-диапазона) функционирование, связь наземной и бортовой аппаратуры по одному кварцевому волокну (например, для 1500-элементной АФАР).
- Широкополосность: расширение мгновенной полосы обработки (сейчас до 2-3 ГГц, в будущем до 10 ГГц): повышение скорости и пропускной способности систем обработки.
- Широкий динамический диапазон тракта приема: повышение скрытности функционирования РЭС за счет работы на фоне сильных сигналов и помех.
- Малые потери и дисперсия в оптическом волокне: высококачественная передача цифровых и аналоговых СВЧ сигналов между разнесенными постами аппаратуры, что упрощает размещение аппаратуры на носителях и позволяет создавать когерентный прием в системах распределенной структуры.

2. Классификация компонентной базы радиофотоники

Предыдущее рассмотрение позволяет ввести следующие определения для чисто фотонного и радиофотонного устройств.

Фотонное устройство – обособленный функциональный узел, структура которого содержит исключительно элементы оптического диапазона.

Радиофотонное устройство – обособленный функциональный узел, структура которого содержит элементы радио и оптического диапазонов.

С этих позиций компонентную базу радиофотоники и строящиеся на их основе функциональные элементы и устройства можно разделить на пять типов [6]. Их классификация представлена на рис. 5, а-д. Как видно из рисунка, приборы и элементы с прямым взаимодействием СВЧ и оптического излучений включают:

- оптико-электрический преобразователь (рис. 5, а), например, полупроводниковый фотодиод;
- электрооптический преобразователь (рис. 5, б), например, полупроводниковый лазер;
- датчик СВЧ сигнала с оптическим управлением (рис. 5, в), например, оптоэлектронный генератор СВЧ сигналов;
- преобразователь оптического сигнала (рис. 5, г), например, оптический модулятор, лазерный усилитель;
- преобразователь СВЧ сигнала (рис. 5, д), например, СВЧ усилитель, коэффициент усиления которого регулируется оптическим сигналом, оптоэлектронная схема задержки, оптоэлектронный смеситель.

Общая отличительная черта всех вышеперечисленных приборов и функциональных элементов заключается в работе в С (1530-1565 нм) и/или L (1565-1625 нм) спектральных диапазонах по классификации МСЭ-Т. Основными причинами такого выбора являются самые низкие потери в кварцевом волокне и самая широкая рабочая спектральная полоса, что, например, позволяет эффективно заменить обычно применяемый в АФАР набор переключаемых линий задержек на базе большого числа СВЧ линий передачи на многоволновую передачу с спектральным разделением каналов по одной общей волоконно-оптической линии. Также только в указанных диапазонах существует уникальная возможность компенсации потерь за счет экономичных и высокотехнологичных волоконных усилителей. Устройства данного типа, основанные на чисто оптическом взаимодействии, появились в процессе развития волоконно-оптических систем и также могут быть эффективно применены в радиофотонной аппаратуре. К ним относятся: преобразователь оптического сигнала с оптической накачкой (рис. 5, е), например, эрбиевый, рамановский и бриллюэновский волоконные усилители, датчик оптического сигнала с оптической накачкой (рис. 5, ж), например, эрбиевый волоконный генератор.

4. Общий принцип построения и современный уровень мирового развития аппаратуры микроволновой фотоники

В последние годы разработчики РЭС гражданского и военного назначений все большее внимание уделяют радиофотонному принципу построения, основанному на достижениях СВЧ оптоэлектроники и фотоники [1-3, 6]. Общая суть его иллюстрируется с помощью рис. 6. На рисунке входной радиосигнал СВЧ диапазона посредством электрооптического преобразования (ЭОП) конвертируется в оптический диапазон. Модулированный оптический сигнал при помощи волоконно-оптических либо интегрально-оптических узлов и устройств соответствующим образом задерживается, обрабатывается либо просто передается в удаленную точку аппаратуры, где осуществляется обратное оптико-электрическое преобразование (ОЭП) в радиодиапазон.

1. J. Capmany and D. Novak. Microwave photonics combines two worlds. *Nature Photonics*, 2007, vol. 1, p. 319-330.
2. J. Yao. Microwave Photonics. *IEEE J. of Lightwave Technol.*, 2009, vol. 27, no. 3, p. 314-335.
3. М. Е. Белкин, А. С. Сигов. Новое направление фотоники – сверхвысокочастотная оптоэлектроника. *Радиотехника и электроника*, 2009, т. 54, № 8, с. 901–914.
4. Hartog A. H., Conduit A. J. and Payne D. N. Variation of pulse delay with stress and temperature in jacketed and unjacketed optical fibers. *Optical and Quantum Electronics*, 1979, v. 11, No 3, p. 265–273.
5. Inao S., Sato T., Senssui S., Kuroha T., and Nishimura Y. Multicore optical fiber // In *Optical Fiber Communication Conference (OFC'79)*, Washington, D.C., United States, 6 March 1979, Paper WB1.
6. Белкин М. Е., Яковлев В. П. Наноструктурный поверхностно-излучающий лазер с вертикальным резонатором О и С спектральных диапазонов в качестве ключевого элемента компонентной базы радиофотоники. *Наноматериалы и наноструктуры*, 2014, т. 5, № 3, с. 37-49.

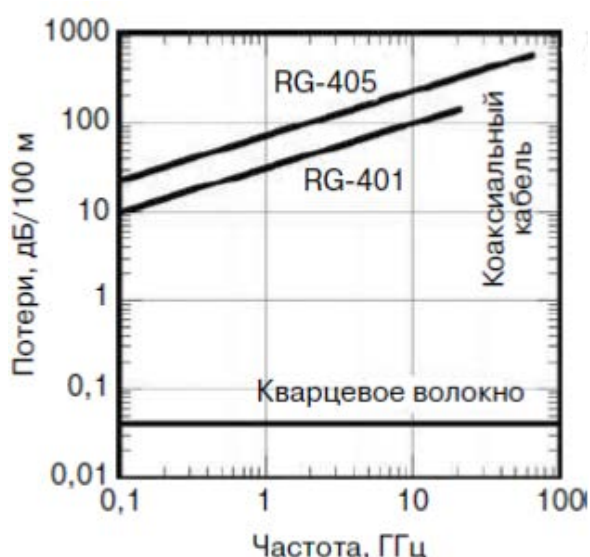


Рис. 1. Потери в функции от частоты, включая только потери при распространении в коаксиальном кабеле типов RG-401, RG-405 (увеличиваются пропорционально квадратному корню от частоты) и в оптическом волокне

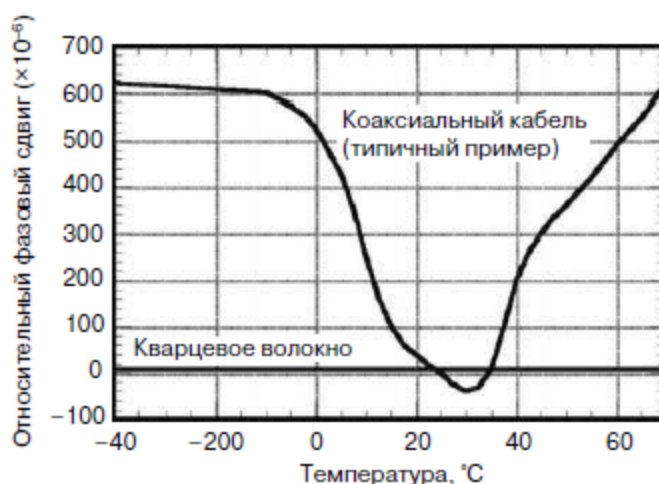


Рис. 2. Типичная температурная зависимость относительного фазового сдвига для коаксиального кабеля и оптического волокна

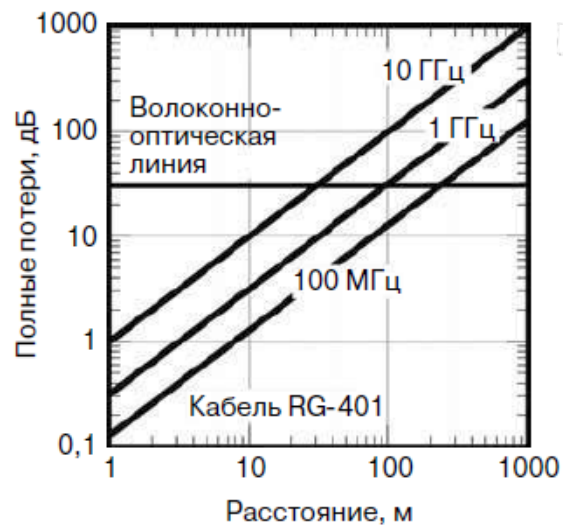


Рис. 3. Расчетные интервальные характеристики линий передачи на базе оптического волокна и коаксиального кабеля

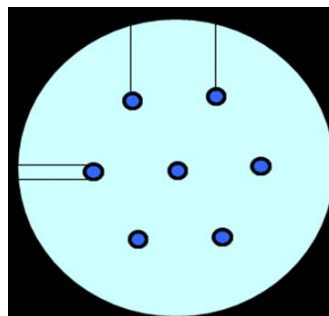


Рис. 4. Поперечное сечение современного 7-сердцевинного оптического волокна [5]

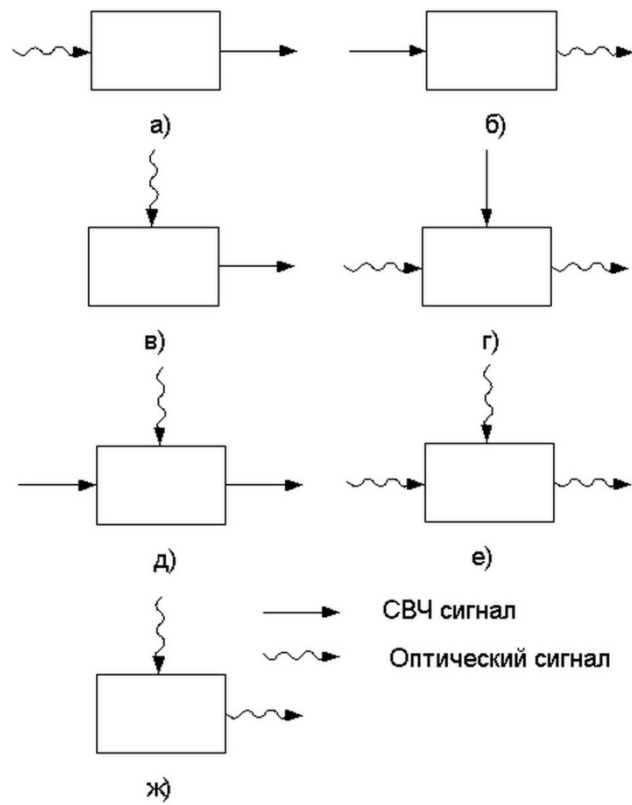


Рис. 5. Классификация компонентной базы и функциональных элементов и устройств с позиций радиофотоники



Рис. 6. Радиофотонный принцип построения РЭС