

**О перспективах использования методов и средств  
микроволновой фотоники  
в сверхширокополосной радиолокации  
и сверхширокополосной радиосвязи**

Ю.Н. Вольхин (ОАО “ЦКБА”), А.М. Мандрик (ОАО “ЦКБА”), Ю.И. Носов (ОАО “ЦКБА”).

*В данном докладе будет сделан обзор по одному из наиболее перспективных направлений развития современной радиотехники СВЧ - микроволновой фотонике. В докладе будут приведены наиболее яркие примеры применения методов и средств MWP в системах радиосвязи и радиолокации. Данный доклад предполагается сделать вступительным к серии докладов по MWP*

Ключевые слова: фотоника, микроволновая фотоника, волоконно-оптическая радиосвязь, волоконно-оптические линии связи, полупроводниковые лазерные диоды, электро-оптические модуляторы, фотодетекторы, волоконные усилители, электро-оптические генераторы СВЧ, фотонные АЦП, АФАР.

-----

Примерно 10 лет назад в зарубежной периодике стали появляться сообщения о создании твердотельных сверхвысокочастотных и сверхширокополосных электро-оптических и опто-электронных устройств. Накопленная за эти годы информация позволяет сделать следующее предположение: в области радиотехники СВЧ происходят какие-то фундаментальные изменения. Причём речь идёт не о каких-то новых технологических или схмотехнических решениях в области традиционной радиоэлектроники, а о принципиально новых разделах радиотехники, которые называют фотоникой, радиофотоникой и микроволновой фотоникой ( Microwave Photonics - MWP ).

Данный доклад предполагается сделать обзорным и вступительным к серии докладов по MWP. Цель этого доклада - показать наиболее яркие примеры применения методов и средств MWP в системах радиосвязи и радиолокации.

Для начала необходимо немного поговорить о фотонике вообще - что это такое и, каковы причины её появления и бурного развития? Одним из первых термин “фотоника” использовал в 1967 году академик А.Н. Теренин [1]. Под этим термином он понимал “совокупность взаимосвязанных фотофизических и фотохимических процессов”. Справедливости ради следует отметить, что такое определение относит данную дисциплину скорее к физической химии, а не к радиотехнике. В мировой науке получило распространение более позднее и более широкое определение фотоники, как раздела науки, изучающего системы, в которых носителями информации являются фотоны [2]. В этом смысле термин “фотоника” впервые прозвучал на 9-ом Международном конгрессе по скоростной фотографии (Denver. USA. 1970). Судя по всему, какого-то общепринятого определения фотоники, как отрасли науки и техники нет. С точки зрения авторов, применительно к радиотехнике наиболее приемлемым является определение, данное французским учёным Пьером Эйгрейном [3], который в 1967 году назвал фотоникой науку об использовании света в

различных сферах применения, включающую в себя генерацию, обнаружение и управление светом.

Принципиальное отличие фотоники от привычной нам электроники заключается в том, что вместо электрона в фотонных устройствах используется фотон. Фотонные устройства, в перспективе, будут иметь гигантские преимущества перед электронными устройствами. Так например, фотоны, в отличие от электронов, не имеют веса и не создают сопротивления. Поэтому, фотонные устройства могут формировать импульсы длительностью менее  $10^{-15}$  секунды [3], что примерно на 5-6 порядков меньше длительности самых коротких импульсов, формируемых электронными устройствами.

В настоящий момент в мире уже создана полноценная многопрофильная фотонная промышленность, которая специализируется на разработке и производстве

- твёрдотельных источников света ( полупроводниковых лазеров и светоизлучающих диодов ),

- оптических шин данных, оптических носителей информации типа CD, DVD, голографических сред, жидкокристаллических экранов, установок машинного зрения, компонентов оптоволоконных линий связи и т.д.

В последнее время, фотоника становится одним из ведущих рыночных секторов Европы, которая в свою очередь, является мировым лидером в этой области. Темпы развития фотоники впечатляют [3]: с 2003г. по 2010 г.

- количество работ по этой тематике возросло в 3 раза;
- стоимость продукции увеличилась более чем в 4 раза;
- количество патентов возросло в 3 раза.

Поэтому, велика вероятность того, что 21-й век будут называть веком фотона, по аналогии с тем, как 20-й век называли веком электрона [3]. В пользу этого говорит и то, что электроника, в настоящий момент, уже подошла к своим потенциальным физическим пределам, хотя появление новых материалов, например графена, вероятно, ещё продлит на некоторое время “гегемонию” традиционной электроники.

Далее поговорим о причинах, по которым фотоника стала активно проникать в технику СВЧ, в результате чего собственно и появилась фотоника СВЧ или MWP. Исходя из накопленной информации, можно предположить следующее: основной причиной появления и широкого распространения MWP была потребность в развитии сверхскоростных ( до 100 Гб/сек и выше ) линий связи для передачи сверхширокополосных сигналов с шириной спектра до 100 ГГц и более. Для передачи таких сверхширокополосных сигналов необходимо использовать несущие с частотами в районе десятков, и даже сотен ГГц. Передача сигналов с такими несущими проблематична даже на незначительные расстояния: при передаче через эфир всего на 100 м сигнала с несущей в районе 50 ГГц, потери составят более 100 дБ. Потери в коаксиальных кабелях будут немного меньше, но и тут, в лучшем случае, речь может идти о сотнях метров, причём стоит это будет очень дорого.

Поэтому, передача таких сверхширокополосных сигналов на дальние расстояния: десятки, сотни и даже тысячи километров была возможна только

по волоконно-оптическим линиям связи ( ВОЛС ). И только на конечном этапе передачи сверхширокополосного сигнала - в точке разветвления для абонентов локальной сети - можно использовать передачу через эфир (рис. 1).

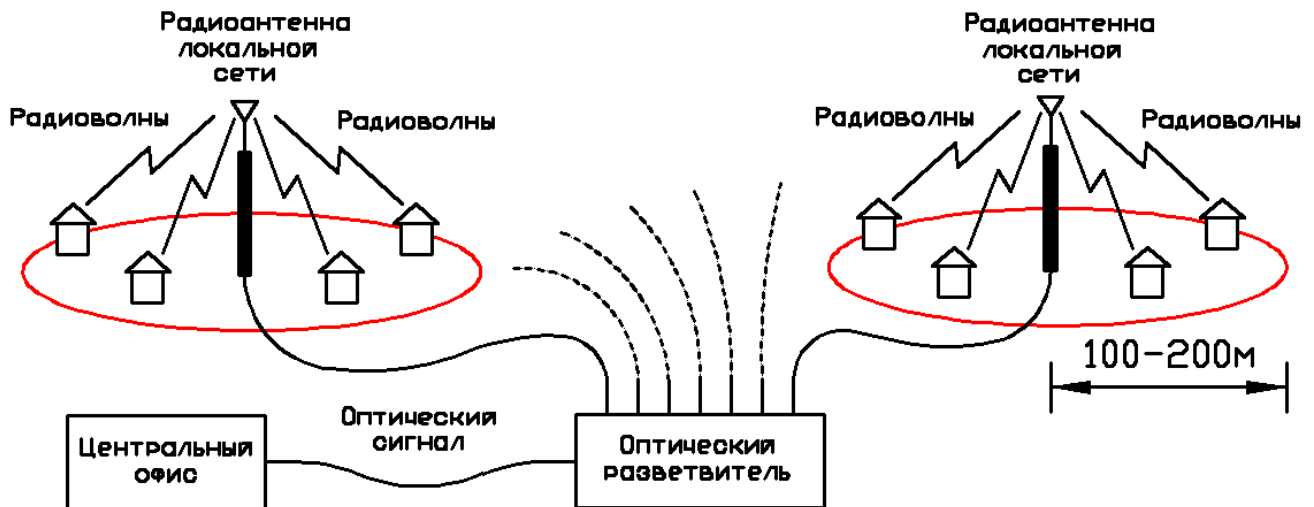


Рис. 1. Структурная схема сети ROF

Такой тип связи называется волоконно-оптической радиосвязью, или, как это принято называть за рубежом [4], Radio - over - Fiber ( ROF ). Более детально структурная схема ВОЛС для сети ROF приведена на рис. 2.

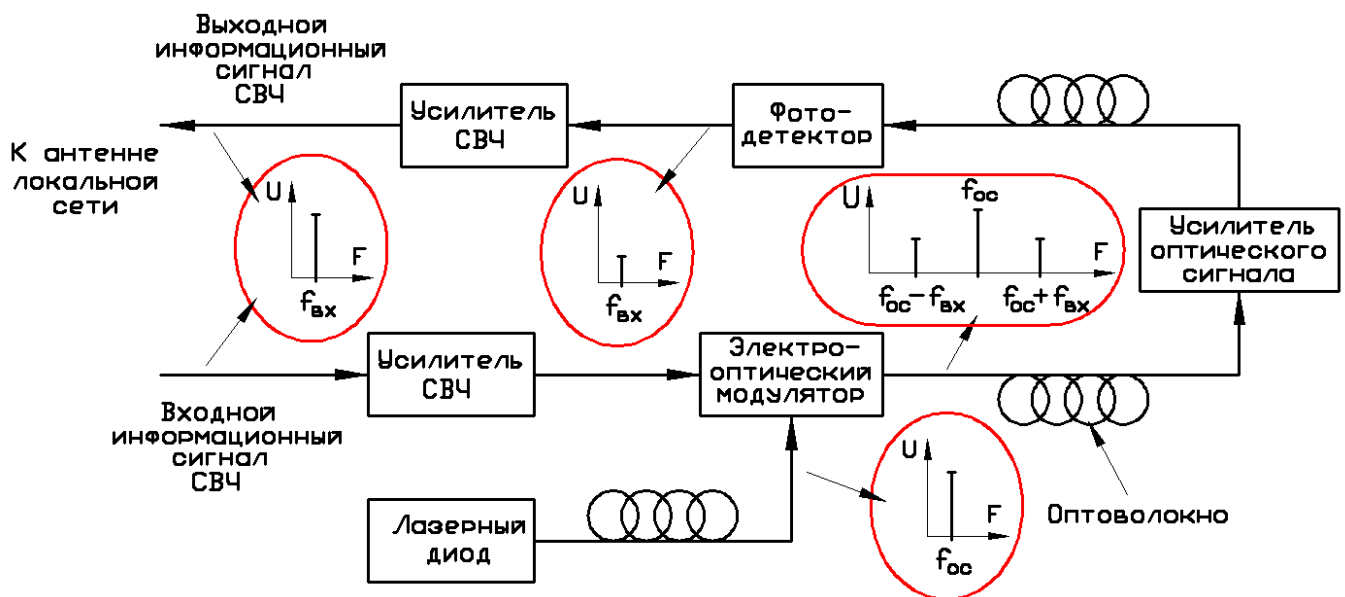


Рис. 2. Структурная схема ВОЛС для сети ROF

Передача сверхширокополосного СВЧ сигнала осуществляется следующим образом:

- сначала оптический сигнал модулируется входным информационным СВЧ сигналом, который может быть предварительно усилен во входном СВЧ усилителе;
- источником оптического сигнала является лазерный диод;

- модуляция осуществляется в электро-оптическом модуляторе;
- далее промодулированный оптический сигнал поступает на вход оптоволоконного кабеля;
- в оптоволоконном кабеле сигнал может быть усилен оптическим волоконным усилителем;
- на выходе оптоволоконного кабеля стоит фотодетектор, в котором осуществляется демодуляция оптического сигнала;
- продетектированный СВЧ сигнал, который является тождественной копией входного сигнала СВЧ, может быть усилен выходным усилителем СВЧ;
- выходной сигнал СВЧ поступает на эфирную антенну локальной сети, которая была приведена на рис.1.

Таким образом, для того, чтобы сверхширокополосные сигналы СВЧ можно было передавать по ВОЛС, сначала этими сигналами необходимо промодулировать оптический сигнал.

Что представляет из себя процесс модуляции с физической точки зрения? Это взаимодействие в оптической среде оптических и микроволновых сигналов, а изучением таких взаимодействий и занимается раздел науки, который называется MWP ( [ru.wikipedia.org/wiki](http://ru.wikipedia.org/wiki/) ).

Кроме оптико-микроволновых взаимодействий, MWP изучает

- работу фотонных устройств на СВЧ;
- методы фотонного управления СВЧ устройствами и линиями высокочастотной передачи;
- возможные варианты использование фотоники для выполнения различных функций в микроволновых схемах.

Далее поговорим об элементной базе MWP.

В качестве источников оптического сигнала используются полупроводниковые лазеры, которые с момента появления в начале 60-х годов прошли путь от относительно простых лазеров на основе гомоперехода [5] до современных лазеров [6,7,8] с распределённой обратной связью ( distributed feedback laser ) и лазеров с синхронизированными модами (mode-locked laser).

В качестве электро-оптических модуляторов могут использоваться планарные модуляторы на основе интерферометра Маха-Цандера [9] или электро-поглощающие модуляторы [10].

Все вышеперечисленные модуляторы в настоящий момент реализуются по планарным серийнопригодным технологиям, и более того, могут быть интегрированы с полупроводниковыми лазерными диодами в фотонных монолитных интегральных схемах [7].

В качестве сверхширокополосных усилителей СВЧ могут использоваться, например, практически все МИС сверхширокополосных усилителей фирмы Hittite Microwave Corporation ( [www.hittite.com](http://www.hittite.com) ).

В качестве канализирующей среды, по которой распространяется оптический сигнал, используются стандартные оптические волокна. Для усиления промодулированных оптических сигналов [11] могут использоваться волоконные эрбиевые усилители (Erbium Doped Fiber Amplifier - EDFA).

Для демодуляции оптических сигналов, промодулированных сверхширокополосными сигналами СВЧ, в настоящий момент используются [12] фотодиоды бегущей волны (traveling-wave photodiode).

Все перечисленные выше элементы тракта ВОЛС уже сейчас имеют диапазоны рабочих частот по СВЧ входам-выходам в несколько десятков ГГц. На основе такой элементной базы в настоящий момент создаются каналы связи с пропускной способностью более 100 Гб/с, а в перспективе - могут быть созданы каналы связи с терабитной пропускной способностью [13].

Необходимо отметить, что проблемами волоконно-оптической радиосвязи с каждым годом начинает заниматься всё больше и больше инженеров и учёных - исследователей. Последнее можно обосновать тем, что большая часть докладов, представляемых на ежегодных международных конференциях по MWP [4,10, 12, 14, 16, 17], посвящается проблемам такой радиосвязи.

Далее поговорим о возможных вариантах применения MWP в радиолокации. С момента появления более-менее дееспособных радиолокаторов в 40-х годах прошлого века радиолокация и радиосвязь развивались практически независимо друг от друга, так как большинство радиолокаторов работало на частотах от 1 ГГц и выше, а устройства радиосвязи - в лучшем случае, на частотах порядка нескольких сотен МГц. Но со временем, диапазоны частот для радиолокации и радиосвязи сначала стали сближаться, а сейчас вообще стали пересекаться, как в случае с волоконно-оптической радиосвязью. Более того, в настоящий момент всё чаще говорится о том, что происходит не только сближение диапазонов рабочих частот, но и областей применения систем РЛС, РЭБ и средств связи. Программы создания таких объединённых систем за рубежом уже осуществляются. Пример такой программы - это проект ВМФ США AMRFC - Advanced Multifunction RF Concept ( передовая многофункциональная ВЧ концепция). Эта система [14] может одновременно генерировать несколько лучей: один для навигационного сканирования, второй - для радиосвязи в пределах прямой видимости, третий - для спутниковой связи.

Поэтому, не удивительно, что методы MWP стали применяться в радиолокации, и прежде всего в Активных Фазированных Антенных Решётках [15], которые, как известно, являются одним из основных атрибутов авиационных комплексов 5-го поколения.

Рассмотрим конкретные примеры использования методов MWP для реализации СВЧ трактов радиолокационных устройств и отдельных элементов этих трактов.

В некоторых источниках [16] описаны т.н. опто-электронные генераторы (opto-electronic oscillator - OEO). На рис. 3 приведена упрощённая схема такого генератора.

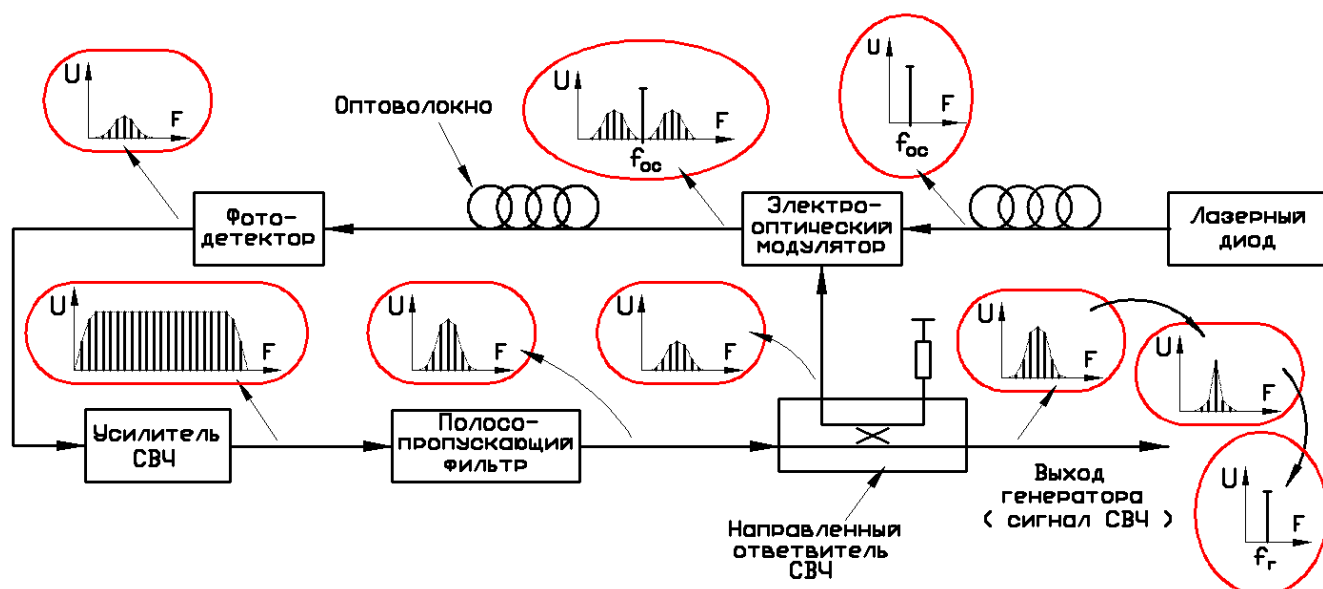


Рис. 3. Структурная схема ОЕО.

Принцип работы ОЕО можно описать следующим образом. Широкополосный шумовой сигнал с выхода широкополосного усилителя СВЧ поступает на вход полосно-пропускающего фильтра. Этот ППФ формирует узкополосный шумовой сигнал. Часть этого шумового сигнала ответвляется направленным ответвителем СВЧ для модуляции оптического сигнала лазерного диода. Модуляция осуществляется в электро-оптическом модуляторе. Далее промодулированный оптический сигнал поступает в оптоволоконно, на выходе которого стоит фотодетектор. Продетектированный шумовой сигнал СВЧ поступает на вход усилителя СВЧ. Таким образом формируется цепь положительной обратной связи и создаются условия для самовозбуждения автогенератора. А в роли резонансного элемента этой обратной связи выступает оптический тракт - точнее отрезок оптоволоконно. Добротность такого резонансного элемента может достигать  $10^6$ . Для сравнения - добротность диэлектрических резонаторов, которые применяются для реализации генераторов СВЧ примерно на 3 порядка ниже. Причём -  $10^6$  - это ещё не предел. Вместо оптоволоконно можно использовать и другие фотонные элементы, имеющие более высокие добротности. Предложенная схема позволяет создавать фиксированные прецизионные малошумящие источники радиосигналов диапазона от сотен мегагерц до десятков гигагерц с рекордными характеристиками. Если фиксированный полосно-пропускающий фильтр в схеме рис. 3 заменить перестраиваемым, то можно получить ОЕО с перестройкой частоты. Необходимо отметить, что перестройка частоты ОЕО может осуществляться и другими способами [17].

Следует отметить, что в настоящий момент речь уже идёт не об экспериментальных образцах, а о серийно-выпускаемых изделиях, которые уже имеются на рынке. К примеру, серийно выпускаемый генератор фирмы «OEwaves» ([www.oewaves.com](http://www.oewaves.com)) имеет на частоте 10 ГГц уровень частотных шумов -150 дБн/Гц при отстройке от несущей на 10 КГц.

Также, с использованием методов MWP реализуются перестраиваемые СВЧ - фильтры ( [www.oewaves.com](http://www.oewaves.com) ) и другие элементы трактов СВЧ.

Одним из наиболее перспективных направлений развития MWP является разработка опто-электронных или фотонных АЦП.

Структурная схема такого АЦП приведена на рис. 4 [8].

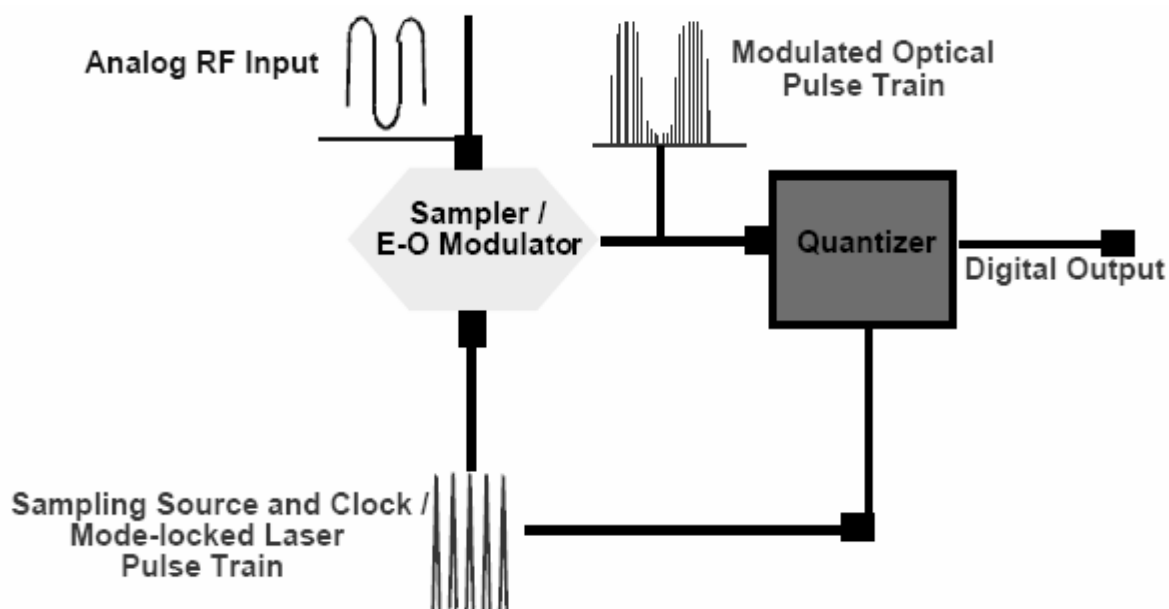


Рис. 4. Структурная схема фотонного АЦП

Известно, что процесс оцифровки начинается с дискретизации. В данном случае дискретизация входного СВЧ сигнала осуществляется в электро-оптическом модуляторе при помощи сверхкоротких оптических импульсов. Выше уже говорилось, что фотонные устройства могут формировать импульсы длительностью до  $10^{-15}$  сек, что позволит осуществлять дискретизацию сигналов с частотами до нескольких десятков ГГц. Есть сообщения, что в рамках выполнения программы РАСТ ( Photonic A/D Converter Technology, [8]) планировалась разработка фотонных АЦП со скоростью до 100 Гигавыборок в секунду и с разрешающей способностью до 4 бит.

Кроме того, необходимо отметить, что разработки ведутся не только по фотонным АЦП, но и по аналоговым электро-оптическим процессорам. Известны следующие программы DARPA ([www.thelivingmoon.com/45jack\\_files/03documents/Darpa\\_Fact\\_File.html](http://www.thelivingmoon.com/45jack_files/03documents/Darpa_Fact_File.html)) по данной тематике:

- Radio-Frequency Lightwave Integrated Circuits;
- Photonic Wavelength and Spatial Signal Processing;
- VLSI Photonics;
- Analog Optical Signal Processing.

Далее поговорим о возможных вариантах реализации приёмных трактов СВЧ с использованием методов MWP. Начнём с наиболее свежих примеров. В ряде источников ([www.military.com](http://www.military.com)) содержится информация о том, что в

настоящий момент, в рамках работ по т.н. НРМ - технологии ( high-power microwave ) создана и успешно испытана так называемая система вооружений прямого энергетического действия, причём речь идёт об импульсных устройствах имеющих габариты порядка  $10 \times 10$  см и уровень излучающей мощности до 30 МВт сейчас и 100 МВт в перспективе. Кстати говоря, такие результаты были достигнуты именно благодаря использованию методов микроволновой фотоники. Если из сотни таких устройств собрать панель размерами всего  $1 \times 1$  м, то можно достигнуть суммарной мощности в 10 ГВт, достаточной для поражающей способности на тактически эффективных расстояниях. Поэтому, крайне актуальными становится вопросы защиты входных трактов радиолокационных устройств, так как традиционные электронные защитные устройства в данном случае не спасут. Что в этом случае можно предпринять? Возможный вариант решения данной проблемы приводится в одном из патентов США [18]. В этом патенте описан неэлектронный, полностью диэлектрический входной каскад радиоприёмника, в котором использованы изоляционные свойства фотоники для устранения металлических электродов, соединяющих входные тракты приёмника с антенной. В упрощённом виде конструкция неэлектронного входного каскада выглядит следующим образом (рис. 5).

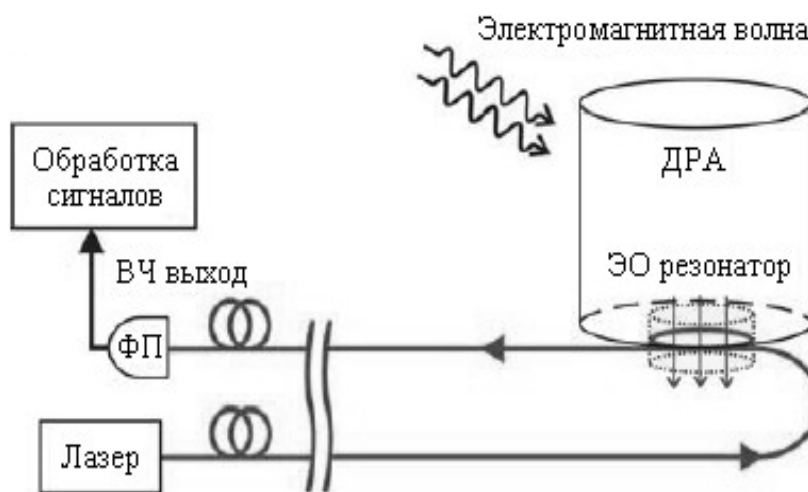


Рис. 5. Структурная схема неэлектронного входного каскада радиоприёмника

В полость внутри цилиндрической диэлектрической резонансной антенны (ДРА) определённым образом помещается электрооптический резонатор (ЭО-резонатор), реализованный в виде оптического резонансного диска. ДРА выполняет функцию концентратора принимаемой мощности радиочастотного излучения. ЭО-резонатор сконфигурирован на приём сигнала от вышеупомянутой ДРА за счёт эффекта Поппельса. Так же на этот электрооптический резонатор с оптического входа антенны поступает оптический сигнал от лазерного диода. Оптические и радиочастотные поля вступают во взаимодействие, в результате чего на оптическом выходе антенны формируется оптический сигнал, промодулированный принимаемым сигналом СВЧ. Этот



сигнал поступает на фотоприёмник (ФП), на выходе которого восстанавливается принимаемый сигнал СВЧ. Таким образом, обеспечивается полная изоляция между границей воздушной среды и следующей за ней радиоэлектронной схемой, что делает возможным создание радиоприёмника, устойчивого к воздействию электромагнитных импульсов высокой мощности и СВЧ - импульсов высокой мощности.

Очевидно, что это устройство не является широкополосным, но в этом же патенте приводится ещё одна конструкция входного каскада, которая имеет более широкий диапазон рабочих частот. Расширение диапазона рабочих частот происходит за счёт применения не одного, а нескольких оптических микрорезонансных дисков.

Рассмотрим другие примеры реализации элементов трактов СВЧ с использованием методов MWP.

Корпорация «Lockheed Martin» запатентовала схему доплеровского локатора на основе фотонных элементов [19], в котором входной сигнал СВЧ сразу “забрасывается” в оптический диапазон (рис. 6).

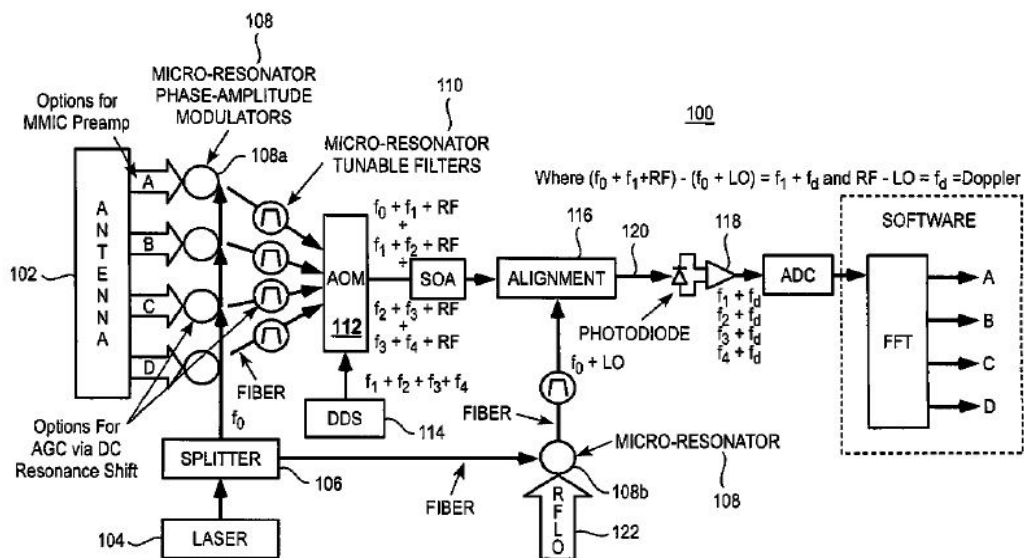


Рис. 6. Структурная схема доплеровского локатора на основе фотонных элементов.

В данной схеме в полном объеме используются свойства электрооптических резонаторов, как в качестве перестраиваемых фильтров, так и в качестве высокочувствительных модуляторов. Интересен и тот факт, что в этой схеме реализована традиционная концепция переноса спектра высокочастотного сигнала на диапазон промежуточных частот, удобных для обработки цифровыми методами.

Этот патент буквально подталкивает нас к идее создания многоканального сверхширокополосного супергетеродинного приёмника, структурная схема которого приведена на рис. 7.

В каждом СОС-1 - СОС-N происходит суммирование ( объединение ) двух оптических сигналов, один из которых промодулирован СВЧ сигналом гетеродина, другой - входным (информационным) СВЧ сигналом. С выходов СОС-1 - СОС-N модулированные оптические сигналы (Fос.мод.Фг и Fос.мод.Фвх) поступают в общие оптоволоконные тракты, где они сначала

усиливаются волоконными усилителями оптических сигналов УОС-1 - УОС-N, а потом поступают на входы фотодетекторов ФД-1 - ФД-N. В этих фотодетекторах происходит смешивание ( преобразование ) данных оптических сигналов с образованием широкого спектра выходных радиочастотных сигналов. Для выделения сигналов с требуемой промежуточной частотой (Fпч): например, Fс - Fг или Fг - Fс, на выходах этих фотодетекторов устанавливаются частотные фильтры ЧФ-1 - ЧФ-N, которые и выделяют сигнал с требуемой частотой.

Такой подход к построению приёмных трактов СВЧ позволяет значительно расширить диапазоны рабочих частот супергетеродинных приёмников. Кроме того, современные технологии MWP [13] позволяют объединять дискретные элементы MWP в монолитные многофункциональные интегральные схемы (ММИС). Пример такого объединения приведён на рис. 7, где пунктиром выделена возможная структура ММИС, состоящая из ЛД, ДОС-1, ДОС-2, ДОС-3 И ЭОМ-(N+1). Можно предположить, что при замене традиционной “электронной” элементной базы на интегральную элементную базу MWP, можно ожидать, как минимум, кратного уменьшения габаритов входных трактов СВЧ супергетеродинных приёмников.

Таким образом, на основе вышеизложенного можно сделать следующий вывод: MWP начинает быстрыми темпами проникать, как минимум, во входные тракты радиолокационных и радиоприёмных устройств.

Поэтому, всем разработчикам и производителям радиолокационной техники, а так же разработчикам сетей сверхширокополосной радиосвязи, необходимо скоординировать усилия с целью организации общегосударственных программ развития фотоники вообще, и микроволновой фотоники в частности. Кроме того, промышленным предприятиям совместно с высшими учебными заведениями необходимо разработать и запустить учебные программы по подготовке специалистов в области MWP.

---

## Литература.

- [1] Теренин А.Н. Фотоника молекул красителей. Л.: Наука, 1967. 616с.
- [2] Акопян М.Е. К истории развития фотоники в Санкт-Петербургском ( Ленинградском ) государственном университете.  
[www.niif.spbu.ru/departments/chem-ph/Texts/Photonics.doc](http://www.niif.spbu.ru/departments/chem-ph/Texts/Photonics.doc)
- [3] Photonics for the 21st Century. Consolidated European Photonics Research Initiative  
[ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/ist/docs/dir\\_c/mnoc/photonics\\_for\\_the\\_21st\\_century\\_en.pdf](http://ftp.cordis.europa.eu/pub/ist/docs/dir_c/mnoc/photonics_for_the_21st_century_en.pdf)

[4] B. Charbonnier, H. Le Bras, P. Urvoas, Q.T. N'Guyen, M. Huchard, A. Pizzinat. Upcoming perspectives and future challenges for ROF. - 2007 International Topical Meeting on Microwave Photonics.

[5] П.Г. Елисеев. Полупроводниковые лазеры - от гомопереходов до квантовых точек. Квантовая Электроника, 2002, Том 32, № 12, с. 1085-1098.

<http://www.quantum-electron.ru>

[6] Хансперджер Р. Интегральная оптика: теория и технология. Изд. "Мир", Москва, 1985 г., 384 стр.

[7] Philipp Gerlach. DFB Laser Integrated Electroabsorption Modulators. Annual Report 2003, Optoelectronics Department, University of Ulm.

[www-opto.e-technik.uni-ulm.de/forschung](http://www-opto.e-technik.uni-ulm.de/forschung).

[8] Photonic analog-to-digital converters. AFRL-SN-RS-TR-2006-109. In-House Final Technical Report. March 2006.

[www.dtic.mil/cgi-](http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=ADA449267)

[bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=ADA449267](http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=ADA449267)

[9] Слепов Н.Н. Оптические волновые конверторы и модуляторы. Электроника: Наука, Технология, Бизнес, № 6, 2000 г.

[10] Yong-Duck Chung, Young-Shik Kang, Kwang-Seong Choi, Sung-Bock Kim, and Jeha Kim. RF gain and IMD Characteristics of Electroabsorption Modulator for Analog Applications. - 2005 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP 2005).

[11] R. J. Mears, L. Reekie, M. Jauncey, and D. N. Payne, "Low-noise erbium-doped fiber amplifier operating at 1.54  $\mu\text{m}$ ", Electron. Lett. 26, 1026 (1987).

[12] Joe C. Campbell and Andreas Beling. High-speed, waveguide photodiodes. The 2008 IEEE International Meeting on Microwave Photonics.

[13] Прорыв Intel в области кремниевой фотоники. КомпьютерПресс №11, 2006. <http://www.compress.ru/article.aspx?id=16851&iid=781>

[14] Joon Y. Choe. Defense RF Systems: Future Needs, Requirements, and Opportunities for Photonics. 2005 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP 2005).

[15] Активные фазированные антенные решётки/ Под ред. Д.И. Воскресенского и А.И. Канащенкова. - М.: Радиотехника, 2004. - 488с.: ил.

[16] Nguyen Lam Duy, Bernard Journet, Isabelle Ledoux-Rak, Joseph Zyss, Luong Vu Hai Nam, Vu Van Luc. Opto-electronic Oscillator: Applications to Sensors. The 2008 IEEE International Meeting on Microwave Photonics.

[17] Sascha Fedderwitz, Vitaly Rymanov, Mario Weiß., Andreas Stöhr, Dieter Jäger, Andreas Gerhard Steffan, Andreas Umbach. Ultra-Broadband and Low Phase Noise Photonic Millimeter-Wave Generation. The 2008 IEEE International Meeting on Microwave Photonics.

[18] Bahram Jalali, Chia-Jen Hsu, Bijan Houshmand. Non-electronic radio frequency front-end with immunity to electromagnetic pulse damage. Patent № US 7 450 790 B1.

[19] Brett A. Williams, Mark A. Turner. Miniaturized microwave-photonic receiver. Patent № US 7 724 179 B2.