
Слайд №1

Заставка с символикой ЦКБА.

– Добрый день, уважаемые коллеги!

– В феврале я уже здесь делал доклад по микроволновой фотонике. Зачем я снова возвращаюсь к этой тематике?

– Причины следующие.

- Февральский доклад состоял из сплошных гипотез о том, что в области радиотехники СВЧ происходят какие-то фундаментальные изменения.
- Причём речь шла не о каких-то новых технологиях или схемотехнических решениях в области традиционной радиоэлектроники, а о принципиально новых разделах радиотехники, который называют фотоникой и микроволновой фотоникой.
- За прошедшие 9 месяцев мы накопили огромный фактический материал, исходя из которого, можно сделать следующий вывод – всё, о чём говорилось в февральском докладе – это не гипотезы – это реальность.
- Поэтому, всем тем, кто занимается проектированием перспективной радио-аппаратуры должны на это как-то реагировать.
- Вот я и подумал, что неплохо бы организовать мероприятия по обсуждению данной тематики. Формат наших семинаров как нельзя лучше для этого подходит.
- Мой сегодняшний доклад будет таким вводно-обзорным. На следующих семинарах мы планируем сделать серию более детальных докладов по более узким темам: физическим основам, элементной базе и функциональным элементам.

Сразу хочу сказать, что мы располагаем достаточно внушительным объёмом информации по этой тематике. К сожалению, из-за “особой специфики” ряда источников, я не смогу здесь привести ряд очень ярких и впечатляющих примеров. Однако если обладающим соответствующей формой допуска коллегам

данная тематика покажется интересной – мы готовы этой информацией поделиться. Возможно, будет даже целесообразно провести семинар по данной тематике – например, на территории ОАО “ЦКБА”.

Для начала необходимо немного поговорить о фотонике вообще. Что это такое – и каковы причины её появления и бурного развития?

Термин “фотоника” первым в 1967 году применил французский учёный Пьер Эйгрейн. Под фотоникой (слайд №2) он понимал науку об использовании света в различных сферах применения, включающую в себя генерацию, обнаружение и управление светом.

Принципиальное отличие фотоники от привычной для нас 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, что примерно на 5-6 порядков меньше длительности самых коротких импульсов, формируемых электронными устройствами. Более того, в некоторых источниках говорится даже об аттосекундных (10^{-18} секунды) импульсах. А, кроме того, в сфокусированном свете, создаваемом лазерами, концентрируется наивысшая энергия, известная в мире.

В настоящий момент в мире уже создана полноценная многопрофильная фотонная промышленность (слайд №3), 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.

На слайде №4 приведены показатели темпов развития этой отрасли с 2003 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.

И вообще, велика вероятность того, что 21-й век будут называть веком фотона, по аналогии с тем, как 20-й век называли веком электрона. 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 “агонию” традиционной электроники.

Далее поговорим о причинах, по которым фотоника стала активно проникать в технику СВЧ, в результате чего собственно и появилась фотоника СВЧ, или, другими словами, микроволновая фотоника.

Исходя из накопленной информации, можно предположить то, что основной причиной появления и широкого распространения микроволновой фотоники была потребность в развитии сверхскоростных (до 50-ти и даже 100 Гб/сек!), а значит и сверхширокополосных (с полосой пропускания до 100 и даже до 200 ГГц) линий связи.

Разумеется, для передачи таких сверхширокополосных сигналов необходимо было использовать несущие с частотами в районе 50 - 100 ГГц. Передача сигналов с такими несущими проблематична даже на незначительные расстояния. По формуле, приведённой на слайде №5, можно посчитать, что 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, ни о каком массовом распространении таких коаксиальных линий и речи быть не может.

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.

Такой тип связи принято назвать *волоконно-оптической радиосвязью*, или как это принято называть за рубежом, *Radio - over - Fiber или ROF*.

Возможная структурная схема ВОЛС для сети волоконно-оптической радиосвязи приведена на слайде №6. 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 электрооптическом модуляторе;

- далее промодулированный оптический сигнал поступает на вход оптоволоконного кабеля;

- в оптоволоконном кабеле сигнал может быть усилен оптическим 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.

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

Что представляет собой 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 *микроволновая фотоника*. На слайде №7 приведено определение микроволновой фотоники.

Далее поговорим об элементной базе микроволновой фотоники.

В качестве источников оптического сигнала используются полупроводниковые лазеры (слайд №8).

В качестве микроволновых модуляторов оптических сигналов (электрооптических модуляторов) могут использоваться электро-поглощающие модуляторы или интерферометры Маха-Цандера.

Структура электро-поглощающего модулятора в планарном исполнении приведена на слайде №9.

На слайде №10 приведена топология полупроводникового электро-поглощающего модулятора, реализованного с использованием технологии гетеробиполярных транзисторов или НВТ-технологии.

А на слайде №11 приведена гибридная интегральная схема электро-поглощающего модулятора на 60 ГГц, реализованная с использованием технологии система-в-корпусе.

На слайде №12 приведена типичная структура модулятора или интерферометра Маха-Цандера в планарном исполнении.

Все вышеперечисленные модуляторы в настоящий момент реализуются по полупроводниковым интегральным технологиям и могут иметь по входу СВЧ сверхширокополосные диапазоны рабочих частот – до десятков гигагерц – и при этом могут иметь сверхнизкие коэффициенты шума – ниже 1 дБ.

В качестве сверхширокополосных усилителей СВЧ могут использоваться практически все МИС сверхширокополосных усилителей фирмы Hittite.

В качестве канализирующей среды, по которой распространяется оптический сигнал, используются стандартные оптические волокна.

Для усиления промодулированных оптических сигналов могут использоваться волоконные эрбиевые усилители (слайд №13).

Для демодуляции оптических сигналов, промодулированных входными информационными сигналами СВЧ используются фотодетекторы.

Для реализации таких фотодетекторов используются фотодиоды (слайд №14).

Сами же фотодетекторы реализуются, как правило, либо в виде планарных гибридных интегральных схем (слайд №15), либо в виде гибридных интегральных схем, изготовленных с использованием технологии система-в-корпусе (слайд №16).

Такие фотодетекторы также могут иметь по выходу СВЧ сверхширокополосные диапазоны рабочих частот – десятки гигагерц. По поводу чувствительности таких фотодетекторов мы пока в поиске. Однако уже сейчас можем сказать, что мощность протектированного выходного сигнала СВЧ может составлять сотни мВт, что позволит создавать ряд устройств, о которых я скажу ниже (слайды №№ 26, 27, 28, 29).

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 микроволновой фотонике, посвящается проблемам такой радиосвязи. Одна из последних конференций была проведена в Канаде (слайд № 17).

Теперь, что касается радиолокации. С момента появления более-менее дееспособных радиолокаторов в 40-х годах прошлого века, радиолокация и радиосвязь развивались практически независимо друг от друга. Причина понятна – 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.***

Поэтому, не удивительно, что методы микроволновой фотоники стали применяться в радиолокации, и прежде всего в Активных Фазированных

Антенных Решётках, которые, как известно, являются одним из основных атрибутов авиационных комплексов 5-го поколения. При разработке АФАР разработчики столкнулись с рядом очень серьёзных проблем, одной из которых была разработка *системы разводки сигналов*. Исследовательские и проектные работы показали, что эта проблема может быть решена за счёт использования методов микроволновой фотоники. В частности, использования волоконно-оптических каналов для передачи отдельных сигналов СВЧ, требующихся для работы приёмо-передающих модулей АФАР. Кроме того, за счёт использования методов MWP можно существенно снизить массу и габариты АФАР.

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

В ряде работ описаны т.н. оптоэлектронные генераторы. На слайде №18 приведена упрощённая схема такого генератора. Принцип работы такого генератора можно описать следующим образом. Широкополосный шумовой сигнал с выхода широкополосного усилителя СВЧ поступает на вход управляемого полосно-пропускающего фильтра. Этот ППФ формирует узкополосный шумовой сигнал. Этим узкополосным сигналом модулируется оптический сигнал лазерного диода. Модуляция осуществляется в электрооптическом модуляторе. В данном случае он назван модулятором интенсивности - ИМ. Далее промодулированный оптический сигнал усиливается эрбиевым волоконным усилителем и поступает в оптоволокно. Далее промодулированный шумом СВЧ оптический сигнал демодулируется в фотодетекторе, а 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 оптоволокна. 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 оптоволокна можно использовать т.н. резонаторы на модах шепчущей галереи, которые могут иметь добротность до 10^{11} , что позволяет реализовать высокостабильные фиксированные и перестраиваемые генераторы СВЧ со сверхнизким уровнем фазовых шумов.

Предложенная схема позволяет создавать прецизионные малошумящие источники радиосигналов диапазона от сотен мегагерц до десятков гигагерц. Полученные результаты экспериментального исследования частотных шумов показывают возможность достижения в оптоэлектронном генераторе с частотой 10 ГГц уровней $-150\dots-160$ дБн/Гц на расстоянии от несущей в 10 кГц, что является рекордными величинами для современных генераторов X-диапазона.

Также есть сообщения о том, что таким образом были реализованы генераторы с микросекундной перестройкой в диапазоне 1 - 40 ГГц, уровень фазовых шумов которого был примерно на 20 дБ ниже, чем у синтезаторов частоты с петлёй ФАПЧ. Таким образом, при использовании методов микроволновой фотоники мы можем избавиться от проблем, которые возникают при поиске компромисса, который заключается в выборе между широкой полосой перестройки и низкими частотными шумами.

Следует отметить, что в настоящий момент речь уже идёт не об экспериментальных образцах, а о серийно-выпускаемых изделиях, которые уже предлагаются на рынке. К примеру, серийно выпускаемый генератор фирмы «OEwaves» (слайд №19) имеет на частоте 10 ГГц уровень частотных шумов -150 дБн/Гц при отстройке от несущей на 10 кГц.

Также, с использованием методов микроволновой фотоники реализуются перестраиваемые СВЧ-фильтры, линии задержки и т.д. На слайде №20 приведён перестраиваемый полосно-пропускающий фильтр фирмы «OEwaves».

Но наиболее интересным направлением развития микроволновой фотоники, с моей точки зрения, является разработка оптоэлектронных или фотонных АЦП.

Структурная схема такого АЦП приведена на слайде №21. Известно, что процесс оцифровки начинается с дискретизации. В данном случае дискретизация входного СВЧ сигнала осуществляется в электрооптическом 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. В настоящий момент мы собираем информацию о том, как осуществляется второй этап аналого-цифрового преобразования - квантование.

Кроме того, необходимо отметить, что разработки ведутся не только по АЦП, но и по аналоговым электрооптическим процессорам.

За рубежом, и в США в частности, этой тематикой занимаются очень серьезно.

На слайде №22 приведена информация о ряде программ DARPA в области микроволновой фотоники, которые перечислены на открытом сайте этой организации.

Далее поговорим о возможных вариантах реализации приёмных трактов СВЧ с использованием методов микроволновой фотоники

Начнём с наиболее свежих примеров. В ряде источников, например на сайте 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 10×10 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 1×1 м, то можно достигнуть суммарной мощности в 10 ГВт, достаточной для поражающей способности на тактически эффективных расстояниях. Поэтому, крайне актуальными становятся вопросы защиты входных трактов радиолокационных и радиоприёмных 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 патенте США, автором которого является Бахрама Джелали. В этом патенте описан полностью

диэлектрический или неэлектронный входной каскад радиоприемника, в котором использованы изоляционные свойства фотоники для устранения металлических электродов, межсоединений и антенны.

В упрощённом виде конструкция неэлектронного входного каскада приведена на слайде №23. В полость внутри цилиндрической диэлектрической резонансной антенны (ДРА) определённым образом помещается электрооптический резонатор (ЭОР), реализованный в виде оптического резонансного диска. ДРА выполняет функцию концентратора принимаемой мощности радиочастотного излучения. Электрооптический резонатор сконфигурирован на приём сигнала от вышеупомянутой ДРА за счёт эффекта Поккельса. 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 фотодетектор, 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. В тексте патента сказано, что это устройство устойчиво даже к воздействию электромагнитных импульсов при высотном ядерном взрыве.

Чувствительность экспериментального образца составила примерно -63 дБм.

Разумеется, что в указанном патенте дано самое общее описание устройства. И было бы наивно полагать, что полная информация о таком устройстве будет выложена для широкого доступа. Одно очевидно – это устройство не является широкополосным. К стати говоря, 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. Какой диапазон

рабочих частот можно получить за счёт увеличения количества микрорезонансных дисков – пока неизвестно.

Рассмотрим другие примеры реализации элементов трактов СВЧ с использованием методов микроволновой фотоники.

Корпорация «Lockheed Martin» запатентовала схему доплеровского лоатора на основе фотонных элементов, в которой входной сигнал СВЧ сразу “забрасывается” в оптический диапазон (слайды №24, №25). 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. В настоящий момент мы ищем информацию о том, как реализован один из ключевых элементов этой схемы – ALIGNMENT – в котором происходит сведение оптических сигналов перед детектированием, одни из которых промодулированы входным сигналом СВЧ, а другие - сигналом гетеродина.

Но в любом случае, этот патент буквально подталкивает нас к разработке супергетеродинного приёмника, структурная схема которого приведена на слайде №26.

Все, кто занимался разработкой многоканальных приёмных устройств, знают – какая это проблема избавиться от “завязок” между каналами. И одной из основных причин этих завязок, является “пролезание” сигналов через гетеродинные делители мощности. Используя методы микроволновой фотоники от этой проблемы можно избавиться. В данном случае (слайд №26) “разводка” сигнала гетеродина осуществляется следующим образом. Сигнал гетеродина модулирует оптический сигнал лазерного диода, потом промодулированный оптический сигнал разветвляется в оптическом разветвителе. Далее сигналы поступают на оптические входы фотодетекторов, СВЧ выходы которых присоединены непосредственно к гетеродинным входам смесителей. Благодаря такому построению гетеродинных трактов,

- отражённые от гетеродинных входов смесителей сигналы гетеродина,
- а так же “пролезающие” на гетеродинный вход сигналы из входных приемных трактов,

- а так же попадающие на гетеродинные входы спектральные комбинации и гармоники сигналов, которые возникают на нелинейных элементах смесителей, в принципе не могут попасть на гетеродинные входы смесителей в других каналах, так как фотодиоды выполняют функцию практически идеальных вентилях. Уровень мощности СВЧ сигнала, который можно получить в настоящий момент на выходе фотодетектора, как уже говорилось выше, может превышать 100 мВт.

Аналогичным образом, можно избавиться и от завязок через антенны, если входными сигналами СВЧ промодулировать оптические сигналы лазеров так, как это показано на слайде №27.

Такой подход к построению приёмных трактов позволит получить очень ровные ФЧХ каналов приёмника, что позволит очень сильно разгрузить память бортовых компьютеров, так как снизится объём информации об ошибках пеленгации, который необходимо запоминать. Так же мы получим значительный выигрыш по массе и габаритам, за счёт замены коаксиальных трактов на оптические.

Как уже говорилось выше, электрооптические модуляторы могут быть очень широкополосными и очень малошумящими. Из некоторых источников известно, что диапазон рабочих частот может составлять до 40 ГГц, а коэффициент шума - может быть менее 1 дБ. Это буквально подталкивает к тому, чтобы идею “апгрейда” входных трактов радиолокаторов при помощи методов микроволновой фотоники довести до логического завершения – вообще не детектировать промодулированные входным сигналом и сигналом гетеродина оптические сигналы, а сразу направить их на фотодиод так, как это показано на слайде №28. На выходе этого фотодиода можно будет выделить сигнал с требуемой нам промежуточной частотой.

При таком подходе, мы получим возможность реализации малогабаритных сверхширокополосных супергетеродинных приёмных каналов. Диапазон рабочих частот таких каналов уже сейчас может составить, ну скажем, 1 – 40 ГГц, и даже DC – 40 ГГц.

В настоящий момент мы оцениваем возможность реализации данной системы с точки зрения “энергетики”.

Таким образом, на основе вышеизложенного, можно сделать следующий вывод: в настоящий момент уже существует “новая радиотехника” - радиофотоника. По сравнению с “традиционной радиотехникой” - радиоэлектроникой, радиофотоника имеет более широкие возможности по части обработки и формирования радиосигналов. Радиофотоника СВЧ или микроволновая фотоника уже активно используется во входных трактах радиолокационных и радиоприёмных устройств. Поэтому, всем разработчикам и производителям радиолокационной техники, а так же систем сверхширокополосной радиосвязи, необходимо скоординировать усилия с целью организации общефедеральных программ развития фотоники вообще, и микроволновой фотоники в частности.