

---

### ***Слайд № 1 - название доклада***

- Добрый день, уважаемые коллеги. Я здесь представляю ОАО "Центральное конструкторское бюро автоматики", входящее в состав ОАО "Корпорация "Тактическое ракетное вооружение".

- Основным направлением нашей деятельности является разработка и производство систем защиты авиационных платформ от комплексов ПВО. К таким устройствам относятся

---

### ***Слайд № 2 - СПО***

- станции предупреждения о радиолокационном облучении;

---

### ***Слайд № 3 - аппаратура управления и целеуказания***

- аппаратура управления и целеуказания;

---

### ***Слайд № 4 - Л-112Э***

- пассивные радиолокационные головки самонаведения.

---

### ***Слайд № 5 - чем являются наши изделия***

- При этом - независимо от внешнего вида и названия - наши изделия являются сверхширокополосными приёмниками, работающими в диапазоне дециметровых, сантиметровых и миллиметровых длин волн.

- Далее необходимо рассказать о причинах, по которым сотрудники нашего предприятия проявили интерес к фотонике вообще и электро-оптическим модуляторам в частности.

---

### ***Слайд № 6 - “полёт на свете”***

- Где-то в конце 90-х годов прошлого века в авиации наметилась одна очень тревожная для нас тенденция. Суть этой тенденции заключалась в том, что из авионики начали целенаправленно искоренять медные провода, заменяя их, где это было возможно, на оптоволокно. Так, образно говоря, осуществлялся переход от “полёта на проводах” к “полёту на свете”. И нас это могло коснуться в первую очередь. Дело в том, что наши системы, которые размещаются на авиационных платформах, как правило, состоят из одного центрального поста и кучи выносных антенных постов. Эти антенные посты могут быть удалены от центрального поста на расстояние десятков метров. Соединяются антенные посты с центральным постом при помощи комбинированных кабелей, в состав которых входят и многожильные низкочастотные кабели, и коаксиальные высокочастотные кабели. Суммарный вес этих комбинированных кабелей примерно равен суммарному весу центрального поста и всех выносных антенных постов. Поэтому, в рамках наметившегося 10-15 лет назад ”геноцида” меди - эти комбинированные кабели попадали под “сокращение” в первую очередь.

---

### ***Слайд № 7 - цифровые и аналоговые ВОЛС***

- Поэтому, мы были вынуждены обратить внимание на ВОЛС - сначала цифровые, а потом - и аналоговые. И поначалу - всё этим и ограничивалось.

---

### ***Слайд № 8 - микроволновая фотоника***

- Но по мере погружения в тематику ВОЛС - и особенно высокочастотных аналоговых ВОЛС СВЧ - мы с удивлением обнаружили, что в мире за последние 15-20 лет сформировалась и развивается бурными темпами новая отрасль науки и техники, в рамках которой изучается и успешно используется для решения различных практических задач взаимодействие высокочастотных электрических и оптических сигналов. За рубежом - по крайней мере, в англоязычных источниках - эта отрасль науки и техники называется микроволновой фотоникой.

***Слайд № 9 - учебники и монографии по MWP***

- В настоящий момент по микроволновой фотонике можно найти и учебные пособия, и монографии.

---

***Слайд № 10 - MWP-2013***

- А кроме того - под эгидой Института инженеров электротехники и электроники - проводятся ежегодные конференции по микроволновой фотонике.

---

***Слайд № 11 - радиооптика***

- В русскоязычных литературных источниках вместо термина "микроволновая фотоника" используются самые различные термины, наиболее распространёнными из которых являются:

- радиооптика,

---

***Слайд № 12 - СВЧ - оптика***

- и СВЧ - оптика.

---

***Слайд № 13 - радиофотоника и лаборатория радиофотоники***

- Однако, в последнее время всё чаще стал использоваться термин "радиофотоника".

- Так, например, в Санкт-Петербургском Национальном Исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики при Кафедре оптики квантоворазмерных систем функционирует Лаборатория Радиофотоники.

---

---

***Слайд № 14 - концепция развития радиофотоники***

А кроме того, в настоящий момент, по заказу Министерства промышленности и торговли сотрудниками РТИ им. академика Минца разрабатывается концепция развития радиофотоники в Российской Федерации. И первый черновой вариант этой концепции предполагается обсудить на заседании РГ НТС ВПК, которое состоится послезавтра.

---

***Слайд № 15 - Резонанс***

- Далее поговорим о возможных практических приложениях радиофотоники.
  - Одним из наиболее очевидных и уже широкоиспользуемых приложений радиофотоники в технике СВЧ - являются сверхширокополосные аналоговые волоконно-оптические линии связи с диапазонами рабочих частот от десятков мегагерц до десятков гигагерц.
  - Сотрудниками нашего предприятия - в рамках выполнения ОКР "Резонанс" - разработали такую ВОЛС с диапазоном рабочих частот от 0.3 - 40.0 ГГц.
- 

***Слайд № 16 - Большой Самолёт***

- При помощи такой ВОЛС можно передавать аналоговые СВЧ сигналы между мощным центральным обрабатывающим постом и выносными антенными постами, установленными например, по периметру большого корабля или большого самолёта.
- Благодаря чему можно создать уникальное радиолокационное устройство, которое может выполнять функции и радиолокации, и радиоэлектронной борьбы, и радиосвязи, и радиоразведки - причём, в широчайшем диапазоне частот.

---

- Однако, в процессе изучения информационных материалов стало очевидно, что использование методов и средств радиوفотоники только для реализации ВОЛС напоминает *заколачивание гвоздей микроскопом*. Оказалось, что используя методы и средства радиوفотоники, можно реализовать целую серию СВЧ - *подчёркиваю* - *СВЧ устройств* с таким набором функциональных возможностей и такими электрическими параметрами, которые были недостижимы при использовании традиционных “электронных” решений. Вот небольшой перечень таких СВЧ устройств.

---

***Слайд № 17 - радиوفотонный автогенератор***

- Радиوفотонные автогенераторы СВЧ с рекордными характеристиками по “чистоте” спектра

---

***Слайд № 18 - схема одноканального радиوفотонного МИЧ***

- одноканальные ....

---

***Слайд № 19 - схема многоканального радиوفотонного МИЧ***

- и многоканальные сверхширокополосные радиوفотонные волномеры СВЧ с использованием волоконных решёток Брегга, которые ещё называют мгновенными измерителями частоты - МИЧ.

---

***Слайд № 20 - радиوفотонные смесители***

- Сверхширокополосные радифотонные преобразователи частоты.

- Для экономии времени я не буду *оглашать весь список* аналоговых процессоров диапазона СВЧ, которые могут быть реализованы с использованием средств и методов радифотоники. Вот только упомяну ещё одну позицию...

---

***Слайд № 21 - радиотонный АЦП***

- Это - радиотонные АЦП, которые позволят проводить прямую оцифровку СВЧ сигналов с частотами до 100 ГГц и выше. Это - ***сверхзадача отечественной радиотоники***. И решать её надо - через 10-15 лет обладание такими АЦП станет столь же актуальным, как обладание атомной бомбой на рубеже 40-50-х годов прошлого века.

---

***Слайд № 22 - радиотонный - это ключевой элемент всех радиотонных АЦП.***

- Однако, всё это хоть и светлое а точнее, инфракрасное - но всё же будущее. А в настоящем нам надо было разобраться в самых элементарных вещах.

- И прежде всего, надо было разобраться с тем, что является неотъемлемой составной частью и “элементарной ячейкой” всех без исключения перечисленных выше радиотонных аналоговых процессоров, а именно - с радиотонным трактом.

---

***Слайд № 23 - схема структурная радиотонного тракта***

- В самой простейшей - “базовой” - комплектации радиотонный тракт содержит:

- модуль электрооптического преобразования (МЭП),
- опто-волоконный тракт (ОВТ),
- и модуль опто-электронного преобразования (МОП).

- В МЭП осуществляется модуляция оптического сигнала входным высокочастотным электрическим сигналом.

- ОВТ выполняют функцию канализирующего устройства, по которому модулированный оптический сигнала с выхода МЭП поступает на вход МОП.

---

- В МЭП осуществляется демодуляция оптического сигнала с выделением на выходе МЭП высокочастотного электрического сигнала, максимально тождественного входному электрическому сигналу.

- И вот мы - для начала - поставили себе такую цель - научиться рассчитывать коэффициент передачи простейшего радифотонного тракта - от “электрического” входа - до “электрического” выхода.

- Сразу хочу сказать, что, сочиняя представленную в данном докладе методику расчета коэффициента передачи РФТ, мы, скорее всего, занимались *изобретением велосипеда*. Но эти сочинения были обусловлены объективными причинами, так как мы не смогли найти простой инженерной методики расчёта коэффициента передачи РФТ ни в Интернете, ни в печатных изданиях.

---

#### **Слайд № 24 - tribute**

- И сразу хочу выразить благодарность сотрудникам тех организаций, которые нам помогли во всём этом разобраться и терпеливо и доброжелательно отвечали на наши дилетантские - и иногда, откровенно идиотские - вопросы.

---

#### **Слайд № 25 - МЭП**

- Но вернёмся к нашему радифотонному тракту и рассмотрим возможную номенклатуру компонентной базы, которая может использоваться для реализации элементов радифотонного тракта.

- В МЭП может осуществляться либо *прямая* модуляция оптического сигнала, либо *внешняя*. При реализации прямой модуляции используются т.н. лазерные диоды с прямой модуляцией, при реализации внешней модуляции - используются *отдельные* источники оптического сигнала и *отдельные* электрооптические модуляторы. Для экономии времени не буду вдаваться в подробности - и сразу скажу, что для сверхширокополосных аналоговых радифотонных трактов СВЧ больше подходит *внешняя* модуляция.

---

**Слайд № 26 - Типы электро-оптических модуляторов**

- Электро-оптические модуляторы могут быть реализованы либо в виде т.н. *электро-поглощающих модуляторов*, в которых используется эффект Келдыша-Франца, либо в виде *модуляторов интерференционного типа* - как правило, в виде *модуляторов Маха-Цандера*, в которых используется *эффект Поккельса*. Опять же для экономии времени не буду вдаваться в подробности - и сразу скажу, что для сверхширокополосных аналоговых радиофотонных трактов больше подходят модуляторы Маха-Цандера.

---

**Слайд № 27 - пластина ММЦ**

- Эти модуляторы в настоящий момент могут быть реализованы в виде планарных интегральных схем на пластинах из сегнетоэлектриков, полупроводников и даже электро-оптических полимеров. На данном слайде схемотехнически изображена планарная интегральная схема модулятора Маха-Цандера на пластине из ниобата лития.

---

**Слайд № 28 - ГИС ММЦ**

- Такие пластины могут быть упакованы в герметичные корпуса с оптическими и электрическими коаксиальными входами-выходами - в виде гибридной интегральной схемы.

---

**Слайд № 29 - лазеры**

- По такой же технологии могут быть реализованы полупроводниковые или волоконные лазеры.

---



---

***Слайд № 30 - НЧ фотодиод***

- Что касается модулей опто-электронного преобразования - то они, фактически, представляют из себя - фотодетекторы, ключевым элементом которых является полупроводниковый фотодиод. В отличие от НЧ-фотодиодов, высокочастотные фотодиоды, как правило, в “чистом” виде на рынок не поставляются.

---

***Слайд № 31 - ГИС фотодетектора с полосковым выходом***

- На рынок поставляются гибридные интегральные схемы (ГИС) фотодетекторов - либо с полосковыми выводами....

---

***Слайд № 32 - ГИС фотодетектора с коаксиальным выходом***

- либо в виде герметизированных ГИС.

---

***Слайд № 33 - опто-волоконный тракт***

- а в качестве опто-волоконного тракта используются всем хорошо известные волоконно-оптические кабели с одномодовыми волокнами и коннекторами - к сожалению. Почему к сожалению - будет показано ниже.

---

***Слайд № 34 - Укрупнённая схема РФТ***

- Таким образом - радифотонный тракт в минимальной комплектации выглядит так, как это показано на данном слайде. При разработке методики расчёта параметров такого радио-фотонного тракта мы пошли от физических основ работы модулятора Маха-Цандера.

---

---

***Слайд № 35 - формирование канала***

- Реализация таких модуляторов в виде интегральных планарных схем стала возможной только после того, как где-то во второй половине 70-х годов прошлого века научились делать планарные оптические каналы. Сейчас такие каналы умеют делать и в сегнетоэлектриках, и полупроводниках, и в электро-оптических полимерах. На данном слайде показано, как можно реализовать планарный оптический канал в ниобате лития - методом вжигания (диффузии титана).

---

***Слайд № 36 - структура световодных каналов ММЦ***

- Используя эту же технологию - можно реализовать и более сложные оптические топологии - например, структуру световодных каналов модулятора Маха-Цандера.

---

***Слайд № 37 - эффект Поккельса***

- Как было сказано выше, в этих модуляторах используется ***эффект Поккельса***. Суть этого эффекта иллюстрируется на данном слайде. Если создать электрическое поле, линии напряжённости которого будут ортогональны продольной оси оптического канала - то при одной полярности поля коэффициент преломления канала будет уменьшаться (а скорость оптической волны в этом канале - увеличиваться), а при другой полярности - наоборот, коэффициент преломления будет увеличиваться, а скорость - уменьшаться.

---

***Слайд № 38 - схематическая топология ММЦ***

- Технически это может быть реализовано следующим образом - в самом упрощённом виде - вдоль одного из параллельных световодных каналов - на поверхности пластины - формируются управляющие электроды. На эти электроды и подаётся управляющее напряжение  $U_{\text{эл}}$ , которое, в свою очередь, формирует управляющее электрическое поле.

И если оба оптических плеча модулятора идентичны, а  $U_{\text{Эул}} = 0$ , то сигналы в выходном Y-световителе суммируются в фазе ( $\Delta\phi = 0$ ) и мы имеем на выходе модулятора максимальную мощность оптического сигнала. А если  $U_{\text{Эул}} \neq 0$ , то скорость оптической волны в “нижнем” канале становится больше или меньше скорости оптической волны в “верхнем” канале, что приводит к увеличению абсолютного значения  $\Delta\phi$ , и как следствие...

---

### **Слайд № 39 - векторные диаграммы**

- сложению сигналов в выходном Y-световителе “не в фазе” - и как следствие - к уменьшению уровня мощности оптического сигнала на выходе модулятора Маха-Цандера. Таким образом, изменяя величину  $U_{\text{Эул}}$  - мы можем изменять уровень мощности оптического сигнала на выходе модулятора Маха-Цандера - или другими словами, осуществлять модуляцию оптического сигнала. Правда, как видно из этого слайда - в качестве бесплатного “приложения” - мы здесь получаем ещё и *фазовую модуляцию*.

---

### **Слайд № 40 - зависимость $\Delta\phi$ от $U_{\text{Эул}}$**

- Так как эффект Поккельса явление линейное, то зависимость фазового сдвига  $\Delta\phi$  от управляющего напряжения выглядит так, как показано на данном графике. Здесь надо обратить внимание на те значения управляющего напряжения, при которых  $\Delta\phi = +180^\circ$  или  $-180^\circ$ . Такие значения  $U_{\text{Эул}}$  называются **полувольтными напряжениями  $U_{\text{п}}$** . Это один из ключевых параметров модулятора Маха-Цандера. На рынке, как правило, предлагаются модуляторы с полувольтными напряжениями в диапазоне от 3.5 до 6-ти Вольт.

---

---

***Слайд № 41 -  $U_{оп.2}'$***

- Пользуясь приёмами элементарной геометрии можно показать, что зависимость амплитуды оптического сигнала на выходе “идеального” - без потерь в оптическом тракте - модулятора ( $U_{оп.2}'$ ) выглядит так .....

---

***Слайд № 42 -  $K_{и.ммц}'$  и  $K_{р.ммц}'$***

- А коэффициенты передачи по напряжению и по мощности -  $K_{и.ммц}'$  и  $K_{р.ммц}'$  - так....

---

***Слайд № 43 - зависимость  $K_{р.ммц}'$  от  $U_{эул}$***

- Графически зависимость коэффициента передачи по мощности “идеального” модулятора от управляющего напряжения - выглядит так. Фактически - эта кривулина является модуляционной характеристикой “идеального” модулятора Маха-Цандера. И что характерно - сплошь и рядом встречается в интернете во всевозможных пособиях, ВУЗовских курсах и методичках - причём во многих из них - она явно выдернута из какого-то одного источника - и явно с помощью Print Screen. Ну да бог судья этим авторам...

---

***Слайд № 44 - зависимость  $P_{оп.2}'$  от  $U_{эул}$***

- А зависимость мощности оптического сигнала на выходе “идеального” модулятора от  $U_{эул}$  выглядит так...

---

---

***Слайд № 45 - модуляция входным сигналом без смещения***

- Посмотрим - какая временная развёртка мощности оптического сигнала на выходе “идеального” модулятора получится, если мы подадим на управляющие электроды гармонический сигнал с периодом  $T_{\text{мод}}$ . А она получится такой. Из этого графика видно, что период развёртки промодулированного оптического сигнала  $T_{\text{оп}}$  в два раза меньше чем период модулирующего сигнала  $T_{\text{мод}}$ . Таким образом, в данном случае мы имеем дело с **умножением частоты** - причём весьма эффективным. Вот вам ещё одна ипостась радиофотонного тракта СВЧ – **сверхширокополосный умножитель частоты**. Но если мы хотим передать аналоговый сигнал без искажений - то надо с этим умножением как-то бороться.

---

***Слайд № 46 - схема подачи напряжения смещения***

- И самый очевидный способ борьбы - сдвиг рабочей точки в другое место. Этот сдвиг можно осуществить, например, при помощи внешней цепи смещения.

---

***Слайд № 47 - схема с внутренней цепью смещения***

Но на рынке предлагаются модуляторы и с собственными - внутренними цепями смещения - в виде ещё одной пары управляющих электродов.

---

***Слайд № 48 - схема с внутренней цепью смещения***

А в модуляторах, которые реализованы на электрооптических полимерах, и в которых наряду с электро-оптическим эффектом проявляется термооптический эффект - для установки рабочей точки могут использоваться термоэлектрические нагреватели.

---

---

***Слайд № 49 - модуляция входным сигналом со смещением***

- Очевидно, что рабочую точку надо выводить в точку перегиба модуляционной характеристики, где и крутизна самая высокая, и линейность самая приличная. Очевидно, что рабочая точка окажется в точке перегиба при  $U_{см} = +U\pi/2$  или  $-U\pi/2$ . На данном слайде проиллюстрирован процесс модуляции в рабочей точке  $+U\pi/2$ . Из графика “в” видно, что в данном случае период развёртки  $T_{оп}$  равен периоду модулирующего сигнала  $T_{мод}$ .

Ну а дальше пойдут одни формулы.

---

***Слайд № 50 - формулы для определения  $R_{оп.2'.макс}$ ,  $R_{оп.2'.мин}$ ,  $R_{оп.2'.макс}$ ,  $R_{оп.2'.мин}$ .***

Сначала определяем значения  $R_{оп.2'.макс}$  и  $R_{оп.2'.мин}$  по “верхним” двум формулам. А далее - по “нижним” двум формулам - определяем реальные значения  $R_{оп.2.макс}$  и  $R_{оп.2.мин}$  - с учётом реальных потерь -  $K_{з.ммц}$  - в оптическом тракте модулятора. В сегнетоэлектрических модуляторах эти потери составляют 5-6 дБ, в модуляторах на электрооптических полимерах - до 8-9 дБ. По полупроводниковым - такой статистики у меня пока нет.

---

***Слайд № 51 - формулы для определения  $R_{оп.3.макс}$  и  $R_{оп.3.мин}$ .***

- Далее определяем максимальные и минимальные значения временной развёртки модулированного оптического сигнала на входе фотодетектора с учётом реальных потерь в оптоволоконном тракте -  $K_{з.овт}$ . Необходимо отметить, что в волокне потерь практически нет. Поэтому, потери в ОВТ “вылазят” практически только на стыках коннекторов. Как показывает практика - на двух стыках можно потерять до 3 дБ. Вот почему наличие коннекторов выше было *упомянуто с сожалением*.

---

---

***Слайд № 52 - формулы для определения  $I_{ф.макс}$  и  $I_{ф.мин}$ ,  $U_{фд.макс}$  и  $U_{фд.мин}$***

- Далее по “верхним” двум формулам определяем максимальное и минимальное значение временной развёртки наведённого в фотодетекторе фототока:  $I_{ф.макс}$  и  $I_{ф.мин}$ . В данных формулах используется один из ключевых параметров фотодетектора - фоточувствительность  $Пф$ . Типичное значение  $Пф$  для сверхширокополосных СВЧ фотодетекторов составляет около 0.6 А / Вт.

- Далее - по “нижним” двум формулам определяем максимальные и минимальные значения временной развёртки наведённого в нагрузке фотодетектора напряжения:  $U_{фд.макс}$  и  $U_{фд.мин}$ . И тут надо пояснить - почему мы умножаем не на 50 Ом, а на 25 Ом.

---

***Слайд № 53 - схема фотодетектора***

- Сначала мы - особо не задумываясь - начали умножать на 50 Ом, так как в СВЧ нагрузке фотодетектора стоит резистор с сопротивлением 50 Ом. Вот этот - R2. Но результаты расчётов, при этом, очень сильно “отваливались” от результатов измерений. Почему-то мы сразу не допёрли, что параллельно к этой нагрузке подключается коаксиальный тракт с волновым сопротивлением 50 Ом. И потому реальное сопротивление нагрузки, через которую протекает наведённый ток фотодетектора составляет не 50, а 25 Ом.

---

***Слайд № 54 -  $U_{свч.вых}$  и  $K_{р.свч.}$***

- Ну далее определяем амплитуду выходного сигнала СВЧ -  $U_{свч.вых}$ , а потом - и искомый коэффициент передачи РФТ -  $K_{р.свч.}$ .

- Используя эту методику были насчитаны семейства зависимостей  $K_{р.свч.}$  от  $U_{п}$  .....

---

---

**Слайд № 55 - при различных уровнях затухания в оптических трактах модулятора - Кз.мми,**

---

**Слайд № 56 - при различных значениях фоточувствительности фотодетектора - ПФ**

---

**Слайд № 57 - при различных значениях мощности оптического сигнала на входе модулятора - Роп.1.**

- На данном слайде необходимо акцентировать внимание на следующем - при полуволновых напряжениях ниже 1 В и при мощности оптического сигнала около 200 мВт - коэффициент передачи радифотонного тракта может иметь положительное значение. Или - другими словами - радифотонный тракт **может превратиться в сверхширокополосный усилитель СВЧ.**

- По приведённым результатам расчётов можно сделать следующий вывод: коэффициент передачи радифотонного тракта

- **прямопропорционален** фоточувствительности фотодетектора и мощности источника оптического сигнала

- **и обратнопропорционален** величинам полуволнового напряжения и потерь в оптическом тракте модулятора Маха-Цандера.

- Если мы будем собирать радифотонные тракты из того, что теоретически можно купить в “магазине”

- источники оптических сигналов на основе полупроводниковых лазерных диодов мощностью 20 мВт;

- модуляторы Маха-Цандера, с полуволновыми напряжениями порядка 5В, потерями в оптических трактах порядка 5.5В и диапазонами рабочих частот до 35 ГГц,

- и фотодетекторы с уровнем фоточувствительности порядка 0.6 А/Вт, то получим потери порядка 35 дБ, что не радует.



---

Но мы располагаем информацией о том, что уже получены экспериментальные образцы ММЦ с полуволновыми напряжениями порядка 0.5 В и диапазонами рабочих частот до 300 ГГц.

Понятно, что до сих пор речь шла об импортной элементной базе.

А что есть у нас - своего, родного.

В прошлом году, по заказу нашего предприятия в Питерском Физтехе были разработаны и изготовлены первые отечественные образцы планарных интегральных схем модулятора Маха-Цандера на платах из ниобата лития с полуволновым напряжением около 6 В и диапазоном рабочих частот примерно до 6 ГГц.

Так что у нас есть куда стремиться.

И самое главное - есть широкое поле деятельности для отечественных инженеров и учёных где госпремии под ногами валяются.

---

***Слайд № 58 - у меня всё - спасибо за внимание.***