

---

### **- Слайд №1**

- Добрый день, уважаемые коллеги!
  - Я хочу рассказать о некоторых, проблемах, с которыми мы столкнулись при выполнении одной из наших ОКР.
- 

### **- Слайд №2**

- В рамках данной ОКР, в частности, предстояло разработать несколько аналоговых волоконно-оптических линий связи - ВОЛС - диапазона СВЧ.
- 

### **- Слайд №3**

Данный доклад посвящён решению некоторых частных проблем, связанных с расчётом параметров аналоговых ВОЛС СВЧ по параметрам тех комплектующих элементов, из которых такие ВОЛС состоят, а так же определению требований к параметрам комплектующих элементов и определению оптимальных энергетических режимов эксплуатации этих элементов, при которых аналоговые ВОЛС СВЧ будут иметь **положительные (!!!)** коэффициенты передачи.

---

### **- Слайд №4**

Или другими словами - нам хотелось выяснить - при каких условиях аналоговая ВОЛС СВЧ может выполнять функцию **СВЧ усилителя (!!!)**.

---

### **- Слайд №5**

Сразу хочу выразить нашу благодарность сотрудникам и студентам  
- Санкт-Петербургского Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе,  
- Пермской Научно-Производственной Приборостроительной Компании,  
- Пермского Государственного Национального Исследовательского Университета,  
- и Омского Государственного Университета им. Ф.М. Достоевского  
за профессиональные консультации в области оптики, фотоники и физики твёрдого тела.

---

### **- Слайд №6**

Так как данная тематика для большей части уважаемой аудитории, почти наверняка, является абсолютно новой, то будет целесообразно рассказать об устройстве аналоговых ВОЛС СВЧ.

Любая аналоговая ВОЛС СВЧ состоит из следующих составных частей:

- модуля электро-оптического преобразования (МЭП), в котором осуществляется, как правило, амплитудная модуляция оптического сигнала входным сигналом СВЧ;
  - модуля опто-электронного преобразования (МОП), в котором осуществляется детектирование, как правило, амплитудно модулированного сигнала;
  - и волоконно-оптического тракта ( ВОТ ).
- 

### **- Слайд №7**

В МЭП, как правило, используется либо прямая модуляция, либо внешняя модуляция. Для реализации прямой модуляции **( фрагмент А )** модулирующий СВЧ сигнал подаётся непосредственно на кристалл лазерного диода СВЧ - в данном случае, источника амплитудно-модулированного оптического излучения. Внешняя модуляция **( фрагмент Б )** осуществляется в специальном устройстве - электро-оптическом модуляторе, на входы которого поступают оптический сигнал от лазерного диода и модулирующий СВЧ сигнал, а на выходе формируется, как правило, амплитудно-модулированный оптический сигнал.

---

### **- Слайд №8**

Такие “внешние” электро-оптические модуляторы, как правило, реализуются либо в виде электропоглощающих модуляторов, работающих на эффекте Келдыша-Франца, либо в виде интерферометров Маха-Цандера, работающих на эффекте Поккельса. Последние принято называть - модуляторами Маха-Цандера.

Все перечисленные выше способы модуляции, а также способы реализации электрооптических модуляторов имеют свои достоинства и недостатки. Нами был проведён широкий информационный поиск по данной тематике. Для изложения результатов этого поиска и последующего анализа

полученной информации потребовалось бы сделать не менее десятка докладов по оптике, фотонике, физике твёрдого тела, а так же по системным, схемотехническим, конструкторским и технологическим вопросам из области проектирования аналоговых ВОЛС СВЧ - т.е. по всему тому, что имеет отношение .....

---

**- Слайд №9 - MWP**

*к одной из новейших и бурно развивающихся отраслей науки и техники, которую за рубежом называют **микроволновой фотоникой**, а у нас она может называться **радиофотоникой**, **радиооптикой**, **волноводной фотоникой** и т.п.*

---

**- Слайд №10**

- С некоторыми из этих докладов можно ознакомиться на сайте Омского научного семинара «Современные проблемы радиофизики и радиотехники», проводимого кафедрой экспериментальной физики и радиофизики Омского государственного Университета им. Ф.М. Достоевского. Поэтому, для экономии времени, я, не вдаваясь в подробности, сразу сообщаю, что мы остановились на внешней модуляции и модуляторах Маха-Цандера.

---

**- Слайд №11**

Сейчас эти модуляторы реализуются в виде планарных интегральных схем, реализованных на пластинах сегнетоэлектриков - на ниобате лития, как правило. Эти пластины помещаются в защитные герметичные металлические корпуса.

---

**- Слайд №12**

В результате получается гибридная интегральная схема с оптическими входами-выходами и коаксиальным СВЧ входом.

Таким образом, в настоящий момент на рынке предлагаются модуляторы Маха-Цандера, которые реализованы с использованием технологии “система-в-корпусе”.

---

**- Слайд №13**

С использованием этой же технологии реализовано подавляющее большинство маломощных - с выходной мощностью 10-30 мВт - полупроводниковых лазерных источников оптического излучения.

---

**- Слайд №14**

Функцию опто-электронного преобразования выполняют фотодетекторы, которые могут быть реализованы либо в виде бескорпусных монолитных интегральных схем, либо ....

---

**- Слайд №15**

в виде планарной гибридной интегральной схемы, либо ...

---

**- Слайд №16**

в виде герметизируемых гибридных интегральных схем с оптическими входами и коаксиальными СВЧ выходами.

Обе последние конструкции реализованы с использованием уже упоминавшейся технологии “система-в-корпусе”.

---

**- Слайд №17**

В качестве оптоволоконного тракта аналоговых ВОЛС СВЧ могут использоваться простейшие “коммерческие” одномодовые волокна типа SMF-28. На концы этих волокон устанавливаются элементы оптических разъёмов - коннекторы. Такие же коннекторы, как правило, установлены на всех оптических входах-выходах предлагаемых на рынке лазеров, электро-оптических модуляторов и фото-детекторов. Таким образом, в настоящий момент, без особых проблем, **используя примитивные технологии**, можно смонтировать аналоговую ВОЛС СВЧ из имеющихся на рынке лазеров, электрооптических модуляторов и фотодетекторов, а также оптоволоконных кабелей, изготовление которых можно заказать в ближайшей компании, которая занимается прокладкой оптической телефонных сетей.

Остаётся только научиться рассчитывать параметры таких ВОЛС, и в частности - коэффициент передачи.

---

#### **- Слайд №18**

Поэтому, вернёмся к типичной структурной схеме аналоговой ВОЛС СВЧ. В данном случае, оптический сигнал (  $U_{оп.1}$  ) от лазерного диода ( ЛД ) модулируется в модуляторе Маха-Цандера ( ММЦ ) сигналом СВЧ (  $U_{свч.вх}$  ). Амплитудно-модулированный сигнал с оптического выхода модулятора Маха-Цандера (  $U_{опт.2}$  ) через оптоволоконный кабель ( ОВК ) поступает на фотодетектор ( ФД ) с амплитудой  $U_{оп.3}$ . Выделенный в фотодетекторе сигнал СВЧ (  $U_{свч.вых}$  ) снимается с СВЧ выхода фотодетектора. **В данном случае, нам предстоит рассчитать коэффициент передачи тракта от СВЧ входа модулятора Маха-Цандера до СВЧ выхода фотодетектора.**

Методики инженерного расчёта такого коэффициента передачи в литературе найти не удалось. Поэтому, мы вынуждены были пойти буквально “от физики ” и благодаря консультациям коллег “вышли” на представляемую здесь методику.

Для начала рассмотрим устройство и основные параметры модулятора Маха-Цандера.

Реализация планарных оптических интегральных схем стала возможна после того, как где-то в середине 70-х годов прошлого века научились делать планарные световодные каналы, которые обладали относительно малыми потерями и более-менее приличными канализирующими свойствами.

---

#### **- Слайд №19**

На данном слайде схематично приведена технология формирования такого световодного канала. Сначала, на поверхности пластины из ниобата лития методами стандартной тонкоплёночной технологии формируется металлическая полоска, например, из титана. Далее пластина с такой полоской помещается в печь, где происходит вжигание титана в ниобат лития. В результате этого вжигания, в приповерхностном слое, образуется область с изменёнными физическими свойствами, в которой коэффициент преломления отличается от коэффициента преломления ниобата лития и создаются условия для канализации оптического сигнала - такие же, как и в обычном оптическом волокне.

---

#### **- Слайд №20**

Аналогичным способом может быть сформирована и более сложная оптическая структура - например, структура световодных каналов модулятора Маха-Цандера. В состав этой структуры входят следующие элементы:

- входной световодный канал ( поз. 1 );
- входной Y - разветвитель ( поз. 2 );
- параллельные идентичные световодные каналы ( поз. 3, 4 );
- выходной Y - светвитель ( поз. 5 );
- выходной СК ( поз. 6 ).

Если проводить аналогии с СВЧ техникой, то Y-светвители-разветвители выполняют такие же функции, как синфазные делители мощности СВЧ сигналов.

Рассмотрим, как в такой структуре можно осуществить амплитудную модуляцию входного оптического сигнала (  $U_{оп.1}$  ).

Управляющее воздействие электрического сигнала СВЧ (  $U_{свч.вх}$  ) в таких модуляторах осуществляется за счёт одного из электро-оптических эффектов - **эффекта Поккельса**.

Этот эффект проявляется следующим образом.

---

#### **- Слайд №21**

Если создать электрическое поле, линии напряжённости которого будут перпендикулярны световодному каналу, реализованному в сегнетоэлектрике, то скорость распространения оптической волны (  $V_{ов}$  ) в данном световодном канале изменится, причём при одной полярности поля ( рис. а )  $V_{ов}$  будет увеличиваться, а при другой ( рис. б ) - будет уменьшаться. Величина изменения  $V_{ов}$  будет прямо пропорциональна модулю напряжённости электрического поля  $|E|$ . Это электрическое поле далее будем **называть управляющим электрическим полем**.

**Каким образом можно создать такое управляющее электрическое поле?**

---

### - Слайд №22

В простейших ММЦ вдоль одного из идентичных каналов оптической структуры формируются проводящие площадки. И подавая на эти контактные площадки напряжение (  $U_{kp}$  ), мы создаём электрическое поле, линии напряжённости которого будут перпендикулярны световодному каналу.

Очевидно, что величина напряжённости этого управляющего электрического поля  $|E|$  будет прямо пропорциональна напряжению  $U_{kp}$ . Поэтому, изменяя  $U_{kp}$ , мы можем изменять скорость распространения световой волны  $V_{оп}$  в световодном канале.

**Каким образом будет влиять изменение  $U_{kp}$  на амплитуду оптической волны на выходе такого модулятора**

---

### - Слайд №23

Если  $U_{kp} = 0$ , то входная оптическая волна с амплитудой  $U_{оп.вх}$  ( в идеальном случае ) строго синфазно и строго “равноамплитудно” делится на две волны с одинаковыми амплитудами  $U_1$  и  $U_2$ , которые с одинаковой скоростью (  $V_{оп.1} = V_{оп.2}$  ) проходят идентичные световодные каналы, и как следствие, с равными фазами (  $\phi_1 = \phi_2$  ) синфазно суммируются в выходном Y-световителе. В этом случае, на выходе ММЦ мы получаем максимально возможную амплитуду выходной оптической волны  $U_{оп.вых}$ , причём, в случае отсутствия потерь в световодных каналах  $U_{опт.вых} = U_{опт.вх}$ .

Если  $U_{kp} \neq 0$ , то  $V_{оп.2}$  будет либо выше, либо ниже  $V_{оп.1}$ , и как следствие, суммирование волн в выходном Y-световителе будет происходить уже не синфазно,

---

### - Слайд №24

причём по мере увеличения  $U_{kp}$  эта несинфазность (  $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$  ) будет всё больше нарастать, а уровень  $U_{оп.вых}$  будет снижаться.

Определимся с зависимостью  $\Delta\phi$  от  $U_{оп}$ . Из теории известно, что эта зависимость прямопропорциональна и линейна. Предположим, что при положительных  $U_{оп}$  и  $\Delta\phi$  положительна, а при отрицательных  $U_{оп}$  - отрицательна.

---

### - Слайд №25

Поэтому, в нашем случае, график зависимости  $\Delta\phi$  от  $U_{оп}$  будет выглядеть так. На данном графике, можно выделить 2 очень важных реперных точки:

- $U_{kp}$ , при котором  $\Delta\phi = 180^\circ$ ,
- $U_{kp}$ , при котором  $\Delta\phi = -180^\circ$ .

Эти напряжения, называются **полувольтными напряжениями** и обозначаются  **$U_{п}$** . При этих напряжениях, оптические волны на выходе ММЦ складываются в противофазе и подавляют друг друга (  $U_{оп.вых} = 0$  ).  $U_{п}$  является одной из основных электрических характеристик ММЦ

---

### - Слайд №26

Здесь приведены векторные диаграммы при различных  $U_{kp}$ , выраженных в долях  **$U_{п}$** . Из этих диаграмм видно, что кроме амплитудной модуляции, в качестве “бесплатного” приложения, мы получаем ещё и фазовую модуляцию ( $\phi_m$  от  $U_{kp}$ ), которая в данном случае является паразитной. Но в большинство современных цифровые ВОЛС как раз и используется фазовая модуляция - точнее, манипуляция.

---

### - Слайд №27

Выведем зависимость  $U_{оп.вых}$  от  $U_{kp}$  и коэффициент передачи по напряжению по оптическому каналу модулятора Маха-Цандера (  $K_{и.оп} = U_{оп.вых}/U_{оп.вх}$  ) от  $U_{kp}$ . Используя элементарные геометрические законы: взаимосвязь длин гипотенузы и сторон прямоугольного треугольника через тригонометрические функции и теорему Пифагора можно вывести такую формулу.

Но для проведения дальнейших расчётов нас интересует не коэффициент передачи по амплитуде оптического сигнала - а по мощности. Последнее обусловлено тем, что фототок фотодетектора пропорционален не амплитуде, а мощности оптического сигнала. Поэтому нам надо сделать ещё один шаг и трансформировать формулу для расчёта зависимости коэффициента передачи по напряжению оптического сигнала (  $K_{и.оп}$  ) от  $U_{kp}$  в формулу для расчёта зависимости коэффициента передачи по мощности оптического сигнала (  $K_{р.оп}$  ) от  $U_{kp}$  так, как показано на этом слайде.

---

**- Слайд №28**

Но в данной формуле не учтены потери в модуляторе Маха-Цандера - Кз.ммц,

---

**- Слайд №29**

а реальные потери в оптическом тракте модулятора могут достигать 7 и более дБ, и значит, должны учитываться. Поэтому, предыдущая формула должна быть подкорректирована,

---

**- Слайд №30**

а уровень Роп.2 следует вычислять по этой формуле,

---

**- Слайд №31**

а графически это выглядит так.

---

**- Слайд №32**

Рассмотрим, что произойдёт, если мы подадим на контактные площадки

---

**- Слайд №33**

переменное  $U_{kp}$  с амплитудой, равной  $U_{\pi}$ . Мы получим ...

---

**- Слайд №34**

следующую картину по временной развёртке мощности оптического сигнала на выходе модулятора Маха-Цандера. Из этого графика видно, что, наряду с дикими искажениями, можно отметить, что период огибающей выходного оптического сигнала  $T_{ог}$  оказался в два раза меньше периода модулирующего сигнала  $T_{мод}$ . Если бы нам было нужно реализовать умножитель частоты на 2, то мы были бы в восторге, но так как мы этой цели не преследуем - придётся принимать меры, чтобы ликвидировать это паразитное умножение частоты.

Очевидно, что это можно сделать только одним способом - подавая на контактные площадки некоторое напряжение смещения. Это можно сделать разными способами. Это можно сделать, например, так...

---

**- Слайд №35**

используя DC-блок, состоящий из емкостей  $C1$  и  $C2$  и индуктивностей  $L1$  и  $L2$ .

Определимся с оптимальной величиной этого напряжения смещения ( $U_{см}$ ). Очевидно, что  $U_{см}$  должно быть равно  $U_{\pi}/2$ , ...

---

**- Слайд №36**

в окрестностях которой наша зависимость Роп.2 от  $U_{kp}$ , во первых имеет максимальную крутизну ( $f_{макс}$ ), и во-вторых - при малых амплитудах модулирующего сигнала СВЧ - мы будем иметь минимальные нелинейные искажения.

Но в этом случае мы ещё раз должны подкорректировать формулу зависимости Роп.2 от напряжения на контактных площадках.

---

**- Слайд №37**

Ну и переходим к предлагаемой методике расчёта.

---

**- Слайд №38**

Сначала, по временной развёртке входного модулирующего сигнала с амплитудой  $U_{свч.вх}$  строим временные развёртки мощности оптического сигнала и определяем максимальные и минимальные значения последней: Роп.2.макс и Роп.2.мин.

Далее строим временные развёртки...

---

**- Слайд №39**

мощности оптического сигнала на входе фотодетектора Роп.3.

По идее, временные развёртки мощности оптических сигналов на выходе модулятора Роп.2 и входе фотодетектора Роп.3 не должны как-то особо отличаться друга, так как потери в оптоволокне



SMF-28 составляют около 0.3 дБ на километр. Однако, у нас предполагается использовать механические сочленения в оптическом тракте, а это может “съесть” до 3 дБ. Поэтому,  $R_{оп.3} = R_{оп.2/2}$ , и значит -

---

**- Слайд №40**

амплитуда огибающей на входе фотодетектора будет в два раза меньше амплитуды огибающей на выходе модулятора.

---

**- Слайд №41**

Далее, используя значение фоточувствительности фотодетектора  $P_f$ , которая имеет размерность А/Вт и значение которой приводится в datasheet, пересчитываем значения мощности на входе фотодетектора  $R_{оп.3}$  в наведённый ток фотодетектора  $I_f$  и строим временную развёртку  $I_f$ .

---

**- Слайд №42**

Далее, пересчитываем  $I_f$  в выходное напряжение фотодетектора  $U_f$ , предполагая, что  $I_f$  протекает через нагрузку сопротивлением 50 Ом, и строим временную развёртку  $U_f$ .

---

**- Слайд №43**

Далее, “удаляем” из временной развёртки  $U_f$  постоянную составляющую  $U_{ф.пс}$  - эту функцию выполняет выходной разделительный конденсатор фотодетектора - и получаем временную развёртку выходного сигнала СВЧ -  $U_{свч.вых.}$ . Определяем значение амплитуды  $U_{свч.вых.}$ .

---

**- Слайд №44**

Вычисляем  $K_{п.свч.}$ .

Пользуясь этой методикой мы насчитали несколько семейств кривых зависимостей  $K_{п.свч.}$  от  $U_{л.}$  при различных значениях мощности оптического сигнала лазера ...

---

**- Слайд №45**

при различных значениях коэффициента затухания в оптическом канале модулятора  $K_{з.ммц}$  ----

---

**- Слайд №46**

при различных значениях фоточувствительности фотодетектора  $P_f$  ...

---

**- Слайд №47**

Из этих картинок видно, что  $K_{п.свч.}$

- прямопропорционален  $R_{оп.свч.}$ ,
- обратнопропорционален  $K_{з.ммц}$ ,
- прямопропорционален  $P_f$ ,
- и обратно пропорционален  $U_{л.}$ .

Но тут надо осознавать, что невозможно до бесконечности поднимать уровень  $R_{оп.1}$ , так как примерно при  $R_{оп.1} \approx 100$  мВт появляются проблемы в световодных каналах модулятора. Ещё раньше, где-то при  $R_{оп.3} \approx 30$  мВт ( при типичном уровне  $K_{з.ммц}$  ) войдёт в ограничение среднестатистический широкополосный фотодетектор СВЧ. Так же, очень сложно изготовить широкополосный фотодетектор СВЧ с фоточувствительностью выше 0.8-1.0 А/Вт. Поэтому, у нас остаётся только два реальных способа поднять  $K_{п.свч.}$ : уменьшать потери в оптическом тракте модулятора и снижать  $U_{л.}$ . Но и здесь есть противоречие. Как правило, если речь идёт о кристаллических модуляторах Маха-Цандера снижение  $U_{л.}$  достигается за счёт увеличения длины оптического тракта модулятора, и как следствие - увеличения коэффициента затухания  $K_{з.ммц}$

---

**- Слайд №48**

Поэтому, в заключение, приведём зависимость  $K_{п.свч.}$  от  $U_{л.}$  при среднестатистических значениях  $R_{оп.1} \approx 30$  мВт,  $K_{з.ммц} \approx 7$  дБ,  $K_{з.овк} \approx 3$  дБ и  $P_f \approx 0.8$  А/Вт. Из этой кривой видно, что  $K_{п.свч.}$  **может быть положительным, или другими словами, аналоговая ВОЛС СВЧ может выполнять функцию усилителя при  $U_{л.} \leq 1$ В**. В настоящий момент **уже существуют** модуляторы Маха - Цандера: с  $U_{л.} \leq 1$ В и диапазоном рабочих частот **до 200 ГГц (!!!)**. **За рубежом, разумеется.**

А что у нас? Сообщаю новости буквально последних дней. В Петербургском Физико-техническом институте по заказу ЦКБА разработан и изготовлен модулятор Маха-Цандера **с  $U \approx 6\text{В}$  и 3-дБ диапазоном рабочих частот порядка 4 ГГц**. Таким образом нам есть к чему стремиться.

И ещё хочется пояснить - зачем нам нужны эти аналоговые ВОЛС с положительными коэффициентами передачи?

-----

**- Слайд №49**

А представьте себе большой корабль ( типа авианосца ) или большого самолёта ( типа Ту-95 или Б-52 ) вся поверхность которых утыкана сверхширокополосными (0.1 - 40 ГГц или 0.1-100 ГГц ) антенными датчиками. И принятые сигналы от этих датчиков необходимо оперативно доставить к мощному центральному вычислительно- аналитическому посту, который находится где-то в недрах корабля или летательного объекта. Ну и как эти сигналы доставить к этому посту - как минимум на 10-ки метров. По коаксиальным кабелям что ли - с уровнем затухания 2дБ/м уже на 40 ГГц. А при наличии сверхширокополосных аналоговых ВОЛС СВЧ с положительными коэффициентами передачи проблемы с транспортировкой СВЧ сигналов, и в том числе сверхширокополосных, на десятки и даже сотни метров практически исчезают. И до этого уже много кто в мире додумался. Например, сотрудники итальянской фирмы Finmeccanica, фрагмент презентации которых **про "полёт на свете"** здесь приведён.

-----

**- Слайд №50 - спасибо за внимание.**

-----