

Микроволновая фотоника - определение оптимальных энергетических режимов эксплуатации аналоговых ВОЛС СВЧ

- Слайд №1

- Добрый день, уважаемые коллеги!

- Я хочу рассказать о некоторых, проблемах, с которыми мы столкнулись при выполнении одной из ОКР, проводимых в ОАО «ЦКБА».

- 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

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, схмотехническим, 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 фотодетекторов. 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. б).

Если проводить аналогии с СВЧ техникой, то Y-световител-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 Погкельса*.

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 ($U_{кп}$), мы создаём электрическое поле, линии напряжённости которого будут перпендикулярны световодному каналу.

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

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

- Слайд №23

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

- Слайд №24

причём по мере увеличения $U_{кп}$ эта несинфазность ($\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$) будет всё больше нарастать, а уровень $U_{оп.вых}$ будет снижаться.

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

- Слайд №25

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

- $U_{кп}$, при котором $\Delta\varphi = 180^\circ$,
- $U_{кп}$, при котором $\Delta\varphi = -180^\circ$.

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

- Слайд №26

Здесь приведены векторные диаграммы при различных $U_{кп}$, выраженных в долях **Уп**. Из этих диаграмм видно, что кроме амплитудной модуляции, в качестве “бесплатного” приложения, мы получаем ещё и фазовую модуляцию (φ_m от $U_{кп}$), 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 $U_{кп}$ и коэффициент передачи по напряжению по оптическому каналу модулятора Маха-Цандера ($K_{и.оп} = U_{оп.вых}/U_{оп.вх}$) от $U_{кп}$. 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 $U_{кп}$ в формулу для расчёта зависимости коэффициента передачи по мощности оптического сигнала ($K_{р.оп}$) от $U_{кп}$ так, как показано на этом слайде.

- Слайд №28

Но в данной формуле не учтены потери в модуляторе Маха-Цандера - $K_{з.ммц}$,

- 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.

*Примечание. В данном случае под **Кз.ммц** следует понимать потери в оптическом тракте модулятора, которые в различных data-sheet могут называться **Optical Insertion Loss (LX8901 фирмы GigOptix, LN05S фирмы Thorlabs), Insertion Loss (2623NA фирмы Lucent) и т.п.***

- Слайд №32

Рассмотрим, что произойдёт, если мы подадим на контактные площадки переменное $U_{кп}$ с амплитудой, равной $U_{л}$. Мы получим ...

- Слайд №33

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 - и тем самым формируя некоторый отличный от нуля фазовый сдвиг $\Delta\varphi$. Это можно сделать разными способами. Это можно сделать, например, так...

- Слайд №34

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

Примечание. В некоторых модуляторах Маха-Цандера для подачи напряжения смещения используется дополнительная пара управляющих электродов. Такой подход к реализации модулятора имеет свои преимущества и свои недостатки, о которых мы здесь для экономии времени говорить не будем. Тем более, что дальнейшие рассуждения верны для любого варианта подачи напряжения смещения или, другими словами, для любого варианта обеспечения

требуемой величины $\Delta\varphi$. Более того, приведённые ниже выкладки верны даже для таких “полимерных” модуляторов, как LX8901, в которых требуемая величина $\Delta\varphi$ устанавливается за счёт не электро-оптического, термо-оптического эффекта. Технически это реализуется за счёт подогрева одного из идентичных (в данном случае - “полимерных”) световодных каналов. Подогрев осуществляется за счёт пропускания постоянного тока через полупроводниковый нагреватель - heater.

Определимся с оптимальной величиной этого напряжения смещения ($U_{см}$). Очевидно, что в рабочей точке $U_{см}$ должно быть равно $U_{\pi/2}$ ($\Delta\varphi = 90^\circ$), ...

- Слайд №35

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

- Слайд №36

Но в этом случае мы ещё раз должны подкорректировать формулу зависимости $P_{оп.2}$ от напряжения на контактных площадках $U_{кп}$.

- Слайд №37

Ну и переходим к предлагаемой методике расчёта.

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: $P_{оп.2.макс}$ и $P_{оп.2.мин}$.

Далее строим временные развёртки...

- Слайд №38

мощности оптического сигнала на входе фотодетектора $P_{оп.3}$.

- Слайд №39

По идее, временные развёртки мощности оптических сигналов на выходе модулятора $P_{оп.2}$ и входе фотодетектора $P_{оп.3}$ не должны как-то особо отличаться друг от 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, $P_{оп.3} = P_{оп.2}/2$, и значит - амплитуда огибающей на входе фотодетектора будет в два раза меньше амплитуды огибающей на выходе модулятора.

- Слайд №40

Далее, используя значение фоточувствительности фотодетектора Пф, которая имеет размерность А/Вт, и значение которой приводится в каждом datasheet на фотодетекторы, пересчитываем значения мощности на входе фотодетектора Роп.3 в наведённый ток фотодетектора Iф и строим временную развёртку Iф.

- Слайд №41

Далее, пересчитываем Iф в выходное напряжение фотодетектора Uф, предполагая, что Iф протекает через нагрузку сопротивлением 25 Ом, и строим временную развёртку Uф. Почему 25 Ом, а не 50 Ом?

- Слайд №42

А потому, что в нагрузке каждого фотодиода СВЧ стоит нагрузка 50 Ом - и к этой нагрузке - в параллель - присоединяется выходной СВЧ тракт с волновым сопротивлением 50

- Слайд №43

Далее, “удаляем” из временной развёртки Uф постоянную составляющую Uф.пс - эту функцию выполняет выходной разделительный конденсатор фотодетектора - и получаем временную развёртку выходного сигнала СВЧ - Uсвч.вых. Определяем значение амплитуды Uсвч.вых.

- Слайд №44

Ну и вычисляем Кр.свч.

Но прежде чем вычислять реальные Кр.свч при различных значениях параметров элементов ВОЛС и различных энергетических режимах этих элементов, необходимо определиться с максимально возможной амплитудой входного модулирующего сигнала СВЧ.

Зачем это нужно? А это нужно потому, что модуляционная характеристика модулятора Маха-Цандера очевидно нелинейная.

- Слайд №45

И так же очевидно, что огибающая промодулированного оптического сигнала никогда не будет “чистой” гармоникой - и даже в том случае, если входной модулирующий сигнал такой “чистой” гармоникой является.

Определим - как будут зависеть уровень нелинейных искажений огибающей промодулированного оптического сигнала на выходе модулятора Маха-Цандера от величины амплитуды входного модулирующего сигнала СВЧ.

Определимся с диапазоном возможных значений Uсвч.вх.

- Слайд №46

Очевидно, что $U_{свч.вх}$ не должна превышать $U\pi/2$, так как в этом случае сразу проявляются “умножительные на два” явления.

- Слайд №47

Если $U_{свч.вх}$ будет равно $U\pi/2$, то форма огибающей будет пусть хоть и отдалённо - напоминать форму модулирующего сигнала.

Поэтому, анализ мы провели в диапазоне от $0.05U\pi/2$ до $U\pi/2$ с шагом $0.05U\pi/2$. На каждом шаге анализа вычислялась форма огибающей, а потом - через Фурье-преобразование определялся её спектр

- Слайд №48

На этом слайде приведены нормированные спектры огибающих при $U_{свч.вх} = U\pi/2$ и $U_{свч.вх} = U\pi/5$. Из этих спектров видно, что при снижении амплитуды входного модулирующего СВЧ, как и ожидалось, гармонизация спектра огибающей стремительно снижается.

- Слайд №49

Мы обработали результаты всех проведённых Фурье-преобразований и сначала построили зависимости составляющих спектра огибающей при различных соотношениях амплитуды входного модулирующего сигнала СВЧ и величины $U\pi$, а потом

- Слайд №50

по данной формуле

- Слайд №51

рассчитали зависимость коэффициента нелинейных искажений от соотношения $U_{свч.вх} / U\pi$

Из этого графика видно, что нелинейные искажения начинают резко возрастать при приближении $U_{свч.вх}$ к $U\pi/2$.

По этой кривой можно определять верхнюю границу динамического диапазона проектируемой ВОЛС, которая будет зависеть от заданной в ТЗ величины нелинейных искажений:

- например, если величина коэффициента нелинейных искажений не должна превышать **2%**, **то $U_{свч.вх}$ не должна превышать $0.2 U\pi$,**

- а если величина коэффициента нелинейных искажений не должна превышать **10 %**, **то $U_{свч.вх}$ не должна превышать $0.45 U\pi$.**

Необходимо отметить, что амплитуда $U_{свч.вх}$ должна быть ещё меньше определённых по данной кривой значений, так как свою долю искажений “досыпит” ещё и фотодетектор - по определению элемент нелинейный. Но расчет нелинейных искажений, который обусловлен

нелинейностью ватт-амперной характеристики фотодетектора выходит за рамки этого доклада. Возможно - об этом мы доложим на следующем семинаре.

На так - рекомендация может быть только одна - $U_{свч.вх}$ должна быть как можно меньше $U_{л}$.

Руководствуясь этим правилом - соотношение $U_{свч.вх}/U_{л}$ не превышало 0.02 - мы рассчитали зависимости $K_{п.свч}$ от $U_{л}$

- Слайд №52

- при различных значениях мощности оптического сигнала лазера ...

- Слайд №53

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

- Слайд №54

- при различных значениях фоточувствительности фотодетектора $Пф$.

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

- **прямо пропорционален $Роп.1$ (слайд №52),**

- **обратно пропорционален $K_{з.ммц}$ (слайд №53),**

- **прямо пропорционален $Пф$ (слайд №54),**

- **и обратно пропорционален $U_{л}$ (слайды №№ 52, 53, 54).**

А кроме того, можно сделать следующий вывод - теоретически, **аналоговая ВОЛС СВЧ может выполнять функцию СВЧ усилителя при $U_{л} \leq 1В$ и при $Роп.1 \sim 200 мВт$ (слайд №52).**

В настоящий момент **уже существуют** модуляторы Маха - Цандера: с $U_{л} \leq 1В$ и диапазоном рабочих частот **до 200 ГГц (!!!). За рубежом, разумеется.**

А что у нас? В Петербургском Физико-техническом институте по заказу ОАО "ЦКБА" разработан и изготовлен модулятор Маха-Цандера **с $U_{л} \approx 6В$ и 3-дБ диапазоном рабочих частот порядка 6 ГГц.** Таким образом, нам есть к чему стремиться.

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

И ещё хочется пояснить - зачем нам нужны эти аналоговые ВОЛС СВЧ вообще, и с положительными коэффициентами передачи в частности?

- Слайд №55

А представьте себе большой корабль типа авианосца (или большой самолёт типа Ту-95, Ту-160, В-2, В-52 и т.п.), вся поверхность которого утыкана сверхширокополосными (0.1-40 ГГц или даже 0.1-100 ГГц) антеннами. И принятые сигналы от этих антенн необходимо оперативно доставлять к мощному центральному вычислительно-аналитическому посту, который находится где-то в недрах корабля или летательного объекта на расстоянии десятков и даже сотен метров от антенн. Ну и как это осуществить физически? По коаксиальным кабелям что ли - с уровнем затухания ~ 2.5 дБ/м уже на 40 ГГц? А при наличии сверхширокополосных аналоговых ВОЛС СВЧ - да ещё 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 многие додумались. Например, сотрудники итальянской фирмы Finmessanica, фрагмент презентации которых ***про "полёт на свете"*** здесь приведён.

- Слайд №56 - спасибо за внимание.
