

## Слайд №1

- Добрый день уважаемые коллеги!

- Ещё раз поздравляю всех участников и гостей нашего семинара с юбилеем и хочу пожелать всем нам встретиться здесь - года через 4-ре - на следующем - ещё более солидном юбилее с номером 100. И перефразирую одного известного персонажа Шекспира - пусть позавидуют нам те, кто не был с нами в Татьянин день!

- Так же, хочется выразить благодарность Сергею Викторовичу за то, что он создал этот семинар и все эти годы самоотверженно поддерживал его жизнедеятельность в условиях периодических стихийных бедствий в виде дачно-огородных компаний и агрессивной среды тотальной апатии, которая парализовала научную жизнь нашего города.

- Наверное, могут быть разные мнения, относительно уровня и результатов деятельности нашего семинара, но при этом - каждый, кто адекватно воспринимает реальность - просто не может не понимать, что этот семинар фактически является единственной в нашем городе действующей на регулярной основе площадкой, на которой возможно общение сотрудников различных омских предприятий, учебных и научных учреждений. И это общение хоть как-то позволяет тормозить научно-техническую общественность нашего города, которая по большей части находится в глубоком летаргическом сне.

- Теперь собственно о докладе.

- Сергей Викторович попросил меня подготовить доклад, тема которого должна коррелироваться с сегодняшней круглой датой. Я примерно неделю промучился с выбором этой темы - то получалось уж совсем не-юбилейно, то - слишком пафосно. Ну а потом, решил особо не заморачи-

ваться - и в добрых старых традициях эпохи развитого социализма - сочинил отчётный доклад о тех достижениях, с которыми мы пришли к данному юбилею, и которые были отражены в выступлениях сотрудников ЦКБА на нашем семинаре. Понятно, что рассказывать - пусть даже очень коротко - о каждом нашем выступлении на семинаре нет никакой возможности - всё-таки сотрудники ЦКБА и вовлечённые в орбиту наших Интересов студенты сделали 24 докла на 19-ти семинарах. Поэтому, пришлось резать “по-живому” и “ужиматься” до наиболее “резонансно-юбилейных” тем.

- Тема получилась вот такой длинной.

### *Слайд №2 ( сайт семинара )*

- И сразу же хочу выразить благодарность Ворожцову Александру Леонидовичу за созданный им очень удобный и очень информативный сайт нашего семинара, пользуясь которым я без особых проблем нашёл всю необходимую для моего доклада информацию.

Почему собственно именно приёмники? Ответ прост - все “профильные” изделия нашего предприятия

### *Слайд №3*

- станции предупреждения о радиолокационном облучении;

### *Слайд №4*

- аппаратура управления и целеуказания;

### *Слайд №5*

- пассивные радиолокационные головки самонаведения

### Слайд №6

- сверхширокополосные измерительные системы с радиофотонными трактами и т.п.

### Слайд №7

- являются многоканальными сверхширокополосными приёмниками дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн.

- И во всех наших докладах мы фактически рассказывали о тех проблемах, которые возникают при проектировании современных и перспективных сверхширокополосных радиолокационных приёмных трактов.

- Правда, была - по крайней мере у меня - ещё одна такая “закадровая” цель - спровоцировать омских физиков на то, чтобы они занялись физикой. Я понимаю, что в Омске заработать этой профессией практически невозможно - но должны же они хотя бы вспоминать о своей специальности по диплому.

- Но вернёмся к проблемам ЦКБА.

- Для того чтобы более наглядно пояснить суть этих проблем, необходимо немного углубиться в историю вопроса.

### Слайд №8

- На ранних этапах развития радиолокации сканирование пространства осуществлялось механическим качанием луча. В таких “ранних” радиолокационных системах (РЛС), как правило, использовался одноканальный приёмник,

### Слайд №9

состоящий из антенны, устройства аналоговой обработки сигнала и электронно-лучевой трубки, информацию с которой “снимал” оператор РЛС, и дальнейшая обработка сигнала уже шла в голове человека или группы людей. И решение о дальнейших действиях по полученной с помощью РЛС информации принимал человек.

### Слайд №10

Например, в “ручном режиме” изменялся масштаб развёртки - так как показано на этом слайде.

- До поры, до времени этот довольно инерционный симбиоз человека и машины справлялся с теми задачами, которые стояли перед теми же системами ПВО. Но с появлением сверхзвуковой и гиперзвуковой авиации возникла острая необходимость снижения инерционности РЛС. Такие же проблемы возникали при создании систем противоракетной обороны,

- Понятно, что в упомянутой выше структуре были два источника инерционности - электромеханическая система качания антенны РЛС и человеческие мозги.

- С заменой биологических человеческих мозгов на кристаллические полупроводниковые мозги процессоров возникли проблемы, и потому сначала взялись за антенны: вместо механического качания луча стало использоваться электронное.

### Слайд №11

- Для реализации последнего были использованы т.н. антенные решётки, в состав которых могли входить и 2 антенны, и несколько сотен - и даже несколько тысяч - антенн.

### Слайд №12

- Переход на антенные решётки неизбежно привёл к созданию многоканальных локаторов, в которых пеленг на источник сигнала определялся по разности фаз сигналов на выходах приёмных антенн:  $\varphi_1 - \varphi_2$ ,  $\varphi_3 - \varphi_4$ , ...  $\varphi_{N-1} - \varphi_N$ .

- И как тут было быть? К каждому измерителю разности фаз прикрепить человека-оператора. Очевидный абсурд - тут нужна была автоматика под управлением ЭВМ. Понятно, что сначала была аналоговая автоматика с фазовыми дискриминаторами. А как эта автоматика должна выглядеть в идеальном случае?

### Слайд №13

- Вот примерно так - сразу после антенн стоят АЦП, цифровые сигналы с выходов которых - ЦС 1, ЦС 2, ... ЦС N - сразу "летят" на ЭВМ.

- На сколько реально это воспроизвести сейчас? Скорее всего - нереально, причём не только для ЦКБА, но и для Northrop Grumman, Lockheed Martin, Raytheon, BAE Systems, Thales и т.п.

- Поясню почему.

### Слайд №14

Прежде всего, на входах АЦП в обязательном порядке - для обеспечения вменяемой чувствительности - придётся поставить малошумящие

усилители.

- Далее - сейчас очень активно создаются источники мощного электро-магнитного излучения, которые можно поставить либо на беспилотные летательные аппараты, либо на ракеты, либо в корпусе авиационных бомб. Все эти “приспособления” - т.н. “СВЧ - бомбы” - могут выжечь входные тракты наших высокочувствительных приёмников.

### Слайд №15

- Для справки, ключевой активный элемент современных МШУ - транзистор с высокой подвижностью электронов - НЕМТ - на арсениде галлия - и длиной затвора 0.15 мкм - “держит” максимум чуть больше 60 мВт. А такие транзисторы обеспечивают приемлемые характеристики только до 18 ГГц. А для случая фосфида индия - уровень предельно допустимой мощности будет ещё ниже.

### Слайд №16

- Ну а тот, кто считает эти “СВЧ-бомбы” мистикой - должен осознать, что угроза может исходить и от “родных” вооружений - проедет в нескольких метрах от нашего высокочувствительного локатора какой-либо “Панцирь” и выжжет всё к чёртовой матери - прецеденты были.

- Поэтому, на входы МШУ надо ставить защитные устройства.

### Слайд №17

И вот именно так - в “минимальной комплектации” может выглядеть приёмный тракт сверхширокополосного пассивного локатора.

- Но со сверхширокополосными защитными устройствами - того же сантиметрового диапазона длин волн - просто беда.

### Слайд №18

Имеющиеся в наличии разрядники - способны держать киловатты, но они узкополосны.

### Слайд № 19

Вот как этот например.

### Слайд № 20

Сверхширокополосные диодные ограничители - сами нарывают сгореть уже при нескольких ваттах непрерывного излучения. И поднять эту предельную мощность фактически невозможно, так как хочешь поднять верхнюю границу рабочего диапазона частот - уменьшай габариты диодов, а при уменьшении габаритов - неизбежно снижается предельно допустимая рассеиваемая мощность. И не знаю как у других - но для нас эта головная боль на ближайшие годы обеспечена.

- Очевидно, что решение данной проблемы лежит за пределами схемотехники - тут необходимы такие технические идеи, которые основаны на каких-то новых физических принципах.

### Слайд № 21

- Одну из таких идей, нам подсказали кривые Пашена, из которых видно, что минимальные минимумы напряжения зажигания газового раз-

ряда можно получить в атмосфере аргона. А мы как раз и заполняем наши модули аргоном.

- Используя это совпадение, мы попытались реализовать сверхширокополосный разрядник с использованием сверхузкой копланарной линии с волновым сопротивлением 50 Ом. Результаты этих работ таковы - при постоянном напряжении разряд в такой линии происходит при напряжении около 30 В, что будет соответствовать мощности сигнала в 18 Вт. Проверить это на СВЧ пока не удалось - из-за отсутствия источника мощного СВЧ сигнала. Результаты этой работы были доложены на одном из наших семинаров. А пока - эта тема ещё ждёт своего исполнителя - физика - причём Физика с большой буквы.

### *Слайд № 22*

- Но вернёмся к схеме нашего приёмного тракта. Когда видишь эту схему невольно вспоминаешь Мартина Лютера Кинга с его

### *Слайд № 23*

- I have a dream. И эта дрим - о СВЧ АЦП.

- А что мы имеем спустя почти полвека после того, как преподобный произнёс эту фразу?

### *Слайд № 24*

Мы имеем 3-битный АЦП **HMCAD5831LP9BE** фирмы Hittite с номинальной частотой дискретизации 20 ГГц и эффективной разрешающей способностью 2.9 бита. Но если ко всему этому добавить то, что написано “мелким” шрифтом, то реальная разрешающая способность, скорее всего,



ахнет до 1 бита и АЦП фактически вырождается в СВЧ датчик-детектор. А когда общаешься с отечественными разработчиками блоков оцифровки сигналов - они начинают нервно хихикать, когда речь заходит об оцифровке сигналов в несколько сотен МГц (понятно, что речь идёт не об 1-битных АЦП).

И у нас как-то подспудно возникло желание разобраться с ситуацией.

### *Слайд № 25*

Информационный поиск показал, что наиболее цитируем по этой теме автором является некто Роберт Волден, который в 1999 году опубликовал статью, в которой разложил по полочкам - что от чего зависит, а также сделал прогнозы о предельных возможностях полупроводниковых АЦП - в частности, по частотам оцифровки и по эффективной разрешающей способности. Совокупность этих прогнозов получила название “Стена Волдена”. Так же из этой статьи следовало, что электронные АЦП начинают приближаться к тем пределам, которые обусловлены физическими законами. А значит - следовало искать альтернативу электронике. И такой альтернативой может стать радиофотоника ( или микроволновая фотоника - как это принято называть зарубежом).

### *Слайд № 26*

- О радиофотонных АЦП было рассказано на 13-м семинаре, который состоялся в январе 2011 года.

- В этом докладе было рассказано об инициированных DARPA и Исследовательской лабораторией ВВС США - AFRL - проектно-исследовательских работах по тематике радиофотонных АЦП.

### *Слайд № 27*

В частности, AFRL в 1999 году запустила программу РАСТ. Акцентирую внимание на том, что речь шла о разработке АЦП габаритами  $50 \times 50$  мм для боевого истребителя.

### *Слайд № 28*

В процессе выполнения этой программы планировалось получить такие цифры. Эти цифры очень здорово выходили за “стену Волдена”.

### *Слайд № 29*

Более того, исполнители этой работы считали, что в этом мире для АЦП могут быть только одни границы, которые определяются принципом неопределённости Гейзенберга. Ну, например, при мощности входного сигнала в 20 мВт, можно, например, при 840 Гигавыборках в секунду получить разрешения в 12 бит. Мы, кстати говоря, до сих пор продолжаем разбираться с отчётом по этой работе.

### *Слайд № 30*

Каким образом осуществляется дискретизация в радиофотонных АЦП мы понимали и три года назад. А вот технология квантования была для нас тёмным лесом. С чувством глубокого удовлетворения могу доложить, что с этим квантованием мы “достали”, наверное, всех действующих отечественных специалистов по оптике и электрооптике. И этот интеллектуальный террор начал давать свои плоды - мы на системном уровне поняли, как это квантование осуществляется

### Слайд № 31

и как устроена и как работает вот эта оптическая интегральная схема.

И сейчас опять вопрос для физиков - нам надо разобраться с физикой т.н. *насыщающихся поглотителей* (поз. 4), уровень затухания в которых является аналогом опорных напряжений в компараторах электронных АЦП. Это может быть хорошей темой для магистерской диссертацией. Если будут получены серьёзные результаты - то с публикациями в серьёзных федеральных изданиях проблем не будет. Например, в журнале Фотон-Экспресс, главный редактор которого предложил мне подумать о серии публикаций по данной тематике. А этот журнал в этом году планирует получить “ваковский статус”.

- Кстати говоря, *о результатах работы нашего семинара*. Сделанные на нашем семинаре доклады по микроволновой фотонике (радиофотонике) были распечатаны и переплетены - и в таком виде очень хорошо отработали в качестве рекламных материалов в различных московских кабинетах. Благодаря чему - в официальных документах МинПромТорга - стали мелькать термины - радиофотоника и микроволновая фотоника.

- А в настоящий момент - по инициативе того же МинПромТорга - идёт разработка Концепции развития радиофотоники в нашей стране. Мне предложили в этом поучаствовать. Желающие могут присоединяться.

- Если желающие найдутся в этой аудитории прямо сейчас, то я их могу познакомить с присутствующим здесь Тихоновым Евгением Витальевичем, который выбрал темой своей кандидатской диссертации именно радиотонные АЦП. По данной теме он выступал здесь на 44 семинаре

### Слайд № 32

- вот с таким докладом.

Вообще тема крутая - на большую кучу кандидатских и чуть меньшую кучу докторских - и это настоящая - честная и актуальная - без всяких натяжек - наука.

- Но радиифотонные АЦП - это наше светлое - а точнее - инфракрасное будущее. А пока - у нас есть обычные электронные АЦП, которые при вменяемой разрешающей способности в 8-10 бит будут в состоянии оцифровать сигналы с частотами не более 1 ГГц.

- Акцентирую, что речь идёт о массовом серийном производстве сверхширокополосных, малогабаритных и спецстойких приёмных каналов. И потому, здесь нет смысла заикливаться на тех же цифровых осциллографах фирмы Agilent Technologies с диапазонами рабочих частот до 60 ГГц и более. Даже если абстрагироваться от их габаритов, достаточно провести мысленный эксперимент - представить, что произойдёт с этим лабораторным прибором при одиночном ударе в несколько десятков г, или при температуре окружающей среды +100°C. Не говоря уже о цене....

- Поэтому, для обеспечения приёма сигналов - например - в диапазоне 1-18 ГГц мы вынуждены будем “пережёвывать” аналоговыми устройствами входной сигнал до такой консистенции, которую смогут переварить доступные электронные АЦП.

- А это значит, что перед АЦП, наряду с другими устройствами аналоговой обработки сигналов: частотными фильтрами, аттенюаторами, направленными ответвителями, коммутаторами и т.п. придётся ставить

### **Слайд № 33**

- либо амплитудные детекторы (для случая приёмников прямого усиления)

### **Слайд № 34**

- либо преобразователи частоты (смесители) для случая супергетеродинного приёмника.

- Поэтому, разработка всех этих сверхширокополосных аналоговых устройств - а так же гетеродинов для смесителей - остаётся крайне актуальной.

- Поэтому, в своих докладах на семинарах мы рассказывали, например, о возможностях той же радиофотоники (микроволновой фотоники) в области реализации таких аналоговых СВЧ устройств.

- В частности нами были сделаны доклады

### **Слайд № 35**

- по оптоэлектронным автогенераторам СВЧ (семинар №31, 29.09.12);

### **Слайд № 36**

- по экспериментальному определению электрических параметров волоконно-оптической линии связи в диапазоне СВЧ (семинар №22, 26.11.11);

### **Слайд № 37**

- по аналоговым ВОЛС с положительными коэффициентами передачи (семинар №40, 27.04.13). В этом докладе, в частности, было теоретически показано, что радиофотонные тракты

### *Слайд № 38*

- могут иметь положительные коэффициенты передачи.

- По всем этим темам мы очень хорошо продвинулись и в теоретическом и в экспериментальном плане. Но все эти работы так и напрашиваются на продолжение. Одним из перспективнейших направлений я считаю реализацию многоканальных мультиплексоров СВЧ с использованием методов и средств радифотоники.

### *Слайд № 39*

- Возможная реализация канала такого селектирующего устройств с использованием волоконных решёток Брегга приведена на этом слайде,

### *Слайд № 40*

- а многоканальная реализация - на этом.

- Сейчас нечто подобное пытаются изобразить коллеги из Перми.

- Здесь одним из ключевых вопросов является проектирование волоконных решёток Брегга. Этим было занялся один из студентов (семинар №34, 29.12.12) - но потом решил заняться более творческой работой - проектированием ВЭБ - сайтов для ЖЭКов и т.п..

### *Слайд № 41*

- Так же своих исполнителей ждут экспериментальные и теоретические работы по радиофотонным сверхширокополосным супергетеродинным трактам.

### *Слайд № 42*

- И в заключении хочется упомянуть ещё одну тему - метаматериалы, о которой сотрудниками ЦБА сделали доклад на одном из самых первых семинаров ( семинар №3, 27.03.10 ).

### *Слайд № 43*

Потенциальные возможности таких материалов до сих пор остаются толком неисследованными - и здесь простор для физиков - и по части теории, и по части эксперимента. Не знаю как кому, но мне очень бы хотелось узнать, что происходит с этим миром, когда диэлектрическая проницаемость становится равной нулю и исчезает ёмкость, а длина волны в линии становится равной бесконечности. Одним словом - Нобелевские премии под ногами валяются.

- Ещё раз всех с юбилеем и приглашаю к сотрудничеству.

### *Слайд № 44*

*У меня всё - спасибо за внимание.*