

Слайд №1

- В своём предыдущем докладе на ноябрьском семинаре (27.11.10) я рассказал об относительно новом направлении в науке и технике - **микроволновой фотонике**. Напомню некоторые фрагменты этого выступления.

Приведу ещё раз определение микроволновой фотоники (Слайд №2) - это наука, которая изучает взаимодействие между оптическим сигналом и высокочастотным (больше 1 ГГц) электрическим сигналом.

Так же в том докладе было сказано, что методы и средства **микроволновой фотоники** позволяют создавать

- сверхбыстрые линии передачи - до 100 Гб / сек с использованием **волоконно-оптической радиосвязи**, или как это принято называть за рубежом радио - через - волокно - **ROF** (Слайд №3);

- высокостабильные и перестраиваемые генераторы с рекордными характеристиками по уровням частотных и фазовых шумов (Слайд №4);

- перестраиваемые СВЧ фильтры (Слайд №5);

- сверхширокополосные многоканальные супергетеродинные приёмники для РЛС (Слайд №6)

- изготовленные по технологии **НРМ** малогабаритные сверхмощные источники СВЧ сигналов - до 100 МВт на квадратный дециметр (Слайд №7);

- а так же входные каскады приёмников, способные выдержать воздействие не только мощнейших сигналов СВЧ, но и электро-магнитного импульса от высотного ядерного взрыва (Слайд №8).

Ну и в числе прочего, в том докладе было сказано, что, используя средства и методы **микроволновой фотоники**, можно получить АЦП с **феноменальными** характеристиками.

Рассмотрим причины - по которым “пересеклись” пути развития АЦП и **микроволновой фотоники**.

И причин этих немного - а точнее всего одна - желание военных обеспечить **глобальной информацией** участников боевых действий, причём почти **в реальном времени**.

Это желание, вероятно, возникло после того, как США провели ряд “высокотехнологичных” войн в течении 90-е годы прошлого века.

Для удовлетворения этого желания необходимо было замкнуть в одну сеть **высокоскоростные системы цифровой обработки сигналов и аналоговые сенсорные системы** типа РЛС, а так же системы радиотехнической разведки и РЭБ.

Для реализации такой сети потребовались высокоскоростные АЦП с высокой разрешающей способностью. Как сделать АЦП с требуемыми характеристиками тогда не знали.

Поэтому, для решения данной проблемы, как обычно, была подключено Агентство по перспективным оборонным проектам - DARPA (**Слайд №9**).

Сотрудники этой организации лучше других знали, что **электронные** АЦП уже начинают “упираться” в реальные физические пределы - и по частоте дискретизации, и по разрешающей способности.

Поэтому, улучшение электрических характеристик **электронных** АЦП шло крайне медленными темпами: так например, для увеличения разрешения на 1 бит требовалось 6-8 лет.

Поэтому сотрудники DARPA начала искать другие, альтернативные электронным, способы реализации АЦП.

И в частности, обратили внимание на фотонику, которая к тому времени (а речь идёт о конце 90-х годов прошлого века) уже достигла впечатляющих результатов.

Например, с использованием фотонных устройств можно было формировать импульсы длительностью 10^{-15} сек., что позволяло сразу повысить частоту дискретизации на порядки (по сравнению с электронными дискретизаторами).

- А сейчас - я уже видел сообщения об аттосекундных импульсах - т.е. импульсах длительностью 10^{-18} сек..

Так же фотоника располагала не только источниками таких импульсов, но и устройствами, которые позволяли осуществить при помощи последовательностей таких импульсов физическую дискретизацию аналоговых СВЧ сигналов : например электропоглощающими модуляторами ([Слайд №10](#)) и модуляторами Маха - Цандера ([Слайд №11](#)).

Причём, и тот, и другой уже были реализованы *не в виде физических лабораторных установок*, а в виде планарных устройств, пригодных для использования в реальных инженерных системах.

Поэтому, в общих чертах было ясно, как можно повысить частоту дискретизации ([Слайд №12](#)) :

- на электро-оптический модулятор подаётся последовательность оптических импульсов с шагом, например, 10 пикосекунд, и сигнал СВЧ, например с частотой 10 ГГц,

- в этом случае, на выходе электро-оптического модулятора имеем последовательность оптических импульсов, амплитуда которых периодически изменяется с частотой 10 ГГц

Получается - на один период дискретизируемого сигнала - 10 выборок, а это значит, что требования теоремы Котельникова превышены в 5 раз.

Ну а дальше была полная неизвестность - и прежде всего - как осуществить квантование этих импульсов, которые идут с интервалом в *10 пикосекунд*.

Ну а кроме того, компоненты этих новых АЦП необходимо было сделать

- компактными,
- эффективными,
- и устойчивыми к воздействию условий окружающей среды.

Таким образом, предстояло решить массу, казалось, неразрешимых проблем.

- Но как бы там ни было, в 1999 г. DARPA признала потенциальные преимущества фотоники в отношении аналого-цифрового преобразования и запустила 4-х летнюю программу РАСТ ([Слайд №13](#)) по разработке технологии фотонного АЦП.

Программа имела амбициозные цели - значительно превзойти электронные АЦП ([Слайд №13](#)).

И хотя, в общем-то, было известно, что DARPA берётся за самые отчаянные проекты - но это, как показалось тогда многим, был уже явный перебор - так как в данном случае практически игнорировались известные ограничения, накладываемые Walden Wall (границей Уолдена), которая накладывает взаимные ограничения на *разрешающую способность и частоту выборки*.

Но сотрудники DARPA обосновали свои планы следующим образом.

Они трансформировали алгебраическое выражение принципа неопределённости Гейзенберга в такую форму, в которой фигурируют электрические параметры АЦП ([Слайд №14](#)).

Пользуясь этой формулой сотрудники DARPA определили, что при амплитуде входного сигнала 1 В и входном импедансе 50 Ом, ограничение Гейзенберга даёт

- 12 разрядов разрешения при скорости 840 гигавыборок в секунду.

Таким образом, было предложено ориентироваться не на границу Уолдена, а на ограничения, накладываемые принципом неопределённости Гейзенберга, и искать физические способы реализации такого АЦП.

И поиски начались - и стали появляться результаты.

Так например, уже в 2001 г. появился патент на маломощный пассивный фотонный АЦП на основе насыщающихся поглотителей ([Слайд №15](#)), основные компоненты которого ([Слайд №16](#)) могли быть интегрированы на отдельную подложку при помощи интегральных электро-оптических технологий.

Чем закончилась эта программа DARPA - а она закончилась в 2003 г. - мы пока не знаем. Но по отдельным отрывкам информации, полученных из некоторых источников - *достигнутый прогресс оправдал попытки и риски, которые были связаны с решением этих задач*.

- Следует отметить, что проблематикой фотонных АЦП, кроме DARPA, занимались и другие организации.

- Примерно в те же годы, свою программу запустило одно из подразделений исследовательской лаборатории ВВС США (Слайд №17).

В рамках этой программы планировалось разработать фотонный АЦП с аналогичными характеристиками для систем авионики боевых самолётов - со всеми сопутствующими “прелестями” вроде климатических и механических воздействий, спецфакторов и ограничений по габаритам. Так, например, площадь этих АЦП не должна была превышать 4-х квадратных дюймов - т.е. размеры должны были быть не более чем 50 на 50 мм.

Кстати говоря, именно это подразделение AFRH предложило показанную выше (Слайд №12) архитектуру АЦП.

Для реализации такой архитектуры необходимо было создать

- сверхширокополосный СВЧ электро-оптический модулятор;
- лазер со сверхнизким дрожанием апертуры;
- квантователь.

К решению проблем, возникающих при реализации данной архитектуры АЦП были привлечены мощные кадровые ресурсы (Слайд №18): и из промышленности, и из научного сообщества, и независимые эксперты.

Информация по этой программе - по понятным причинам - крайне скудная.

Из той информации, которая просочилась к нам, известно, что в рамках этой программы, в частности, был разработан чисто *электронный АЦП*, который мог обеспечить 3-битовое разрешение со скоростью 20 гигавыборок / сек.

Так же известно, что им пришлось отказаться от использования модуляторов Маха-Цандера в качестве дискретизаторов из-за слишком больших габаритов.

Для примера, типичная длина планарного модулятора Маха-Цандера составляет порядка 60 мм, а габариты АЦП, как я уже говорил, были ограничены 50 мм.

Поэтому, в качестве дискретизаторов можно было использовать только электро-поглощающие модуляторы.

- Судя по всему, именно в рамках этой программы был разработан сверхширокополосный электропоглощающий модулятор на основе гетеробиполярного тран-

зистора, вероятнее всего фосфид индиевого (***Слайд №19***).

Параметры этой, скажем так - опто-транзисторной структуры - как модулятора, пока найти не удалось, но известно какие к ней предъявлялись требования: например, неопределённость апертуры не должна была превышать 0.5 пСек.

Следует отметить, что особого разнообразия вариантов при выборе материала и технологии изготовления модулятора не было, так как с самого начала было ясно, что все компоненты архитектуры АЦП (за исключением может быть лазера) должны изготавливаться из одного и того же материала и по одной и той же технологии.

Иначе не о каком массовом производстве и речи быть не может.

Кстати говоря, это была ещё одна причина, по которой отказались от модуляторов Маха-Цандера, которые реализуются на подложках из сегнетоэлектриков - типа ниобата лития - и потому, технология изготовления этих модуляторов никак не коррелируется ни с одной полупроводниковой технологией.

Поэтому, одной из первоочередных задач этой программы был выбор оптимального полупроводникового материала.

Выбрали ***фосфид индия***, который отличается и высокой подвижностью электронов, и самое главное - узкой запрещённой зоной, что позволяло значительно снизить потребляемую мощность - одну из главных проблем АЦП.

Рассматривали, правда и антимониды, но что-то у них не пошло.

Создание малогабаритного планарного лазера с требуемыми параметрами тоже было сверхтяжёлой задачей.

Наверное потребуется не один такой доклад, чтобы рассказать о тех проблемах, которые исполнителям программы пришлось решить - хватило бы на целую отдельную программу той же DARPA.

Поэтому - сразу о финале - был создан ***лазер с синхронизированными модами*** с дрожанием импульсов синхронизации менее ***10 фемтосекунд***.

- Ну и задача №3 - создание квантователя - и это была самая сложная задача - и скорее всего - ключевая.

- Поэтому, если по дискретизаторам и лазерам хоть какую-то информацию найти удалось - да и для анализа этой информации мы хоть как-то были подготовлены теоретически, то тут ***был абсолютно тёмный лес - ни информации, ни даже общих представлений.***

Известно, что квантователь состоял из двух модулей (***Слайд №20***) : модуля насыщающихся поглотителей и оптоэлектронного модуля.

При помощи этих насыщающихся поглотителей осуществлялось т.н. “динамическое измерение диапазона”. Как это происходило - ***нам без физиков не разобратся.***

Выше я уже сказал - что ключевой проблемой программы была реализация квантователя.

А ключевой проблемой при реализации этого квантователя, судя по всему, была проблема реализации этих самых насыщающихся поглотителей.

Назначение оптоэлектронного модуля - преобразование оптического сигнала в электронный цифровой сигнал какого-либо традиционного формата.

Про устройство этого модуля известно только следующее - этот модуль содержит фотодиод, фотонную ИС сброса и электронный компаратор, которые были выполнены на фосфиде индия по технологии близкой технологии изготовления дискретизатора.

И всё - далее тишина.

Есть, правда ещё один источник (***Слайд №21***), до которого мы сейчас пытаемся добраться - это фактически технический отчёт это AFRL по данной тематике - но пока безрезультатно.

Чем закончилась эта программа - мы пока точно не знаем, но косвенным источникам информации можно предположить, что удачно.

Может возникнуть вопрос - а можем ли привести хоть один пример реального использования фотонной оцифровки.

- Один можем.

Предлагается рассмотреть архитектуру АЦП (***Слайд №22***), которую предложили сотрудники лаборатории Линкольна Массачусетского технологического института (***MIT / LL***).

Входной сигнал СВЧ поступает на входной электро-оптический модулятор.

При помощи последовательности оптических импульсов ***лазера с синхронизированными модами*** этот СВЧ сигнал дискретизируется со скоростью 500 мега-выборок / сек.

Далее, последовательность промодулированных оптических импульсов прорежается в 8-миканальном оптическом демультиплексере, в результате чего ***на каждом из 8-ми выходов*** демультиплексера оптические импульсы появляются уже ***не с частотой 505 МГц***, а в 8-м раз более низкой - ***около 63 МГц***.

Далее, при помощи оптических линий задержки выравниваются фронты каждого “кадра” оптических импульсов: с 1-го по 8-й, с 9 по 16-й и т.д.

Далее оптические импульсы детектируются пиковыми детекторами фотонных интегральных схем, которые кроме 8-ми детекторов содержат 8-м схем сброса.

Ну а далее - происходит оцифровка “медленными” 14-разрядными АЦП фирмы Аналог - Дивайс, которые сейчас можно купить на каждом углу за 2 000 рублей. Следует отметить, что, судя по всему, два младших разряда не используются.

После чего,

- восемь 12-разрядных цифровых сигналов с “верхнего” канала
- и восемь 12-разрядных цифровых сигналов с “нижнего” канала

одновременно поступают в буферную память, а из неё в компьютер, где происходит окончательная обработка этих цифровых сигналов и формируется цифровой портрет аналогового входного сигнала - примерно через каждые 2 наносекунды.

Зачем нужны ***два*** канала? Я могу констатировать только очевидное - огибающие импульсных последовательностей в каналах сдвинуты друг относительно друга на 180°.

Судя по всему, именно такая двухканальная фазомодулированная конструкция

- во-первых, обеспечивает выборку малодрожжащего импульсного сигнала, который не загрязняет входной электрический сигнал;

- во-вторых, обеспечивает высокую линейность с высоким отношением сигнал-шум;

- и в-третьих, эта архитектура нечувствительна к амплитудному шуму лазера.

Теперь о **количественных характеристиках** : данный АЦП демонстрирует:

- скорость выборки : 505 MS / сек,

- соотношении сигнал-шум : около 51 дБ,

- динамический диапазон без помех: около 61 дБ,

и это всё при 8-разрядном разрешении.

Может возникнуть вопрос - куда “исчезают” 4 бита из 12 “выходных” бит АЦП AD6644?

Вероятно, это расплата за “двухканальность”.

Конечно 505 мегавыборок / сек - это очень далеко до заявленных в программе РАСТ скоростей (5 гигавыборок / сек), но

- это было на самой заре выполнения программы РАСТ - данный АЦП, **причём уже работающий в составе РЛС**, был описан в журнале за октябрь 2001 года;

- а кроме того, Массачусетский Технологический институт очень преуспел в демонстрации данного АЦП на этой самой РЛС,

- и **именно эта демонстрация** наглядно убедила всех в том (в том числе и военных, надо полагать), что при помощи фотоники можно очень точно преобразовывать аналоговый сигнал в цифровой.

Само-собой разумеется , что у данного АЦП было полно недостатков:

- для формирования демультимплексера пришлось использовать кучу, как уже было сказано выше, крупногабаритных модуляторов Маха-Цандера, да и вообще все элементы архитектуры были изготовлены из различных материалов, что препятствовало интеграции системы;

- метод фазового кодирования требовал двух каналов, для реализации которых потребовалось 16 АЦП со всеми вытекающими (точнее выделяющимися в виде тепла) последствиями,

И была ещё масса прочих проблем, в результате чего данная архитектура была признана непрактичной для применения в BBC.

В рамках выполнения программы РАСТ (Слайд №23) была найдена более удачная архитектура, предложенная *Hughes Research Laboratories* (HRL), которую нам пока найти не удалось.

Известно, что под эту архитектуру HRL разработала чисто электронный АЦП, работающий со скоростью 10 гигавыборок / сек с 4-битовым разрешением.

Известно, что на архитектуре HRL были последовательно достигнуты следующие результаты:

- сначала : 40 гигавыборок / сек при полосе сигнала СВЧ 20 ГГц и 4-битовым разрешением,

- а потом, 80 гигавыборок / сек при полосе сигнала СВЧ 40 ГГц и 3-битовым разрешением.

Это данные на сентябрь 2001 года.

Чего они достигли сейчас - страшно подумать.

Что хочется сказать в заключение.

Разумеется, я всё это рассказывал не для того, чтобы в очередной раз показать всю нашу убогость - цели у меня были другие.

Изучение озвученных материалов показало, что без помощи физиков нам - инженерам - в этом не разобраться.

Поэтому, я хотел бы пригласит к сотрудничеству всех тех, для кого эта тема показалась интересной и перспективной - причём особая надежда на студентов, так как процесс, кажется, будет долгим.

Денег за участие в этих работах я не обещаю:

- мы сможем представить только лаборатории, оборудование, информацию и приобрести некоторую элементную базу.

Наверное, можно ещё найти некоторые бонусы за участие в этом мероприятии, но то, что, они будут нематериального плана я могу гарантировать.

Так что приглашаю желающих принять участие “*в штурме неба*”.

У меня всё - спасибо за внимание.