



Электроника ДК: варианты с коммерчески доступной элементной базой

РУБАН А.А.

ОТ КОЛЛАБОРАЦИИ КМД-3 ДЛЯ ВЭПП-6, 11.12.2025



Цель доклада

- ▶ Определить круг задач с точки зрения электроники и её функционирования
- ▶ Сформулировать подходы к решению
- ▶ Привлечь колаборантов к проработке решений и тестам



План

Усилительные элементы и решения

Дискретные компоненты,
ИС для ВОЛС и лидаров,
ОУ общего назначения,
БИС радаров, сонаров

Транспортная среда

Коаксиальные системы,
Симметричные системы,
Гибкие ПП,
Оптические системы

Высоковольтная система

Полярность напряжения,
Фильтры, разделительные цепи,
Стойкость к пробоям

Калибровка

Внешняя электронная,
Встроенная электронная

Прочие системы

Охлаждение, терморегуляция,
Магнитные измерения
Электро-магнитная совместимость



Усилительные элементы и решения

Требования к (пред)усилителям ДК

Параметр по задаче	Величина для всех	КМД-4 (3М)	КМД-3
Метод	Деление заряда, стереометрия, счёт кластеров	Стереометрия	Деление заряда
Физическое понимание задачи с точки зрения получения ТЗ *		$\sigma_t \sim 1\text{нс}$, $\sigma_q \sim 3\%$? @DR~10бит ?	$\sigma_t \sim 1\text{нс}$, $\sigma_q \sim 0.1\%$ @DR~14бит
Шум, ENC, е- формировка?	10% @ Kavalanche	10k	10..15k
Полоса усиления, МГц	30..350	≥ 35 ?	150
Входной импеданс, Ом	30..300	~ 300 **	75**
Малая потребляемая мощность, мВт	8..300	$\leq \sim 100$	8***

* Ёмкость, сопротивление, волновое сопротивление ячейки?

** Включая цепи защиты

*** Нет длинной линии



Усилительные элементы и решения

Требования к (пред)усилителям ДК

Параметр для ТЗ	Величина для всех	КМД-4 (3М)	КМД-3
Метод	Деление заряда, стереометрия, счёт кластеров	Стереометрия	Деление заряда
Стабильность усиления, %	0.1..1	<=~1	0.1
Стабильность входного импеданса, %	0.1..1	<=~1	0.1
Коэффициент усиления по напряжению $K_{\text{out}} = K_{\text{amp}} * K_{\text{in_intrf}} * K_{\text{out_intrf}}$	5..50	20..30	25
Шум, спектральная плотность nV/\sqrt{Hz} , pA/\sqrt{Hz}	1..7 20..100	$\sim 1..2^*$ $\leq 5..10$	$\sim 1..2^*$ ≤ 20
Устойчивость к наводкам, $Z_{\text{связи}}$ между «землями», Ом	5..20	<=~2	~5
Возможность калибровки	Электронная, лазер, источник	Электронная	Электронная
Малые габариты, см**2	1..16	<=~1	~2
Малая потребляемая мощность, мВт	8..300	<=~100	8



Усилительные элементы и решения

- ▶ **Элементная база:**
- ▶ Дискретные транзисторы и компоненты
- ▶ ИС предусилителей фотодиодов ВОЛС и лидаров
- ▶ ИС ОУ общего назначения
- ▶ Специализированные БИС для лидаров, сонаров, радаров.
- ▶ RF MMIC – не вариант!



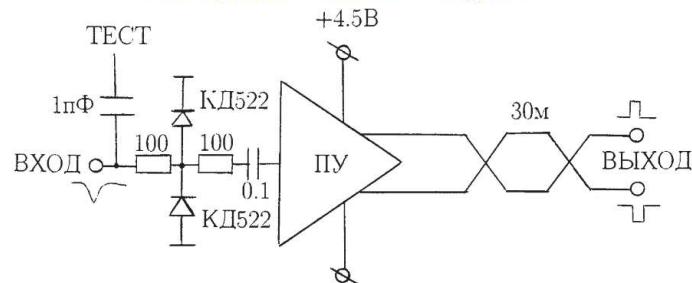
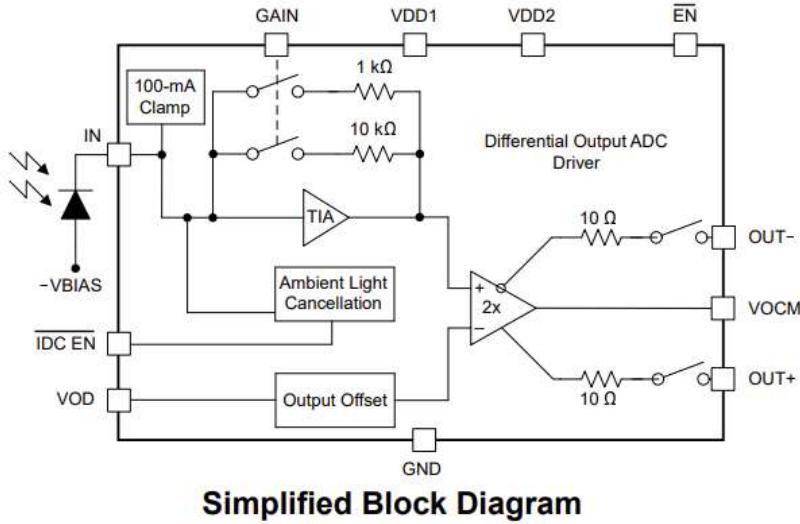
Усилиительные элементы и решения

► **Дискретные транзисторы и компоненты:**

- Традиционное для ИЯФ решение, КМД-2, КМД-3, СНД, КЕДР(!) используют дискретные решения.
- КЕДР, СНД – мезапланарные кремниевые СВЧ транзисторы KT372, BSF17 и BFR92
- КМД-3 – гетеропереходные SiGe 2-ого поколения 90нм
- КМД-4 - гетеропереходные SiGe 6/7-ого поколения 45нм, бетта до 600, $U_{к}$ ~0.5..1В
- Полоса усиления порядка 100МГц
- Потребляемая мощность для КМД-2, КЕДР ~100/300мВт/канал: 200/600Вт/т при 4к проволочек
- Потребляемая мощность для КМД-3 ~8мВт/канал (особое решение без линии на выходе)
- Преимущество – короткие сроки разработки и производства
- Недостатки – габариты и надёжность паянных соединений



Усилительные элементы и решения

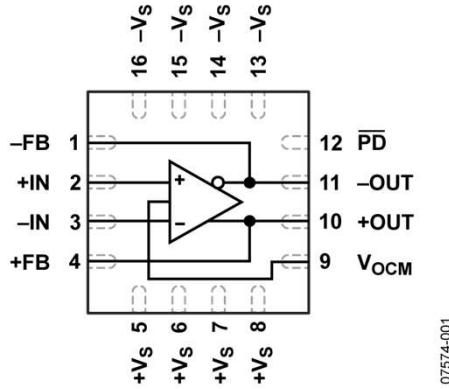
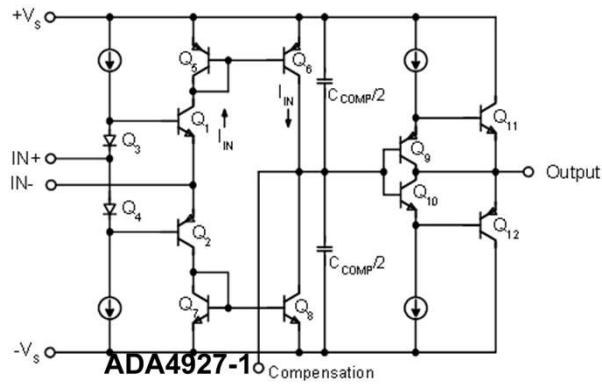


▶ Предусилители фотодиодов ВОЛС и автомобильных лидаров

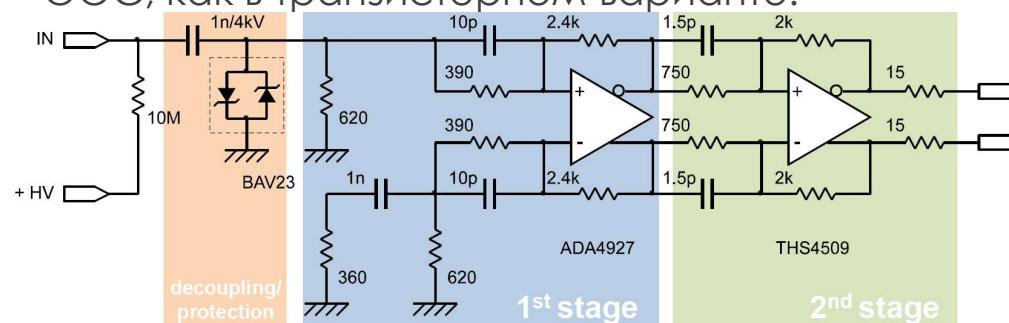
- ▶ Готовый трансимпедансный усилитель с большой полосой и дифференциальным выходом.
- ▶ LMH32401 от Texas Instr. ~\$5
- ▶ 450МГц при трансимпедансе 2кОм, собственный фронт 0.8нс. Входной импеданс ~100_Ом
- ▶ 270МГц при трансимпедансе 20кОм, собственный фронт 1.3нс. Входной импеданс ~350_Ом
- ▶ Потребление 30mA при 3.3В, т.е. ~200Вт на торец при 4000проводочек.
- ▶ Корпус 3х3мм.
- ▶ Широкий выбор, есть многоканальные варианты



Усилительные элементы и решения

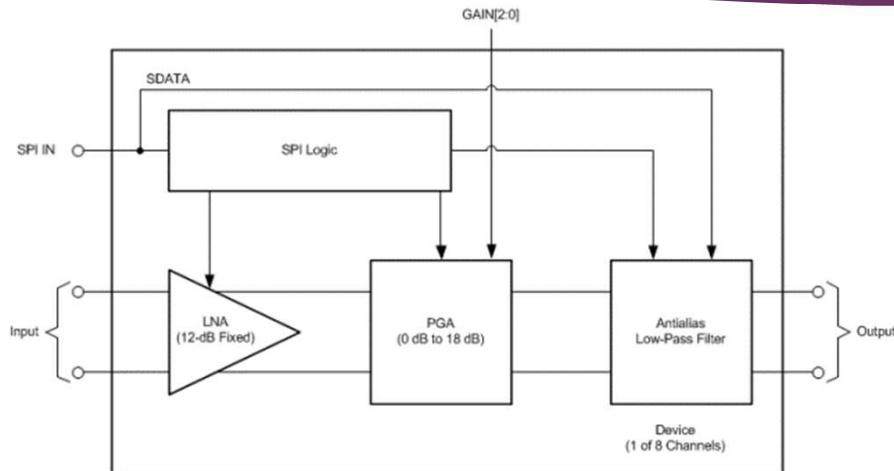


- ▶ Операционные усилители общего назначения
- ▶ Усилитель с дифференциальным выходом.
- ▶ MEG CFB ADA4927-1 Полоса 2.3ГГц, 4x4мм, \$5
- ▶ Входной импеданс по IN- = ~14_Ом
- ▶ Потребление 20mA при 5.0В, т.е. ~200Вт на торец (один каскад)
- ▶ -- Стабильности усиления и импедансов определяются внешней ООС, как в транзисторном варианте.





Усилительные элементы и решения



- ▶ Стабильности усиления и импеданса не специфицируются.
- ▶ Вероятно, необходим входной каскад для работы с проволочкой

- ▶ Специализированные ИС для лидаров, сонаров, радаров.
- ▶ Усилитель с большой полосой и дифференциальным выходом.
- ▶ PGA5807 8каналов, 75МГц, регулировка усиления, \$30
- ▶ Входной импеданс ~100_Ом
- ▶ Потребление 150mA при 3.3В, т.е. ~120Вт на торец при 4000проводочек.
- ▶ Корпус 9x9мм.
- ▶ Широкий выбор, есть варианты, с АЦП



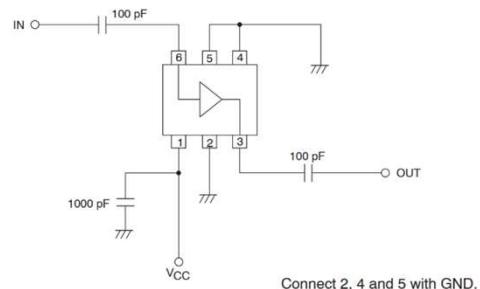
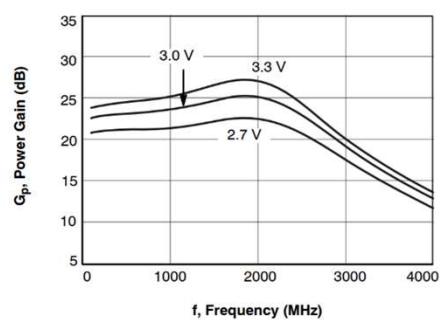
Усилительные элементы и решения

**Amplifier, 3 V, 6 mA,
0.1 to 2.8 GHz, MCPN6**

SMA3107

Features

- High Gain : $G_p = 23.5$ dB typ. @1 GHz
- Wideband Response : $f_u = 2.8$ GHz
- Low Current : $I_{CC} = 6$ mA typ
- Port Impedance : Input/Output 50 Ω



- ▶ Специализированные RF MMIC – не вариант!
- ▶ Усилитель с большой полосой – Да!
- ▶ 3GHz, \$0.2 – Да!
- ▶ Входной импеданс ~50/50_Ом – вполне.

Всё замечательно!!! Но...

- ▶ Это не СВЧ транзистор! Это 4-х слойный прибор.
- ▶ По структуре это «транзистор» Дарлингтона, он же тиристор!
- ▶ Имеет «встроенную» положительную обратную связь, склонен к генерации, нелинейен.



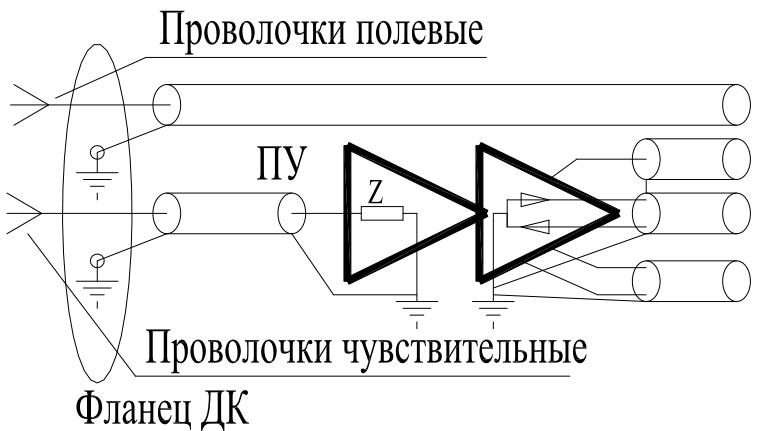
Элементная база

Тип базы	Полоса	Потребление	Стоимость**	Сроки
Дискретная	По задаче	8..100мВт/канал	Низкая/Умеренная	1..1.5года
ИС ВОЛС	300..1000МГц	100..200мВт/канал	Умеренная	1..1.5года
ИС универсальные	30..300МГц	200..300мВт/канал	Умеренная	1..1.5года
ИС сонаров, лидаров	30..200МГц	60..100мВт/канал	Умеренная	1.5..2года
СБИС заказные	По задаче	30..100мВт/канал	Высокая	3..6

- ▶ Наработка на отказ обратно пропорциональна потребляемой мощности
- ▶ Срок службы снижается в 3 раза на каждые 10°К
- ▶ ** Оценка стоимости при партии менее 10к каналов



Системы транспорта сигналов



**Условно не показаны:

- ▶ Транспорт пучков, питание линз
- ▶ Транспорт тока, LHe, LN₂ СП магнита
- ▶ Транспорт блуждающих токов опор
- ▶ Транспорт токов, охватывающих ярмо магнита

- ▶ От фланца ДК до ПУ - Коаксиальные системы
- ▶ От ПУ до Регистрирующей электроники - Симметричные витые пары
- ▶ Гибкие печатные платы - От фланца до ПУ на торце, до Регистрирующей электроники
- ▶ Оптические транспортные системы. Технология фотонных радаров - почти фантастика, уже здесь.



Системы транспорта сигналов

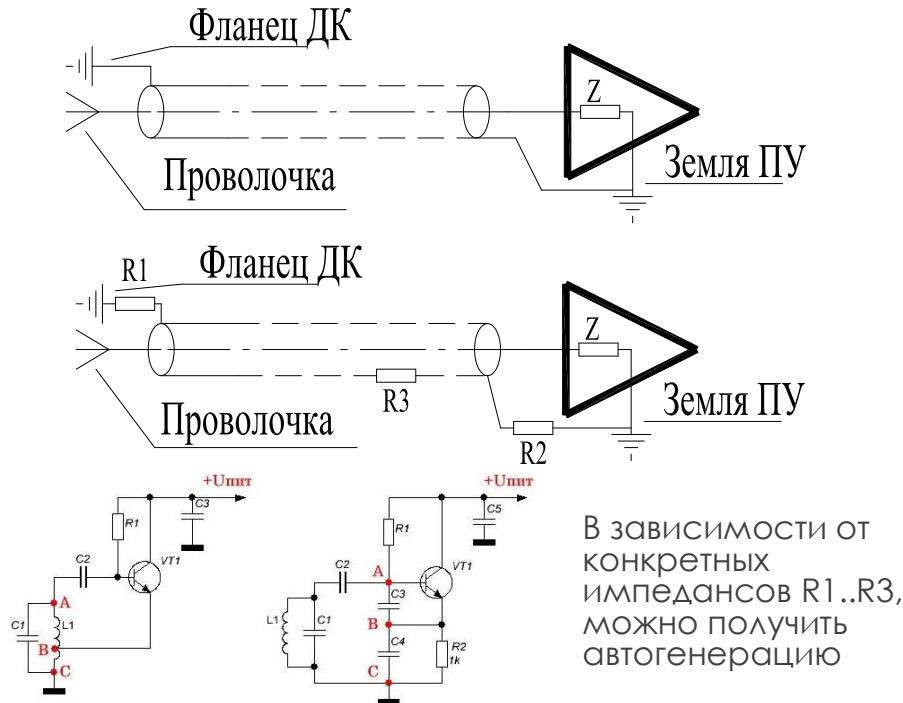
- ▶ **Коаксиальные системы:** Естественная среда сигнала в ДК. ($\rho \sim 300\text{ }\Omega\text{m}$)
 - ▶ Типовые значения импедансов $50\text{ }\Omega$, $75\text{ }\Omega$.
 - ▶ Диаметры (по внутреннему изолятору) 1, 1.5, 2, 4мм. Есть 0.6мм.
 - ▶ Высокая стоимость самого кабеля, работы с кабелем
 - ▶ Низкая надёжность из-за нагартовки центральной жилы



- ▶ Плотность повива для малых диаметров 82..90%
- ▶ Высокое сопротивление связи
- ▶ Сопротивление слишком высоко для деления заряда, слишком низко для стереометрии.
- ▶ Применяются на участке от камеры до предусилителя.



Системы транспорта сигналов

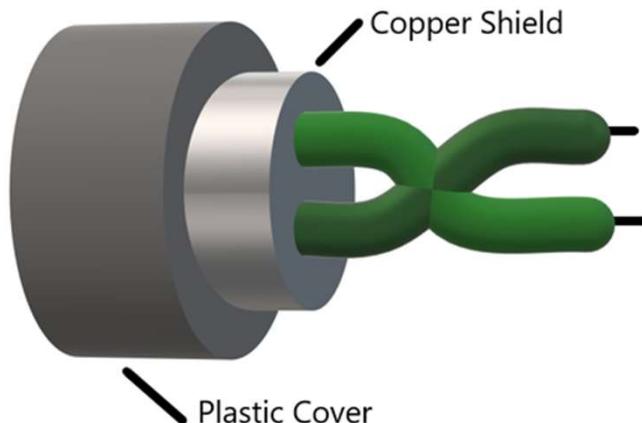


- ▶ **Коаксиальные системы:** Естественная среда сигнала в ДК. ($\rho \sim 300\text{ }\Omega\text{м}$)
- ▶ Типовые значения импедансов кабелей - 50_Ом, 75_Ом.
- ▶ Элемент R2 продольное сопротивление оплётки, омическое - сопротивление связи.
- ▶ Элементы R1, R3 – сопротивление связи, в основном индуктивное. $\sim 1\text{nГн}/\text{мм}$, т.е. 0.6 Ом/мм@100МГц
- ▶ Сопротивление связи – ворота для наводок и возможность самовозбуждения ПУ



Системы транспорта сигналов

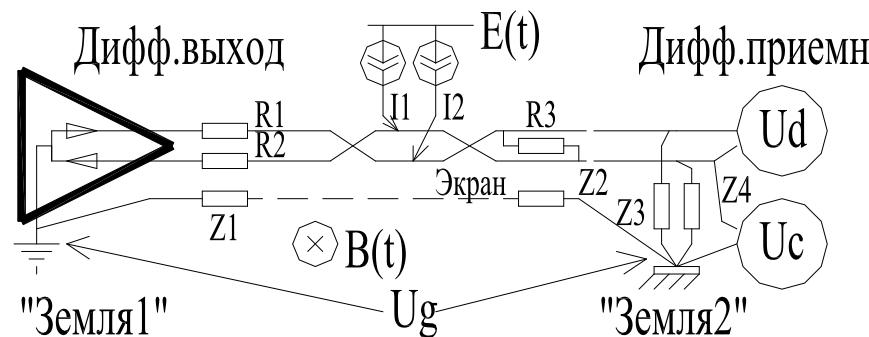
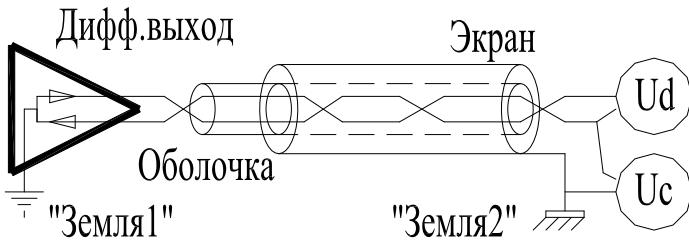
- ▶ **Симметричные линии: витые пары.** Традиционно используются в ДК для транспорта от предуслителей до регистрирующей аппаратуры.
- ▶ Для низкого переходного затухания важна симметрия линии, а не сопротивление связи и плотность повива экрана.
- ▶ Относительно низкая стоимость.



- ▶ Важно: требуется высокая симметрия выходов предуслителя, высокая симметрия приёмника сигнала.
- ▶ Высокая дисперсия сигнала!
- ▶ Габариты



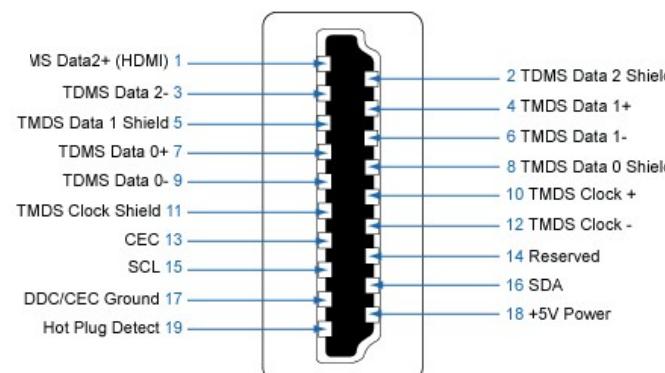
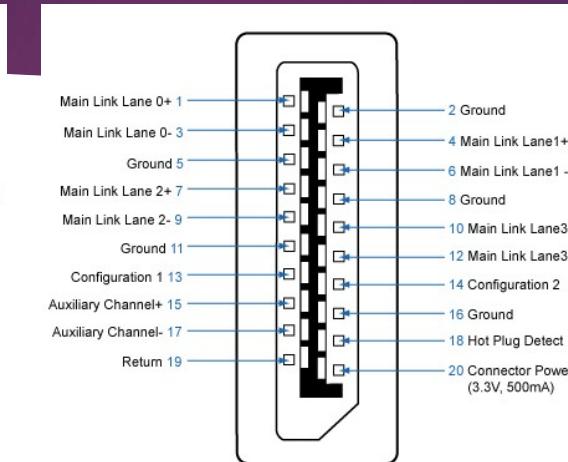
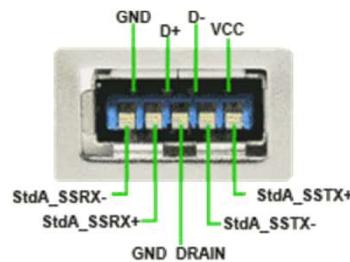
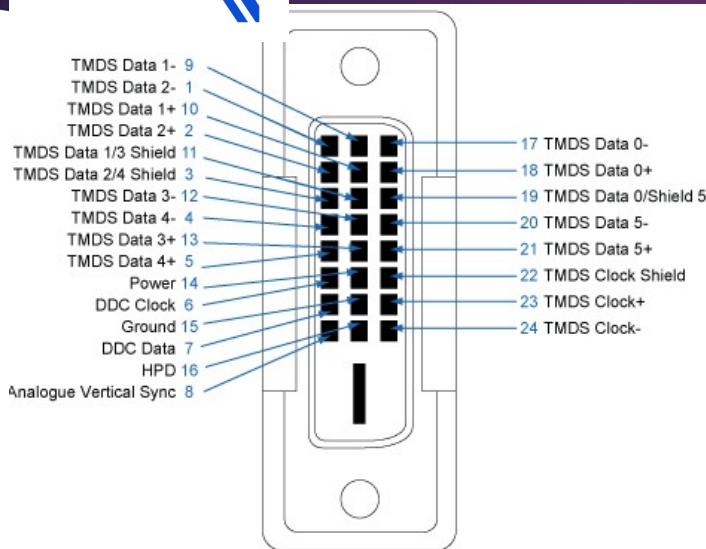
Системы транспорта сигналов



- ▶ **Симметричные линии: витые пары.**
Волновое сопротивление 130..110_Ом без экрана/с экраном. Даже если экран никуда не подключен.
- ▶ Важно:
 - ▶ Симметрия ЭДС плеч ПУ
 - ▶ Симметрия выходного сопротивления плеч ПУ
 - ▶ Симметрия входных плеч ДП
- ▶ ! Высокая симметрия затруднительна при дискретном ПУ.
- ▶ $E(t)$ зависит от способа подключения экрана через $Z1, Z2$.



Системы транспорта сигналов

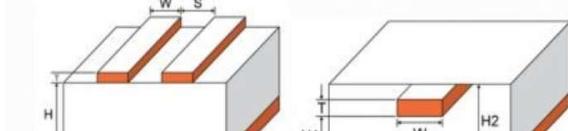


Тип кабеля	TWP	Диам.
DVI	7	~9mm
HDMI	4	~7mm
Display port	4	~7mm
USB3	3	~4mm
Ethernet	4	~5mm

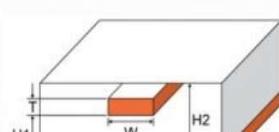


Системы транспорта сигналов

- ▶ **Гибкие печатные платы:** симметричные, несимметричные, любой импеданс.
- ▶ Низкое сопротивление связи, малые габариты. В наличии 31пин, заказ на 40пинов.



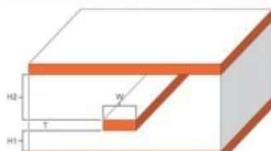
Edge-Coupled Microstrip



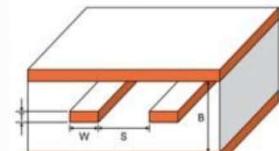
Embedded Microstrip



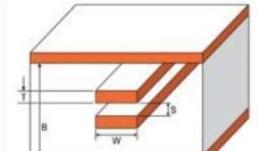
Symmetric Stripline



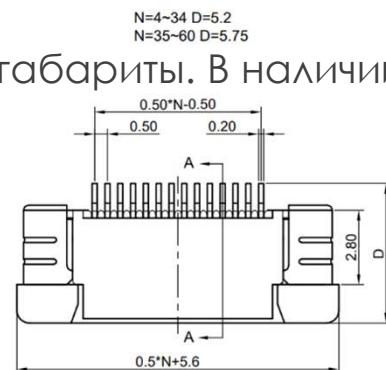
Asymmetric Stripline



Edge Coupled Stripline

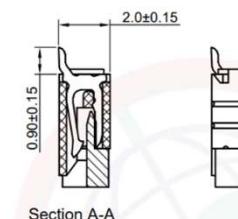


Broadside-Coupled Stripline

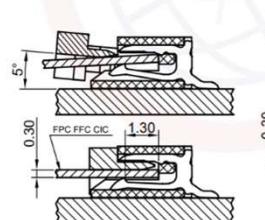


N=No. of contacts

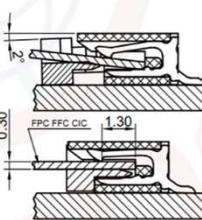
$(N-1)*0.5$



Section A-A



Lower contact side



Upper contact side





Системы транспорта сигналов

- ▶ Гибкие печатные платы: Технологические возможности «Электроконнект»

Проводник / зазор	до 0,15 мм
Отверстие / площадка	до 0,3 мм / до 0,5 мм
Размер платы, до	340 мм x 200 мм
Доступные финишные покрытия	Иммерсионное золото Иммерсионное олово

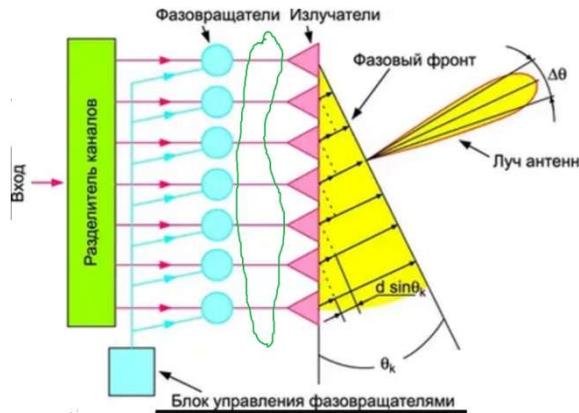
Материал	Толщина
Препрег нетекущий TU-84P NF 1080	0,068
Полиимид ThinFlex W-2005RD	0,018/0,05/0,018 (фольга/полиимид/фольга)
Покрывающая пленка Pyralux LF0120	0,05/0,025 (полиимид/адгезив)
Покрывающая пленка Pyralux LF0110	0,025/0,025 (полиимид/адгезив)

- ▶ Китайские производители до 1.7м



Системы транспорта сигналов

► Фотонные радары:



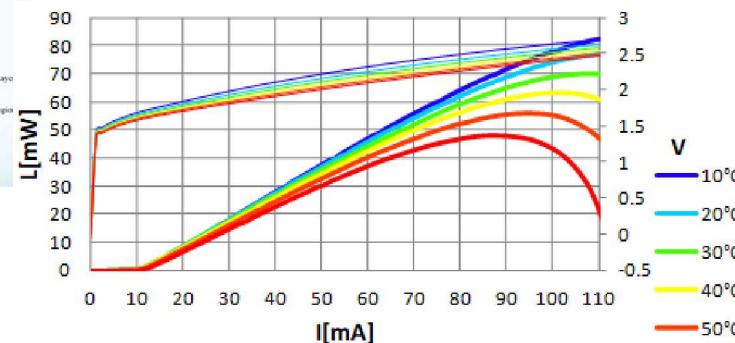
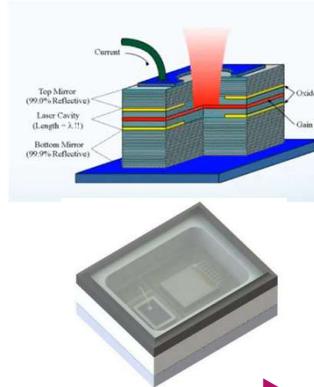
- Транспорт сигналов от антенны до электроники ~30..50м
- Медные среды: затухание, перекрёстные помехи, масса, нагартовка
- Оптические линии: нет затухания, нет перекрёстных помех, малая масса, нет нагартовки

- Прямая модуляция светового потока лазера сигналом RF
- Оптические микросхемы, модулирующие световой поток накачивающего CW лазера
- Большой динамический диапазон
- Тяжёлые условия
- Высокая стоимость
- Передача питания на недоступные объекты 10..100км



Системы транспорта сигналов

- **Оптический вывод в аналоговой форме** возможен для ДК, если не требуется высокого амплитудного разрешения. Современные лазеры VCSEL работают в диапазоне порогов 5..10mA(5мВт), 10..20mA(40мВт).



► OSRAM PLCC 2030 5мВт, 40мВт

- Можно работать с пластиковым волокном 1мм без прецизионного коннектора.
- Пластиковые волокна стандартные 2мм, 1мм, 0.75мм, 0.5мм, 0.25мм



Car LIDAR VCSEL matrix



- Многоволоконный оптический кабель 50/125
- 8 волокон – диаметр 5.5мм, изгиб Rx10
- 16 волокон – 7.1мм

- Использовать наработки по Снж
- Есть китайские производители.



Системы транспорта сигналов

► Среды вывода в аналоговой форме:

Тип системы	Полоса пропускания	ЭМ совместимость	Стоимость	Габарит
Коаксиальная	ПТ – 1ГГц	Низкая	200..300р/м	Умеренный/Большой
Симметричная	ПТ – 300МГц	Умеренная	50..100р/м	Умеренный
Гибкие ПП	ПТ – 1ГГц	Высокая	300..500р/м	Малый
Оптическая – Фотонный радар	3..10ГГц	Идеальная	~1..10M/канал	Большой
Оптическая – ДК**	0.01..100МГц	Идеальная	500..1000р/канал	Умеренный/Малый

► **Использовать наработки по Снж

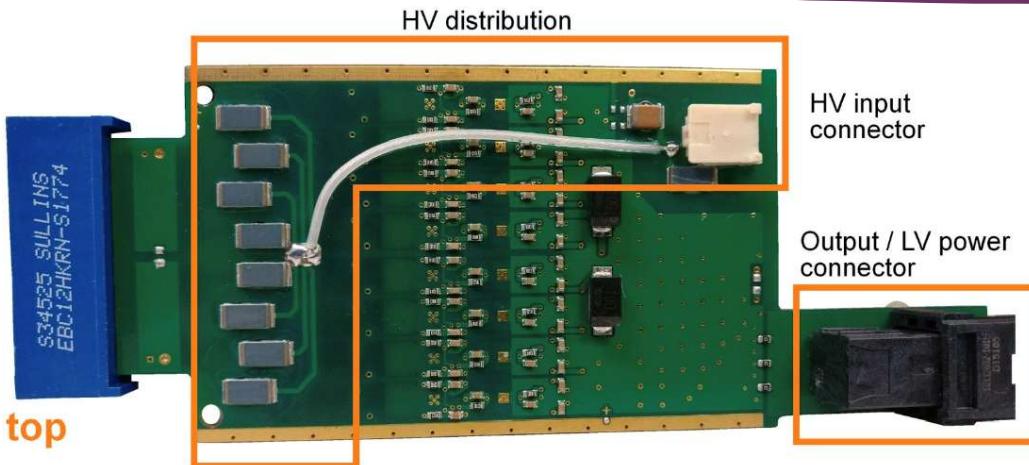


Системы высоковольтного питания

- ▶ Напряжения по модулю 2..3кВ КМД, до 6.8кВ КЕДР
- ▶ Полярность: Высокое на полевых или чувствительных проволоках
- ▶ Фильтры высокого напряжения, запасённая энергия. Пассивные и активные.
- ▶ Снижение напряжения на перепусках. ?
- ▶ Ограничение тока при пробое и высокой загрузке ?



Системы высоковольтного питания

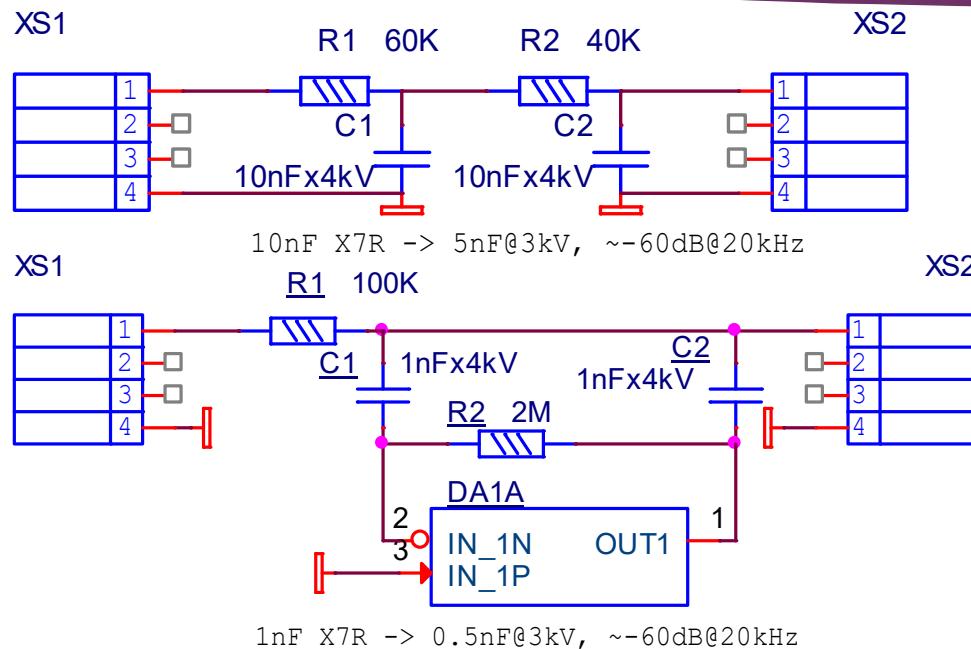


- ▶ Предусилитель МЕГ. Полярность положительная: Высокое на чувствительных проволоках
- ▶ Схема высокого напряжения занимает больше половины площади ПУ.
- ▶ Нет ограничения тока при пробое! ПУЭ???

- ▶ Пример КЕДР: ПУ на одном торце, ВВ на другом торце
- ▶ Пример КМД: считывание и ВВ в перемешку на обоих торцах, ПУ не влезают
- ▶ Деление заряда при ВВ на чувствительных проволочках затруднено.
- ▶ Большое число разделительных конденсаторов и резисторов
- ▶ Большая запасённая энергия



Системы высоковольтного питания

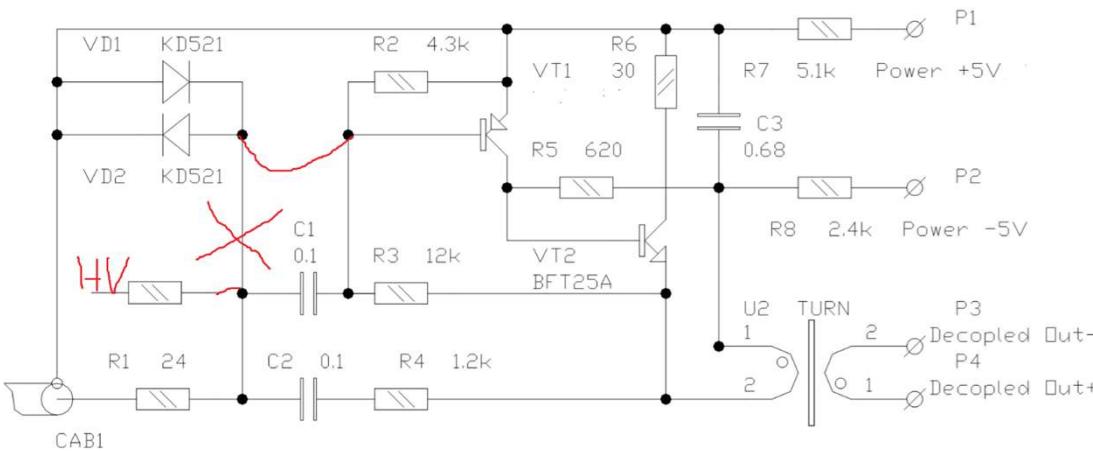


- ▶ Примеры пассивного и активного фильтров 2-ого порядка.
- ▶ Для подавления пульсаций 100мВ питание ОУ достаточно 12В.
- ▶ Если ОУ высоковольтный, можно снижать на перепусках быстро.

- ▶ **Как снизить запасённую энергию?**
- ▶ Пассивный ФНЧ запасает большую энергию в конденсаторах
 - ▶ Требуется многозвездочный RC фильтр, большой размер
- ▶ Активный фильтр требует существенно меньших ёмкостей конденсаторов
 - ▶ Меньше размер, меньше запасённая энергия, возможность быстро изменять напряжение
 - ▶ При пропадании питания превращается в маленький пассивный.



Системы высоковольтного питания



- ▶ Пример раздельного подключения развязывающих конденсаторов, ПУ КМД-3. С исправлениями можно использовать для ВВ.
- ▶ С1 – развязка цепи входа.
- ▶ С2 – развязка цепи параллельной ООС по напряжению.
- ▶ Эквивалентная ёмкость 1.2мкФ, необходимая для деления заряда.

- ▶ **Как снизить запасённую энергию?**
- ▶ Стандартная развязывающая цепь ПУ запасает большую энергию в конденсаторах
 - ▶ Требуется относительно большой R1, что ухудшает шумы
- ▶ Разделённая развязывающая цепь требует существенно меньших ёмкостей конденсаторов
 - ▶ Меньше размер, меньше запасённая энергия, возможность быстро изменять напряжение
 - ▶ Небольшой R1



Системы калибровки электронного тракта

- ▶ Высокие требования на точность амплитуды для деления заряда.
- ▶ Высокие требования на перекрёстные наводки.
- ▶ Высокие требования к отсутствию «земляных» контуров.
- ▶ Могут выполняться совмещёнными с ВВ системой, или ПУ.
- ▶ Лазерные калибровки, радиоактивные источники.



Системы мониторинга и стабилизации

- ▶ Контроль и стабилизация температуры ДК
- ▶ Контроль давления газа ДК
- ▶ Контроль и стабилизация магнитного поля датчиками ЯМР
- ▶ Контроль однородности магнитного поля датчиками Холла
- ▶ Контроль механического положения ДК
- ▶ Отвод тепловой мощности от электроники



Системы мониторинга и стабилизации



Побудители движения воздуха

Пьезоэлектрические

Пневматические

Гидравлические



Отвод тепловой мощности от электроники: торцы надо охлаждать водой, а от торцов – охранную среду ДК.

- ▶ Теплоотдача в приповерхностном слое $(2+2V) \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{K})$, $V[\text{м}/\text{с}]$
- ▶ $S \rightarrow 10..100 \text{ м}^2$???
- ▶ $\Delta T \rightarrow 10..40 \text{ }^\circ\text{K}$???
- ▶ $V \rightarrow 2..10 \text{ м}/\text{с}$???



Электроника ДК

Большая задача

- ▶ Механический конструктив в зазоре между фланцем ДК и торцевым железом
 - ▶ Крепление предусилителей
 - ▶ Крепление кабелей
 - ▶ Обеспечение «земель» в смысле низкого сопротивления связи
 - ▶ Обеспечение продуваемости для съёма тепла (охранная среда)
 - ▶ Безопасность по высокому напряжению (зазоры, острые края)
- ▶ Механическое крепление самой камеры относительно криостата магнита



Электроника ДК

О чём нельзя забывать!

- ▶ Транспорт пучков
 - ▶ Конструктивные меры, ограничивающие проникновение ВЧ
- ▶ Питание линз
 - ▶ Конструктивные меры, ограничивающие распространение импульсных помех сильноточных источников
- ▶ Транспорт тока, LHe, LN₂, СП магнита
 - ▶ Конструктивные меры, ограничивающие распространение помех со стороны насосов, арматуры, блюжающих токов трубопроводов общего пользования – гелий, азот, вода, вентиляция, сеть питания
- ▶ Транспорт блюжающих токов опор
 - ▶ Конструктивные меры, ограничивающие распространение блюжающих токов конструкций, установки и здания в целом
- ▶ Транспорт токов, охватывающих ярмо магнита
 - ▶ Конструктивные меры, ограничивающие намагничивание ярма переменными токами



Электроника ДК

- ▶ Определён круг задач с точки зрения электроники и её функционирования
- ▶ Возможные подходы сформулированы
- ▶ Приглашаем заинтересованных товарищей к проработке решений и тестам



Электроника ДК

С чего начать?

- ▶ Собственно ДК:
 - ▶ Имеется макет ДК, x64 ячейки нужно разработать несущую механическую конструкцию
 - ▶ Уточнение ТЗ на предусилители, от «физического» смысла к «электронному»
 - ▶ Начинаем работу над ПУ на основе ИС сонара PGA5807 8каналов, 75МГц
 - ▶ Обсуждения/разработка/изготовление образцов оптического транспорта
 - ▶ Разработка/изготовление тестовых образцов транспорта на ГПП
- ▶ Служебные системы
 - ▶ Обсуждения/разработка/выдача ТЗ систем транспорта криогенных жидкостей и токов систем СП магнита, учитывающих электро-магнитную совместимость

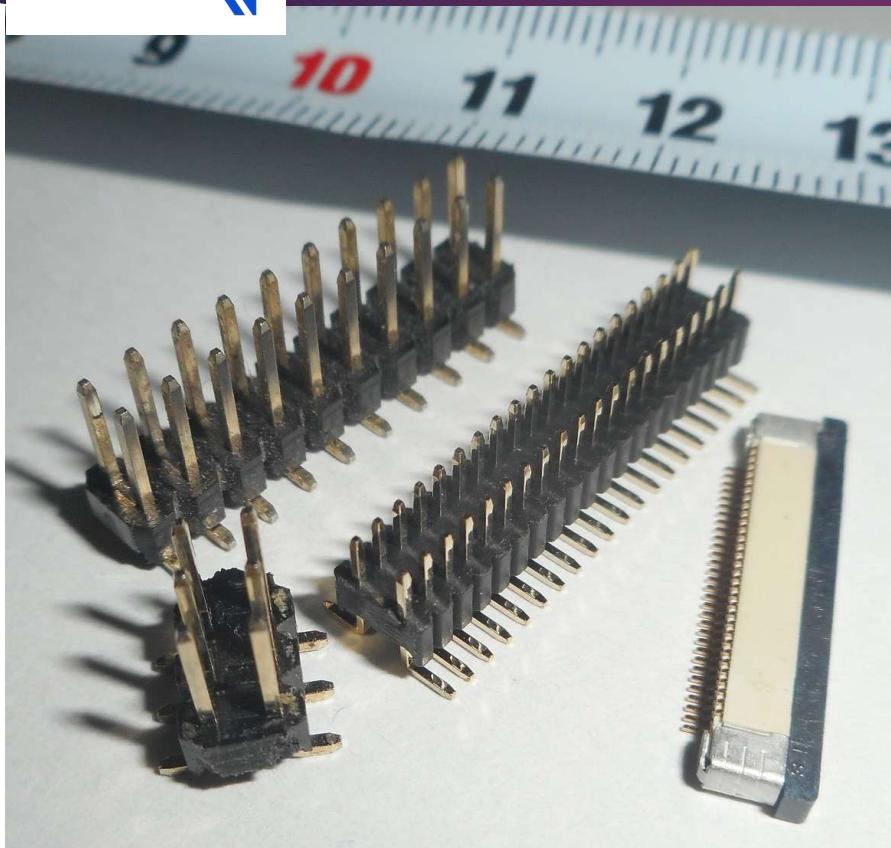


Электроника ДК

Спасибо за внимание!



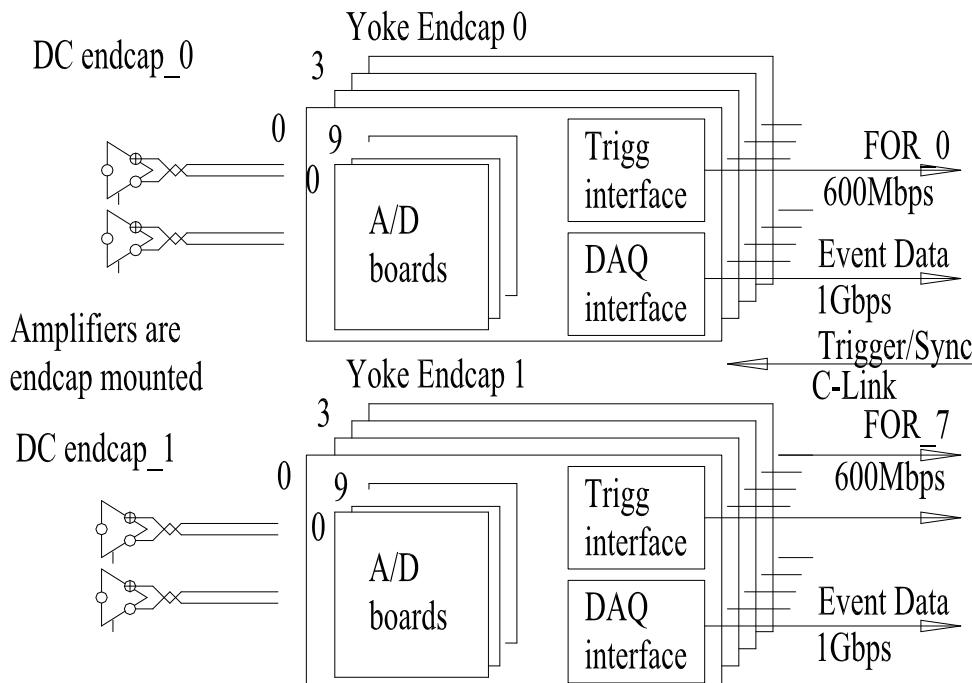
Системы электронного тракта



- ▶ Электрические разъёмы, имеющие механическую прочность.



Электроника ДК



- ▶ Предусилители непосредственно на камере, электроника на ярме
- ▶ Элементная база SiGe транзисторы 7-ого поколения.
- ▶ Питание усилителей 1.8В, ток <4mA, <7мВт/канал.
- ▶ Гибкие печатные платы для транспорта сигналов ПУ
- ▶ На КМД-3 используются SiGe BJT 2-ого поколения, 8мВт/канал.
- ▶ Электроника в конвейерном (пайплайн) режиме, с «длинным» триггером.
- ▶ Восемь конструктивов электроники, по четыре на торец там, где сейчас ТОФ.
- ▶ Компоненты ~\$30/канал