



Системы стохастического охлаждения

И.Горельшев

Охлаждение пучка. Что это?

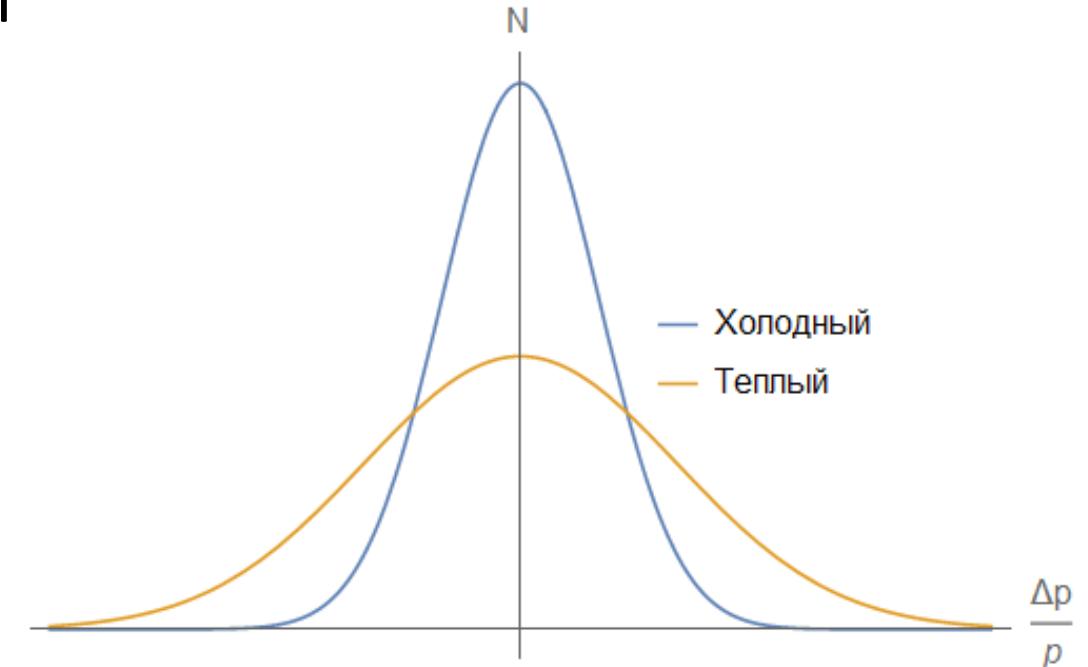
Охлаждение – уменьшение температуры

$$\frac{3}{2}kT = \frac{1}{2}m\langle \vec{V}^2 \rangle$$

Переход между системами отсчета:

лабораторная <-----> пучок

$$\frac{3}{2}kT = \frac{1}{2}m\langle (\vec{V} - \vec{V}_0)^2 \rangle$$



температура <-----> разброс по импульсу и/или амплитудам колебаний



Охлаждение пучка. Зачем?

Ключевой параметр ускорительной установки – светимость

Светимость – число событий в единицу времени

Число событий пропорционально плотности частиц

1. Охладить при накоплении:

Сильнее охлаждая – больше накопится

2. Препятствовать нагреву при эксперименте:

Предотвращая нагрев – меньше теряется

История

С. в.-д. Меер	1968	Идея
CERN (Женева)	1971-1975	Развитие теории
CERN (Женева)	1975-1978	Экспериментальное подтверждение и применение
ИЯФ, Новосибирск	1979-1982	Эксперименты и развитие теории на НАР-М
INS, Токио	1983-1984	Тесты на TARN
Стокгольм	1984	Нобелевская премия по физике (К.Руббия, С.в.-д.Меер)
США, Германия	1985-1992	Разработка систем в FNAL, GSI, FZJ
	1993	Развитие идей по охлаждению сгруппированного пучка
FNAL (Чикаго)	1993	Предложение по охлаждению на оптических частотах
Нью-Йорк, Дубна	2011-2013	Охлаждение сгруппированного пучка в RHIC и на Нуклоне
FNAL (Чикаго)	2021-2022	Реализация оптического стохастического охлаждения

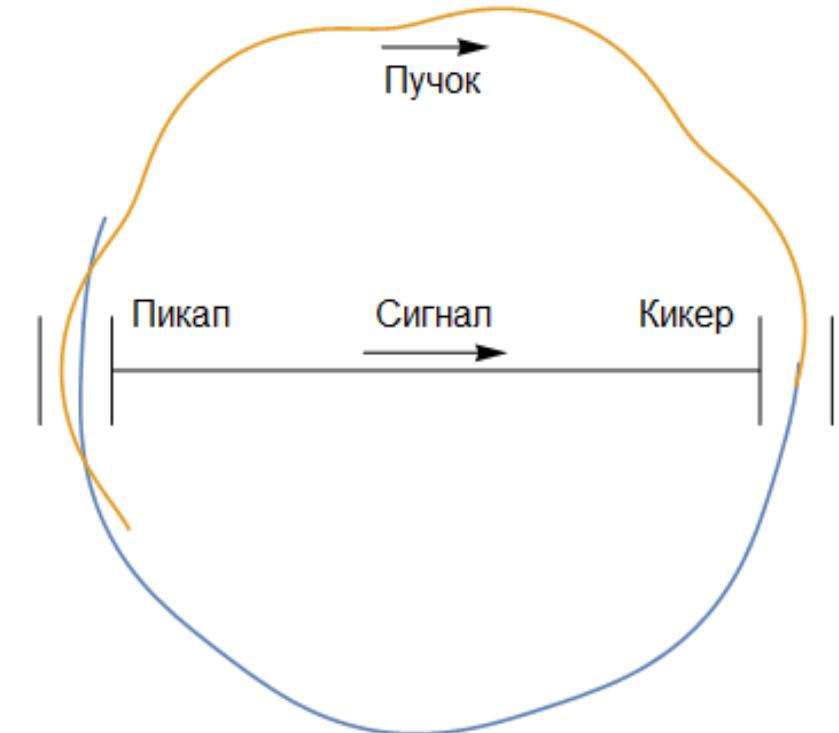
Стохастическое охлаждение. Что это?

Стохастичность – случайность (шумы)

Стохастическое охлаждение

Охлаждение пучка (случайными) шумами
от самого пучка

Широкополосная система обратной связи



Широкополосность

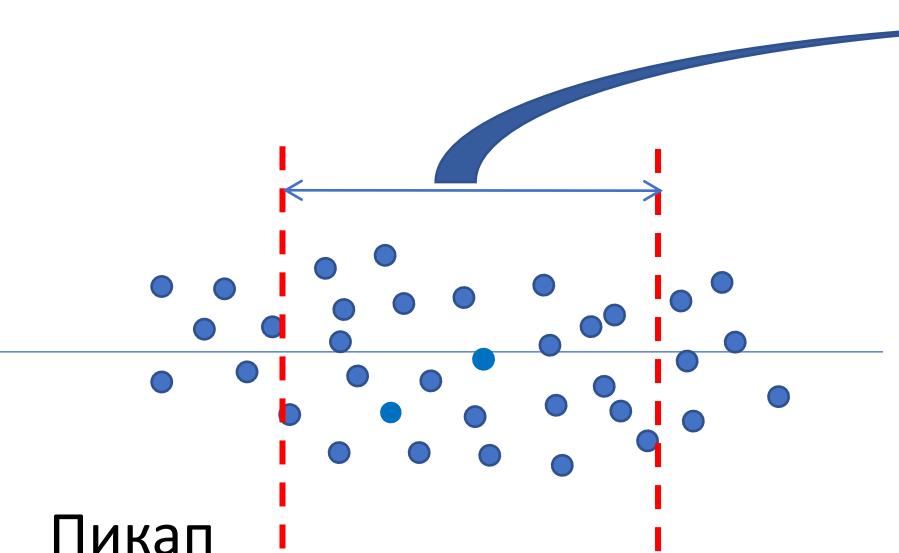
Теорема Котельникова-Найквиста:

$$W \cong 0,5 \text{ GHz}$$

$$N_s = \frac{N}{2WT}$$

Разрешающая способность

$$T_{Sample} = \frac{1}{2W} \cong 1 \text{ ns}$$

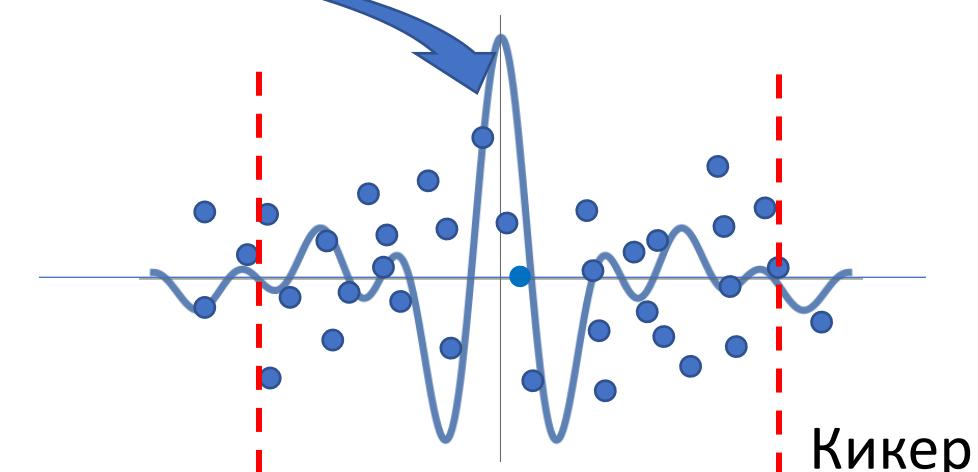


Пикап

$$\Delta x = -\lambda N_s \langle x \rangle_s = -g \langle x \rangle_s$$

T_{sys}
Пучок
Коррекция

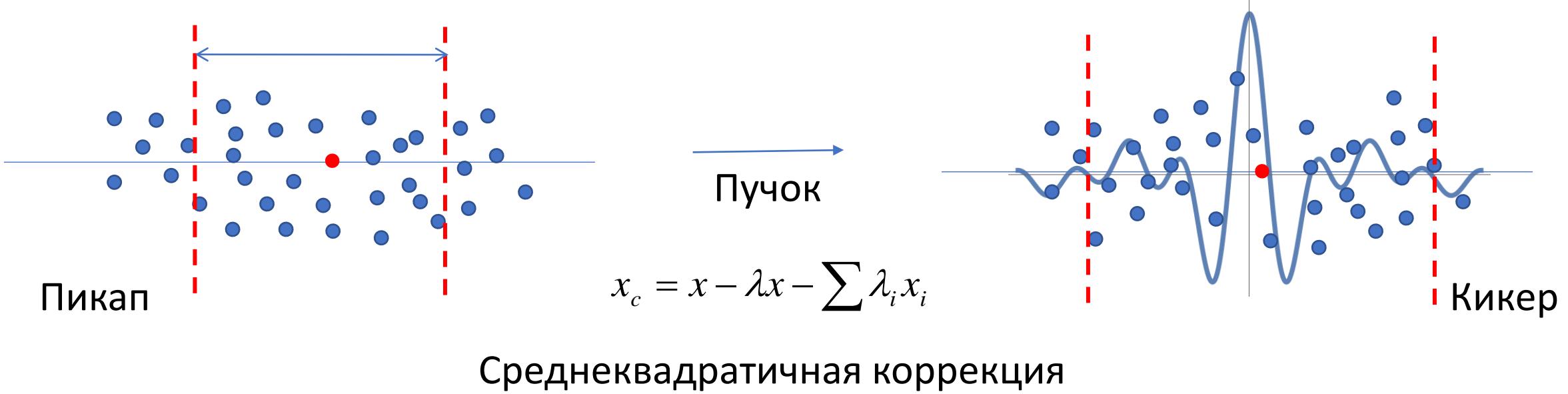
$$x(t) = x_0 e^{-t/\tau}$$



Кикер

$$1/\tau = \frac{g}{TN_s} = \frac{2W}{N} g$$

Оценка времени охлаждения



$$\Delta(x^2) = -2gx \frac{1}{N_s} \sum x_i + \left(g \frac{1}{N_s} \sum x_i \right)^2 \quad \frac{1}{\tau_{x^2}} = -\frac{1}{TN_s} \frac{\Delta x_{cp}^2}{x_{cp}^2} = \frac{2W}{N} (2g - g^2) \quad \frac{1}{\tau_x} = \frac{W}{N} (2g - g^2)$$

Собственный (когерентный) сигнал способствует охлаждению
Сигнал других частиц (некогерентный) мешает охлаждению



Системы

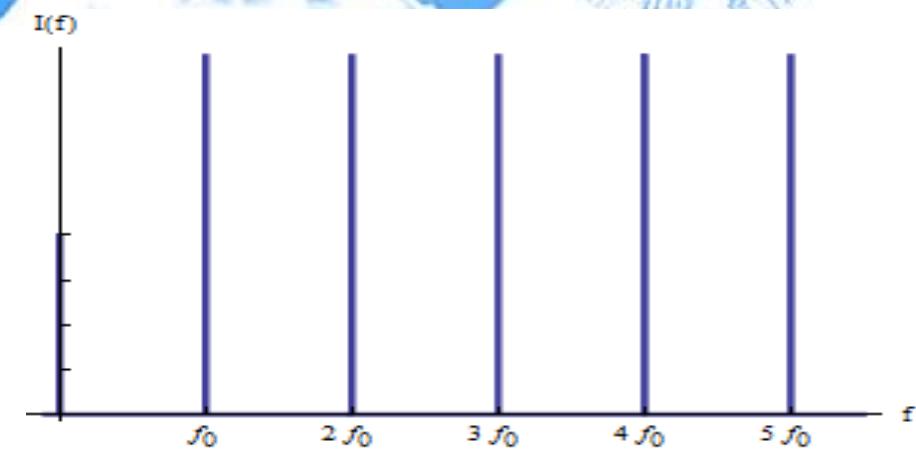
Site	Machine	Frequency (MHz)	Beam Momentum (GeV/c)	Site	Machine	Frequency (MHz)	Beam Momentum (GeV/c)
CERN	ISR	1000-2000	26.6	FNAL	ECR	20-400	0.2
	ICE	50-375	1.7-2.1		Debuncher	4000-8000	8.9
	AA	150-2000	3.5		Accumulator	1000-8000	8.9
	LEAR	5-1000	0.2-2.0		IOTA	306-325 THz	0.1
	AC	1000-3000	3.5	Tokyo	TARN	20-100	0.007
	AD	900-1650	2.0-3.5	BINP	NAP-M	100-300	0.062
FZJ	COSY	1000-3000	1.5-3.4	JINR	Nuclotron	2000-4000	3.9
GSI	ESR	900-1700	0.48/u		NICA	700-3200	2.8



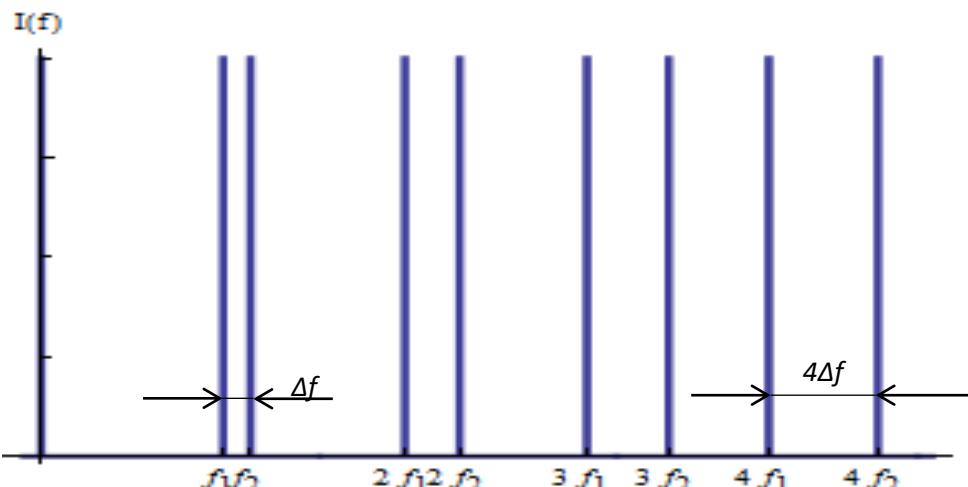
Дробовый шум пучка



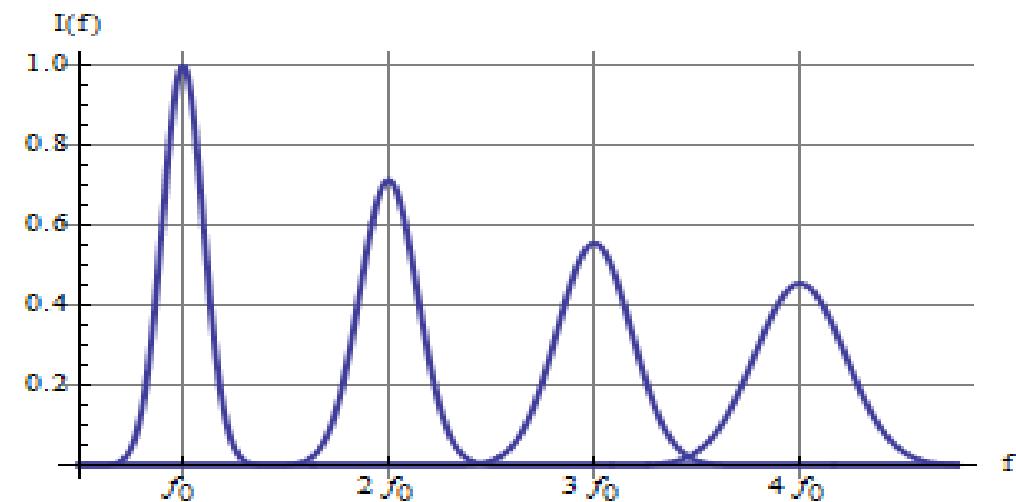
Ток частицы во временной области



Ток частицы в частотной области

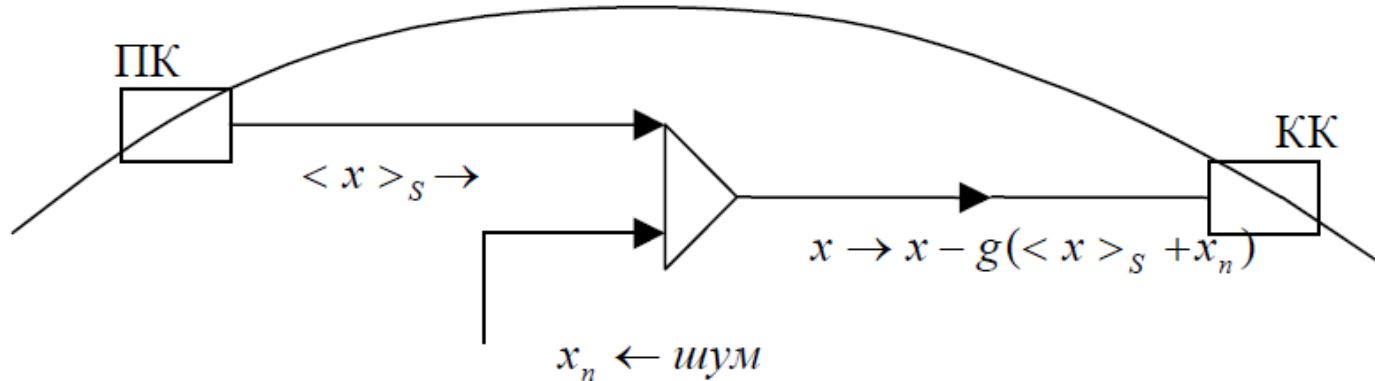


Ток двух частиц в частотной области



Дробовый шум пучка

Оценка времени охлаждения



$$\frac{1}{\tau_x} = \frac{W}{N} (2g - g^2 [1+U]) \quad U = \frac{\text{шум}}{\text{сигнал}} = \frac{\langle x_n^2 \rangle}{\langle x \rangle_s^2}$$

$$\frac{1}{\tau_x} = \frac{W}{N} (2g[1 - \tilde{M}^{-2}] - g^2[M + U])$$

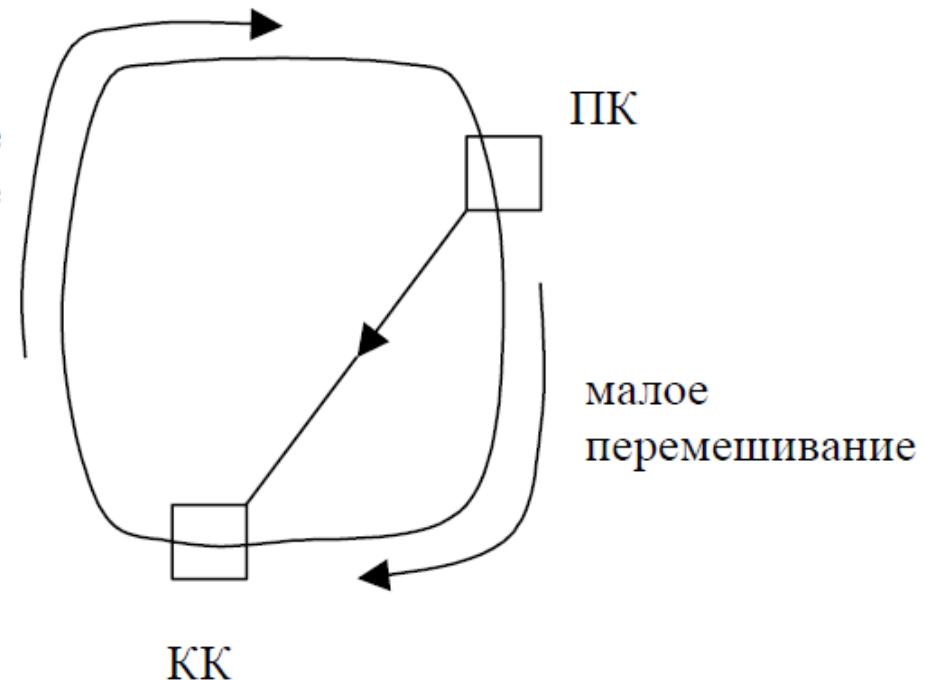
$$g_{opt} = \frac{1 - \tilde{M}^{-2}}{M + U}$$

$$\frac{1}{\tau_{opt}} = \frac{W}{N} \left(\frac{(1 - \tilde{M}^{-2})^2}{M + U} \right).$$

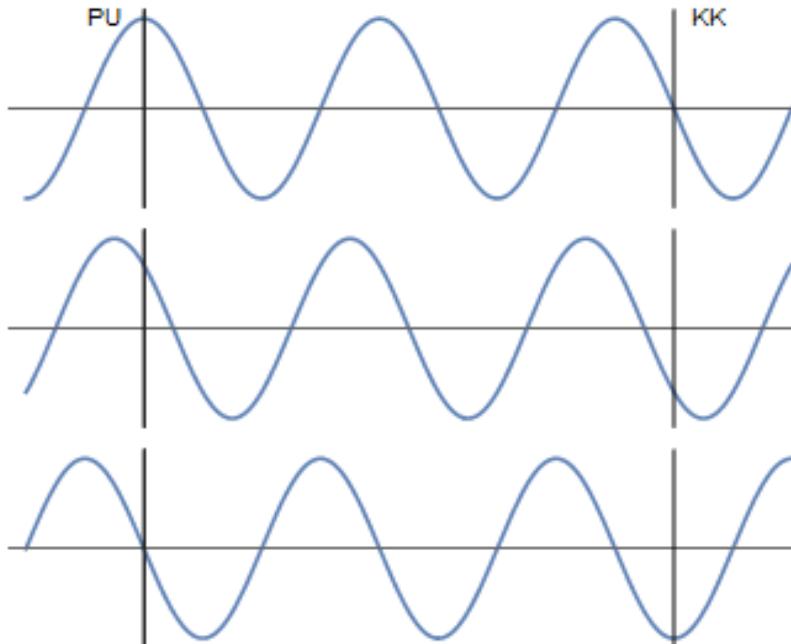
сильное
перемешивание

Перемешивание

$$M_i \sim \eta_i = \frac{\Delta T_i}{T} / \frac{\Delta p}{p}$$

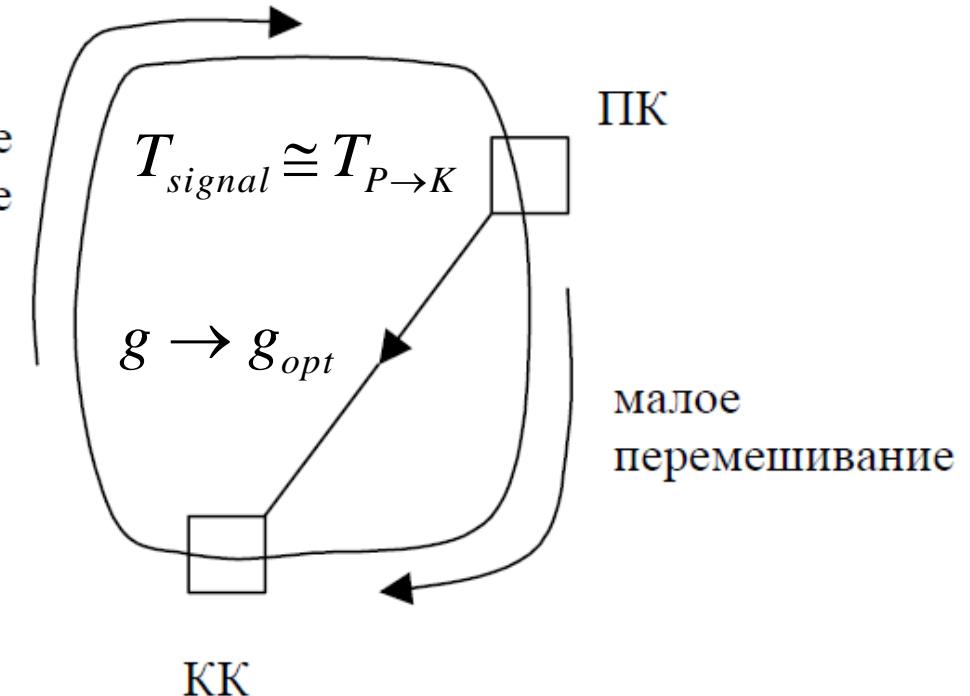


Технические условия работы



$$\Delta\varphi_{PU \rightarrow KK} = (2k + 1) \frac{\pi}{2}, k \in \mathbb{Z}$$

сильное
перемешивание



Состав оборудования

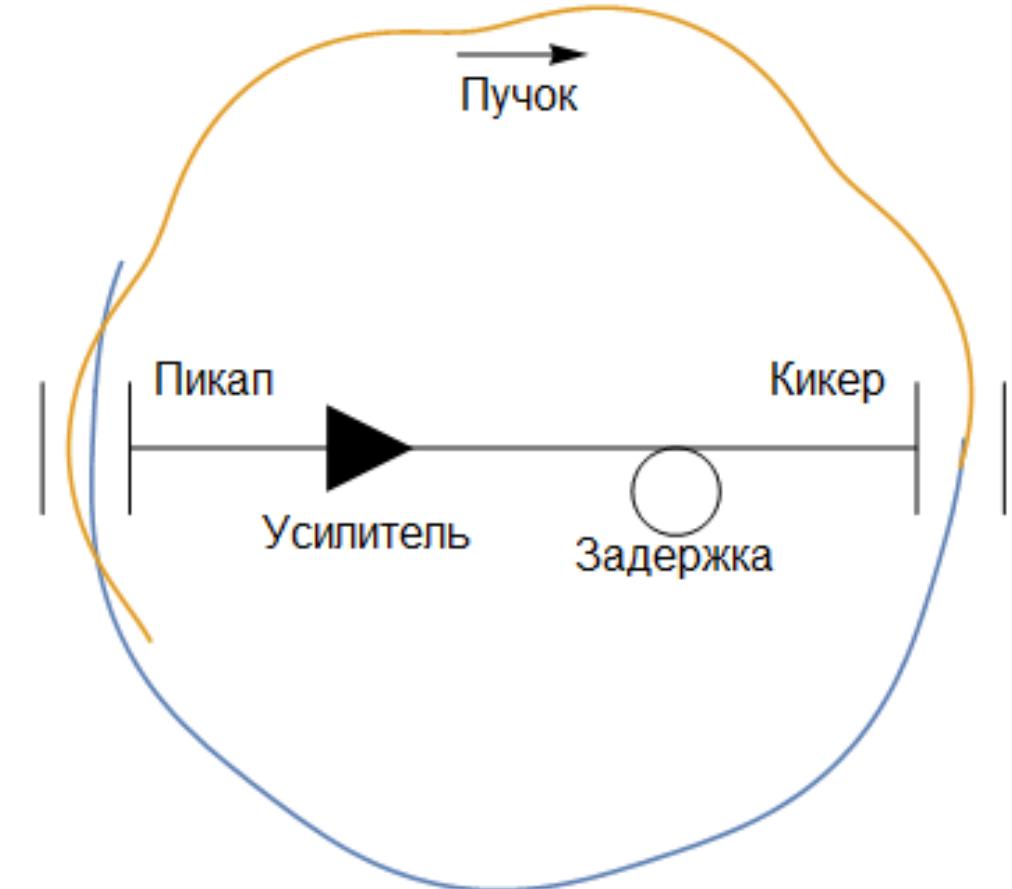
Пикап (регистрация сигнала)

Усилитель

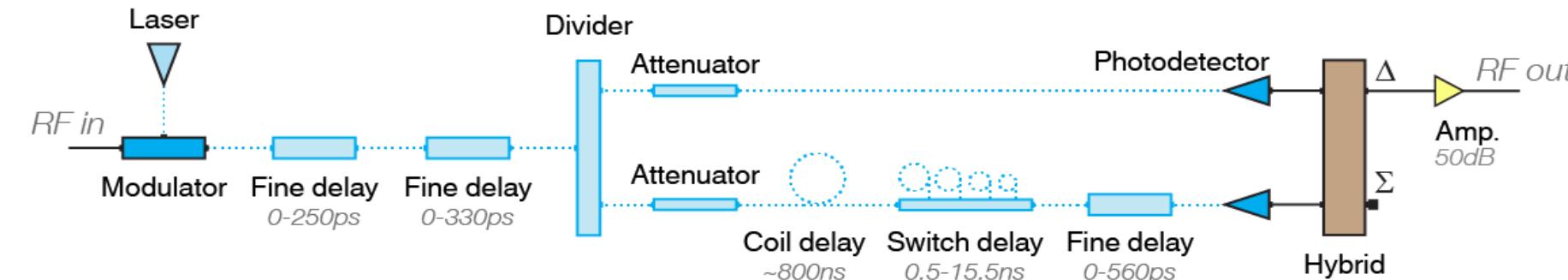
Фильтр (при наличии)

Задержка

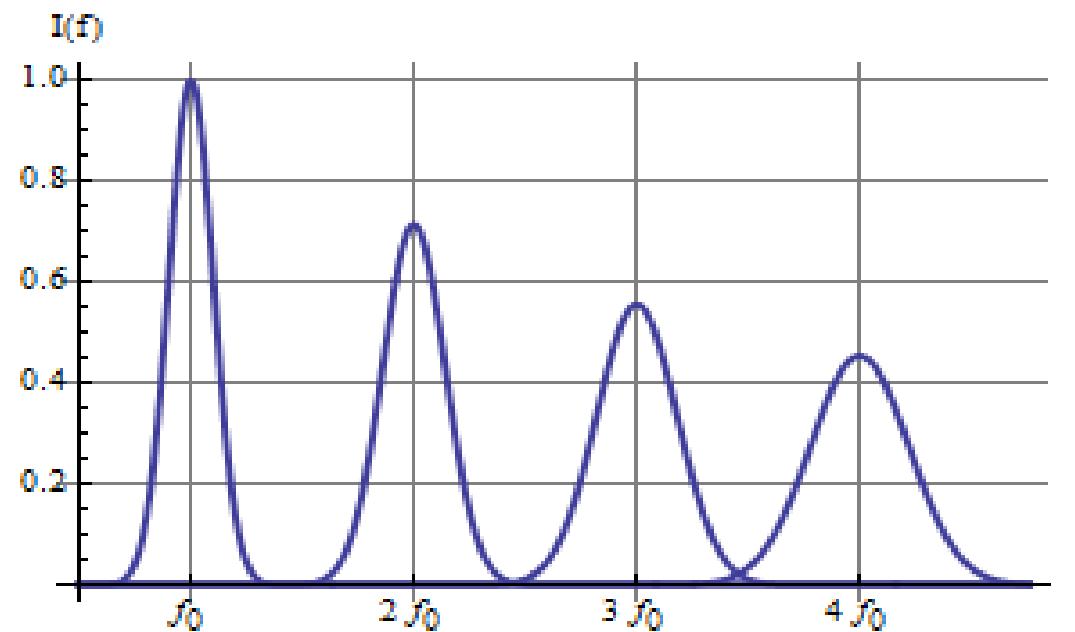
Кикер (применение сигнала к пучку)



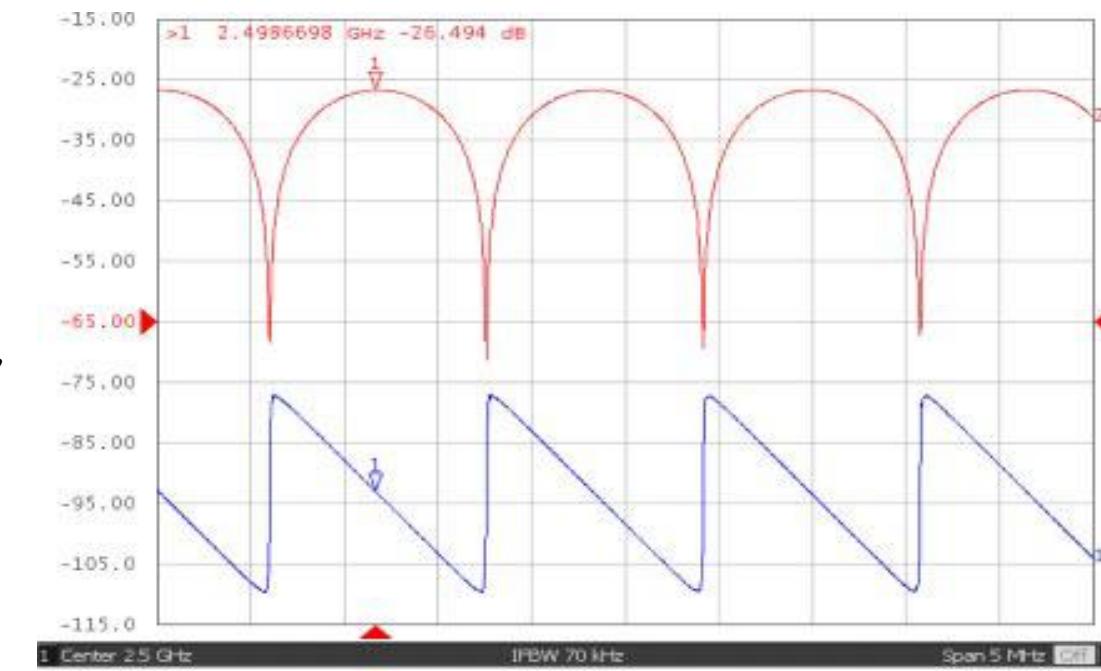
Фильтр гармоник оборотной частоты



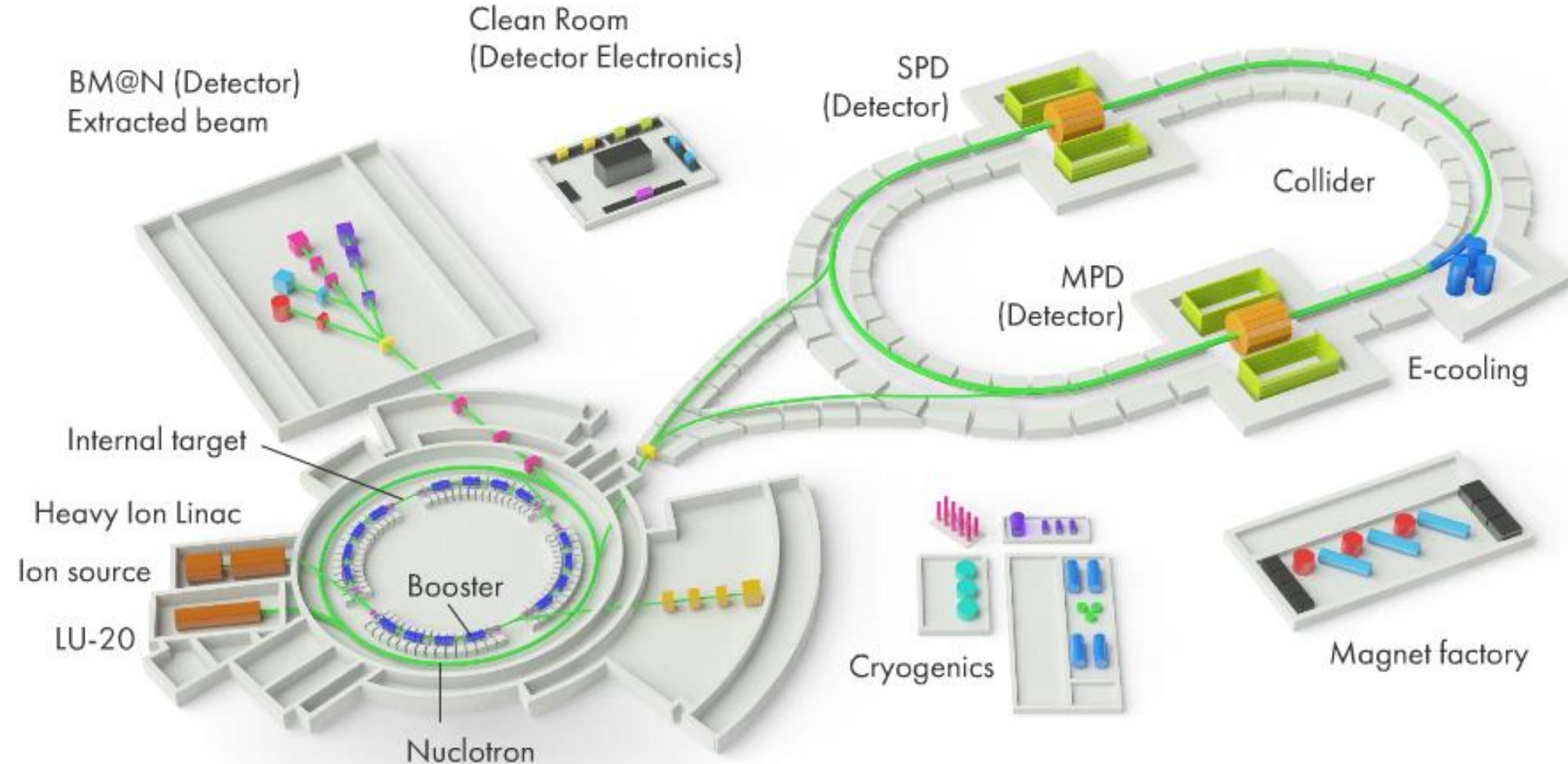
$$f_{notch} = \frac{1}{T_{LongLeg} - T_{ShortLeg}}$$



$$f_{notch} = f_{rev}$$

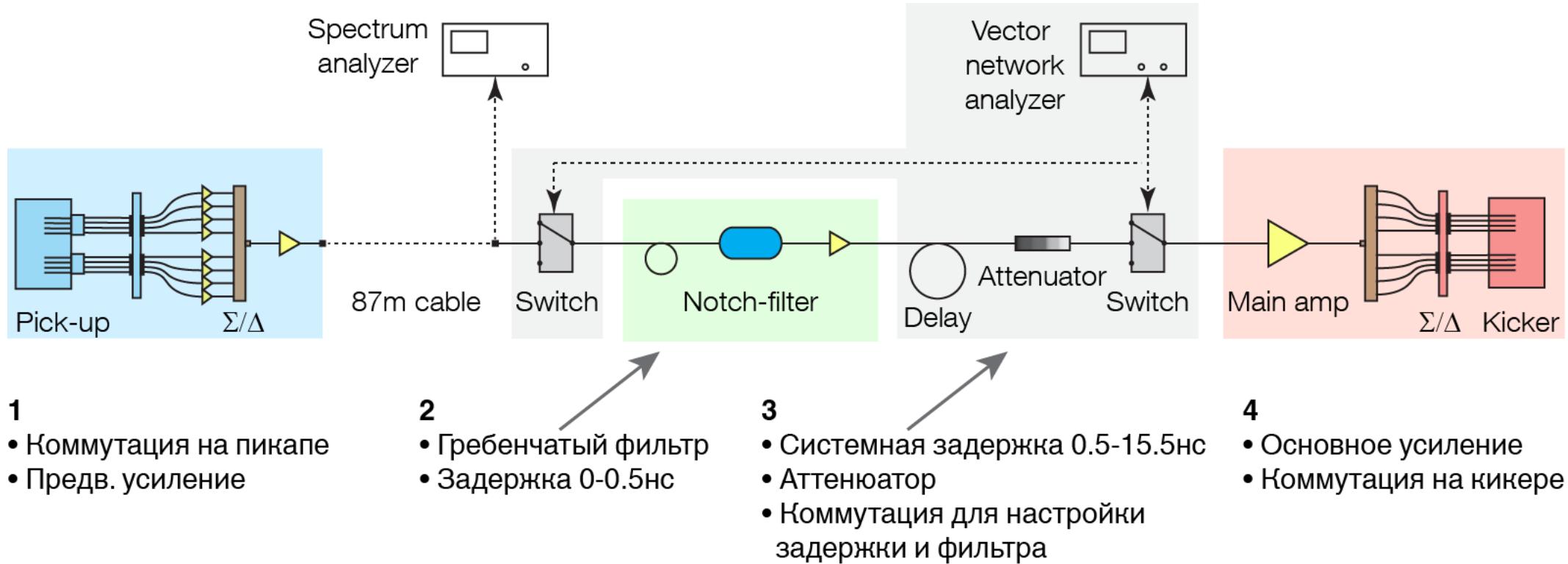


Nuclotron-based Ion Collider fAcility (NICA)



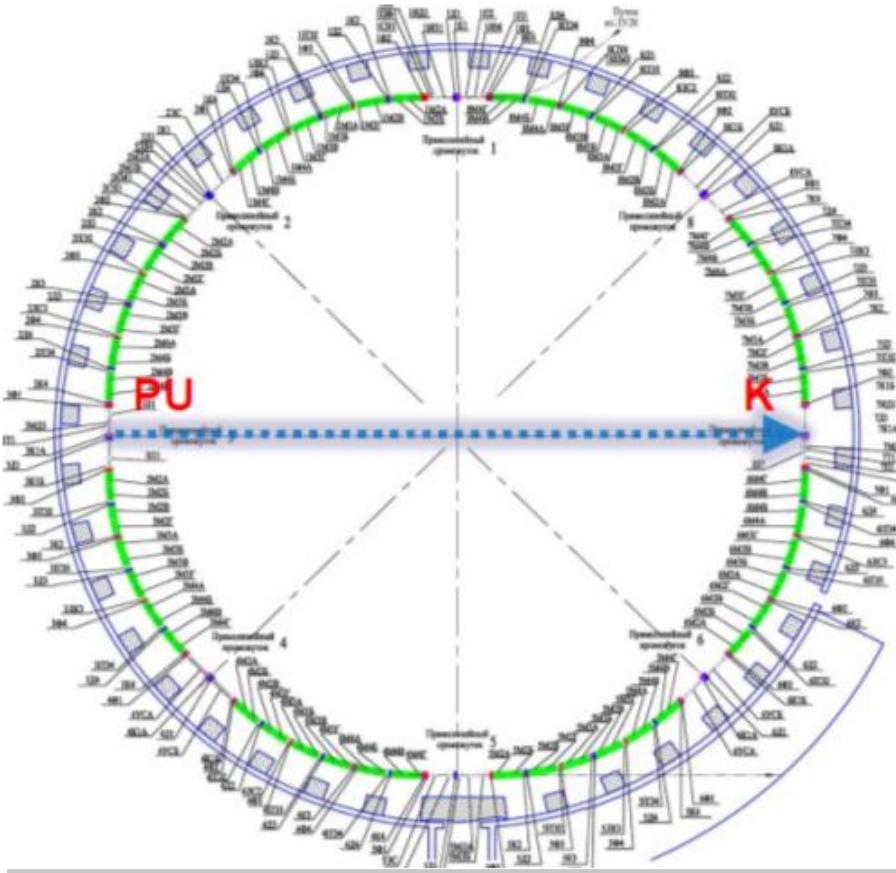


ССО Нуклotronа (прототип)





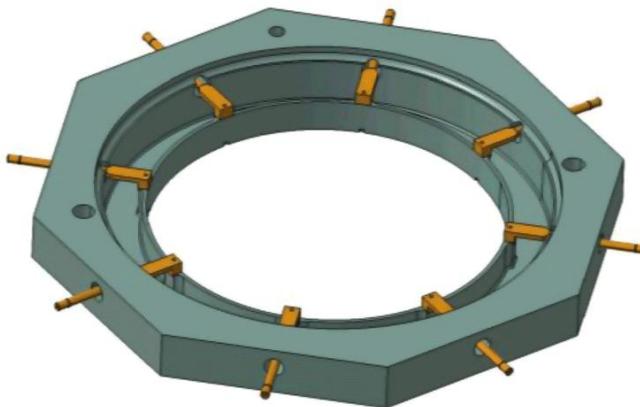
ССО Нуклotronа (прототип)



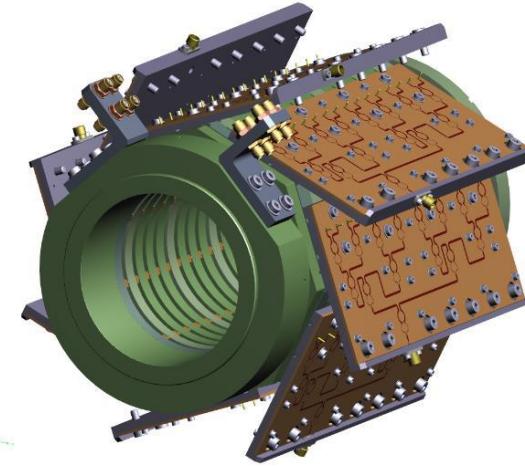
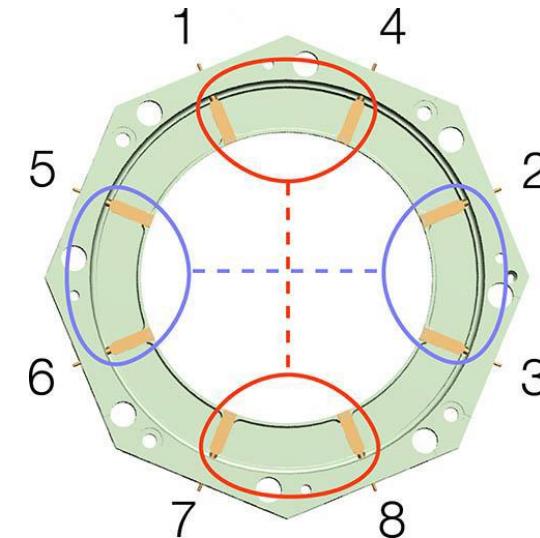
Параметр	Величина
Диапазон энергий	1,7 – 3,5 ГэВ/н
Полоса частот пропускания	2 – 4 ГГц
Средний ток сигнала в рабочей полосе пикапа	1,5 – 6 мкА
Импеданс пикапа	144 Ω
Диапазон коэффициента усиления	84 – 122 ± 0,5 дБ
Диапазон задержки	435 177 – 501 461 ± 1 пс
Импеданс кикера	576 Ω
Средняя мощность, подводимая к кикеру	80 Вт



Пикап/Кикер



Кольцо пикапа



Сборка из 16 колец

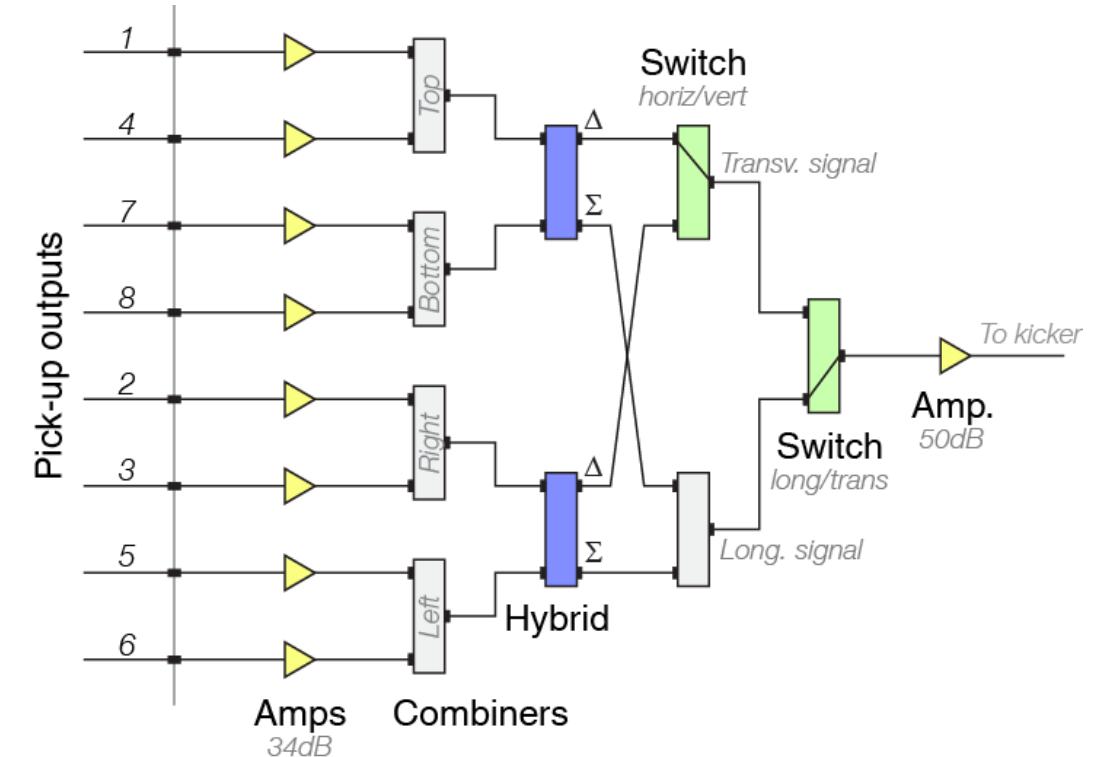
Преимущества:

Высокий импеданс (чувствительность)

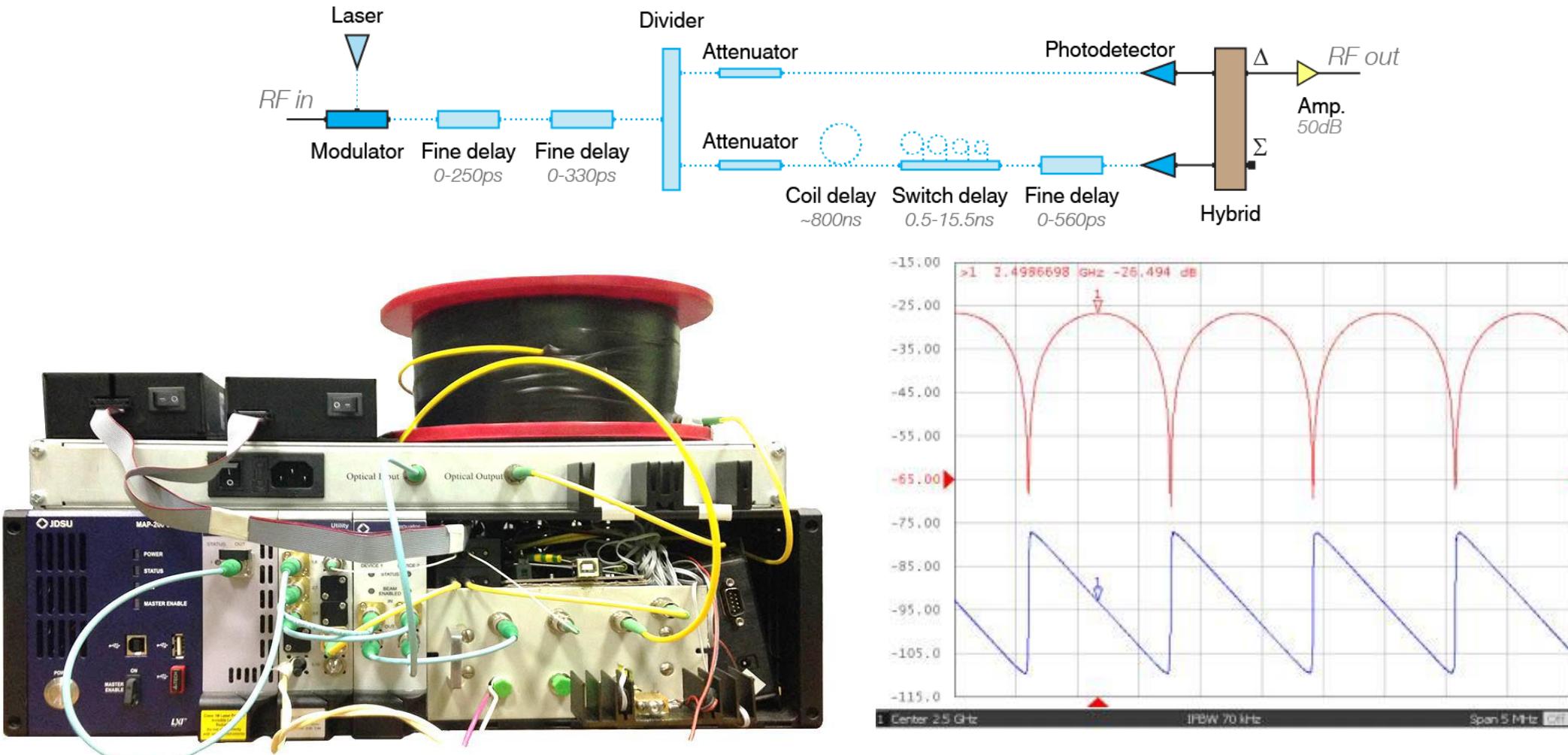
Универсальность (продольный/поперечный)



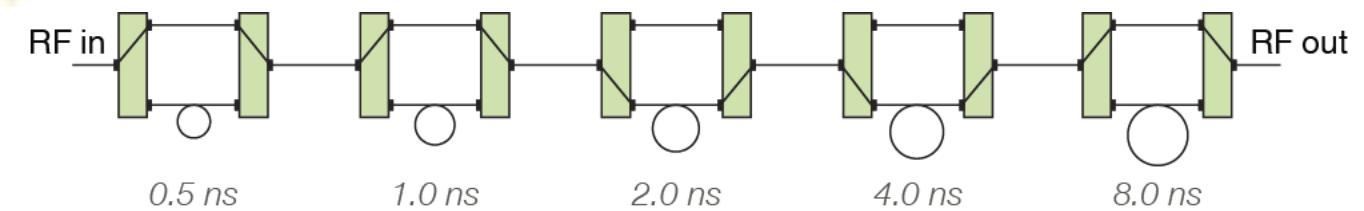
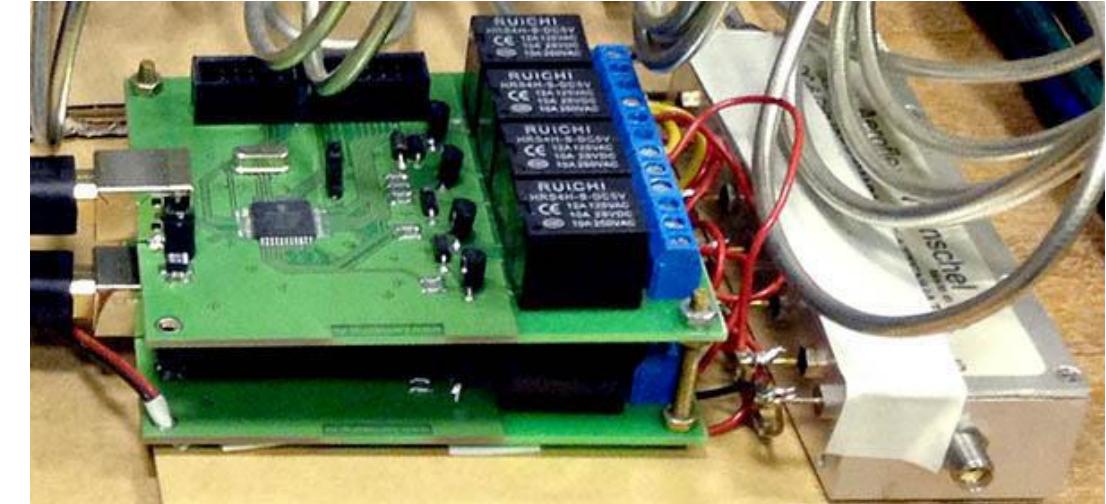
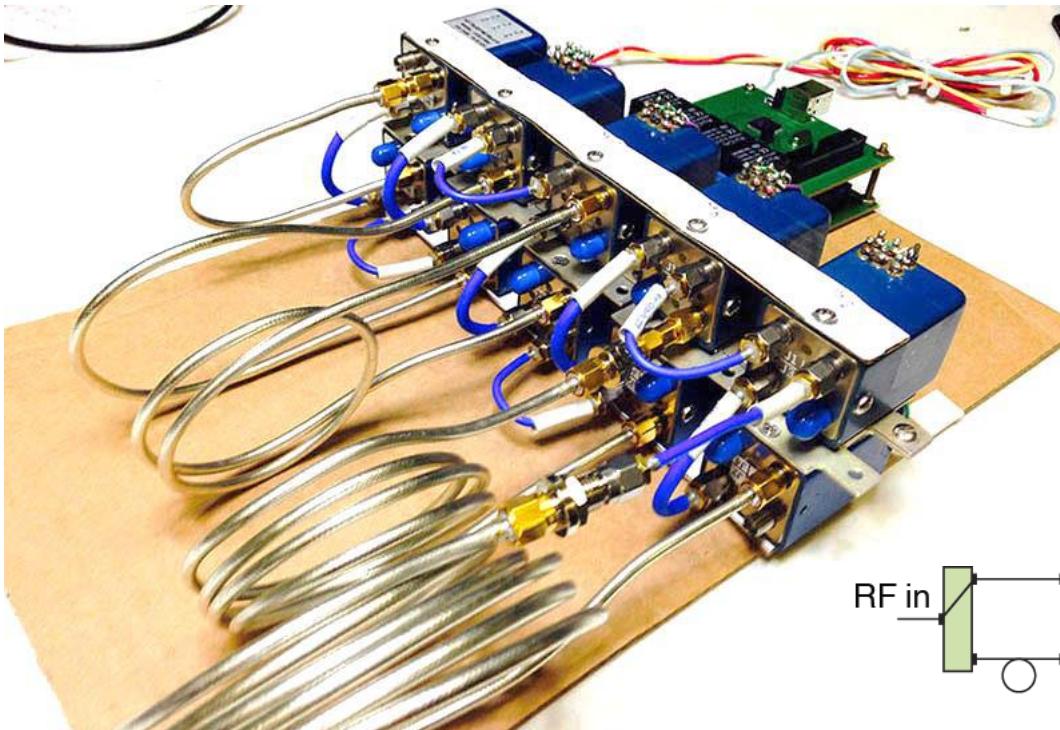
Коммутация на пикапе



Оптический Гребенчатый Фильтр



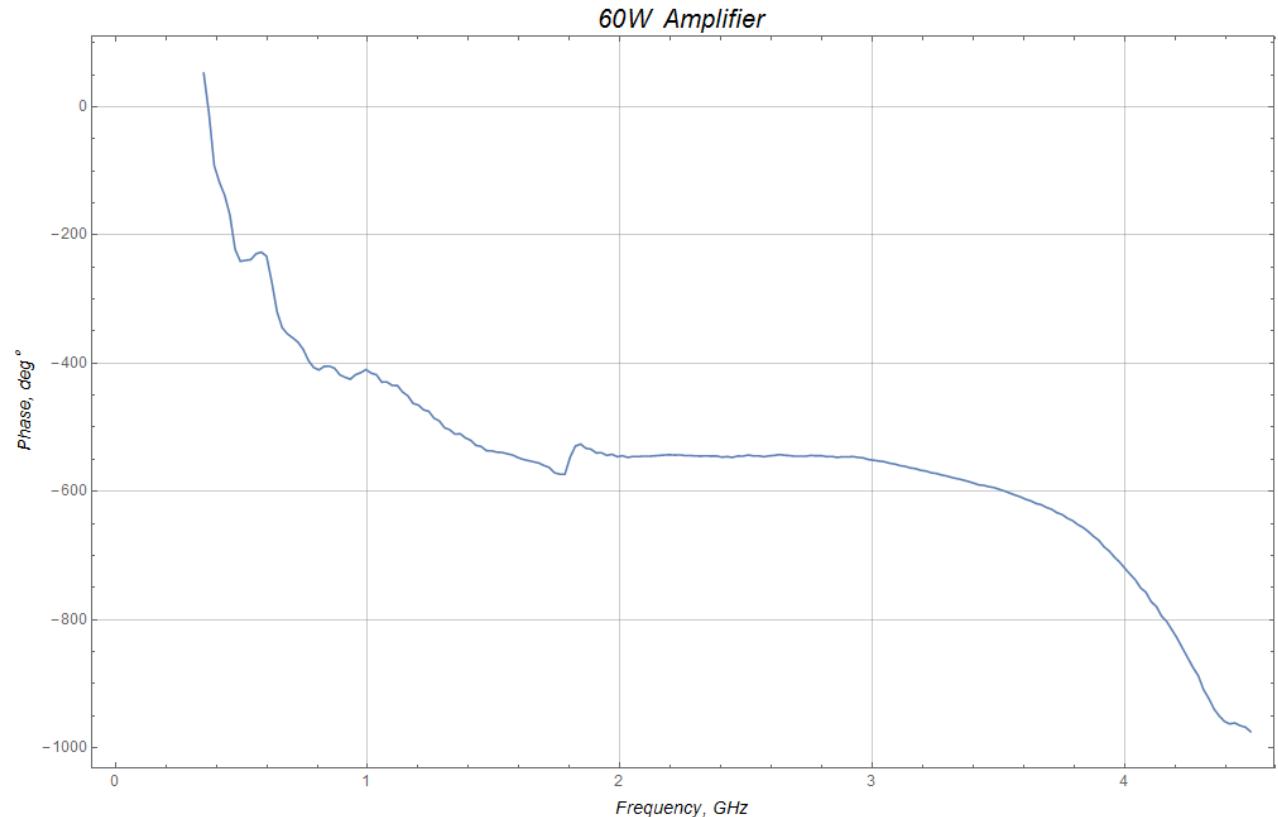
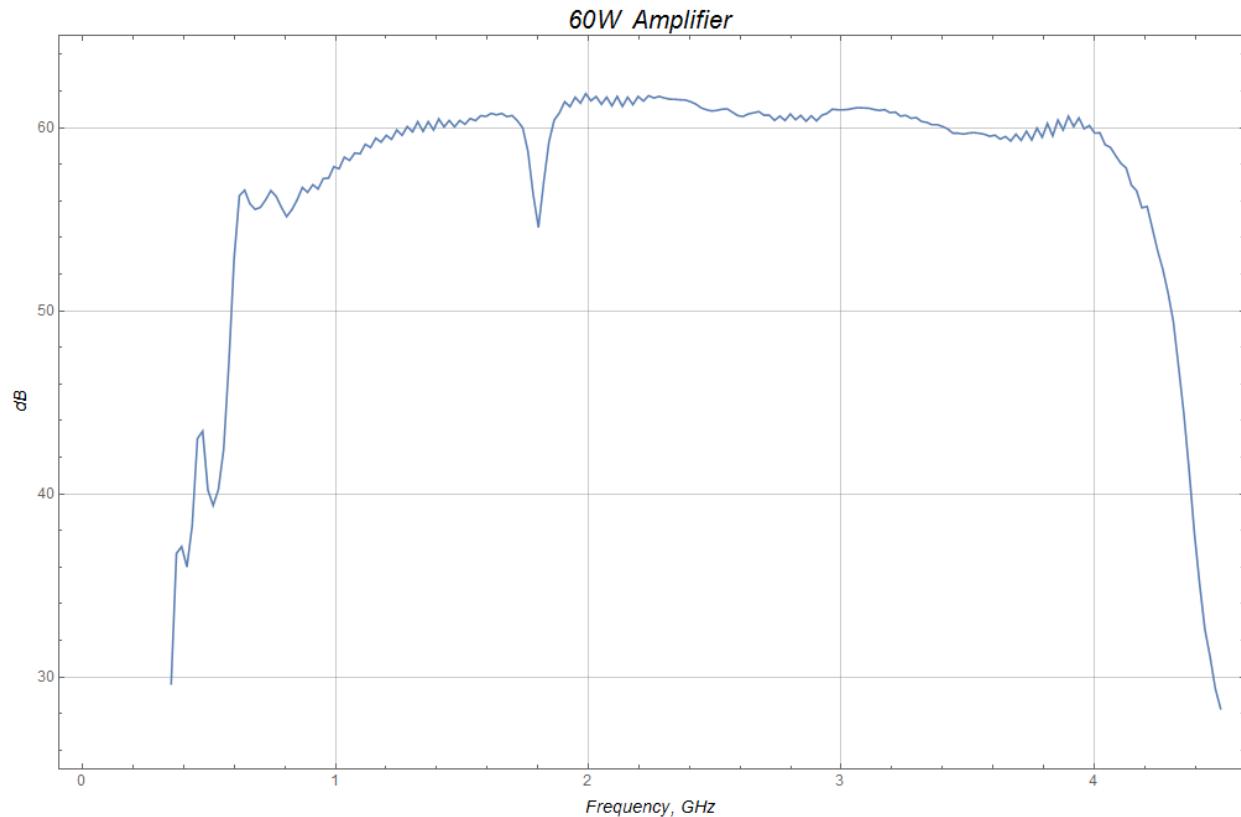
Переменные аттенюатор и задержка



Основной усилитель



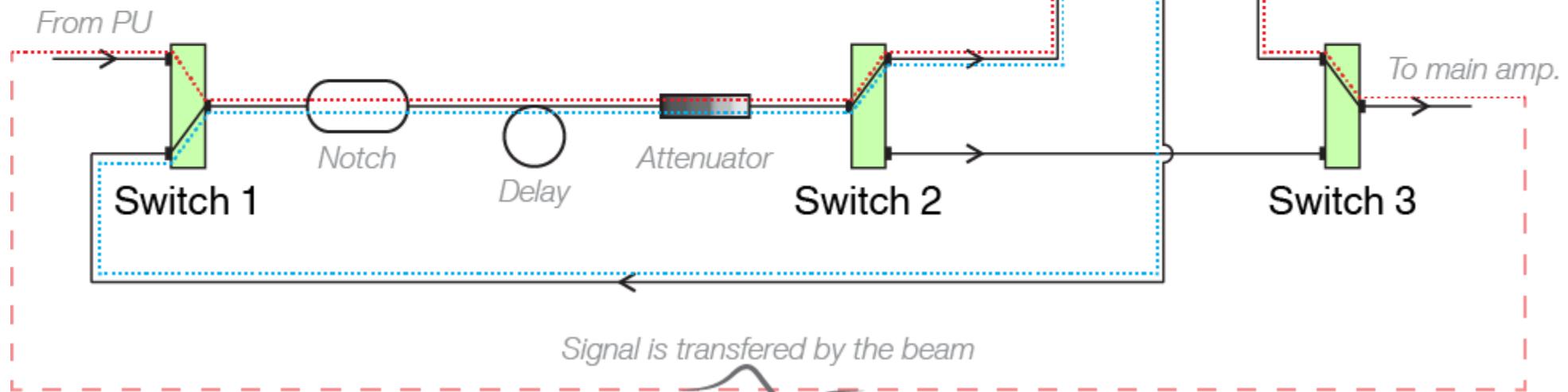
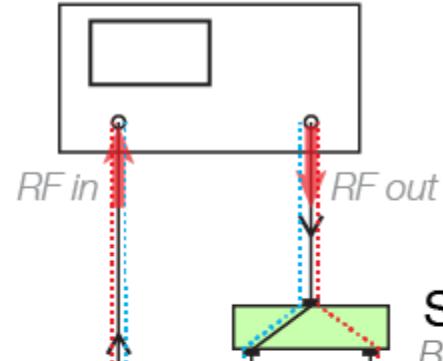
Milmega AS0204-60W



Режимы работы

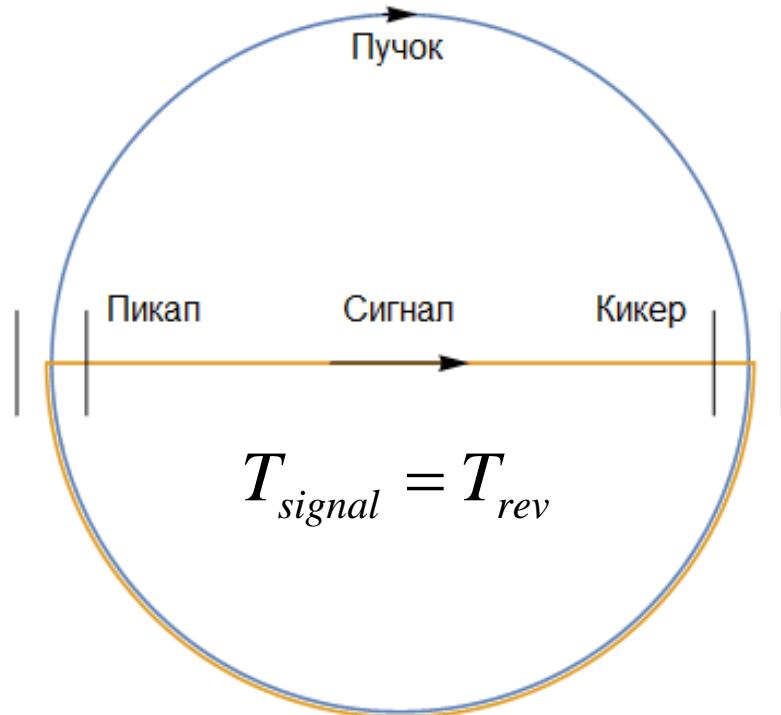
- Настройка фильтра
- Настройка задержки
- Охлаждение

Vector network analyzer

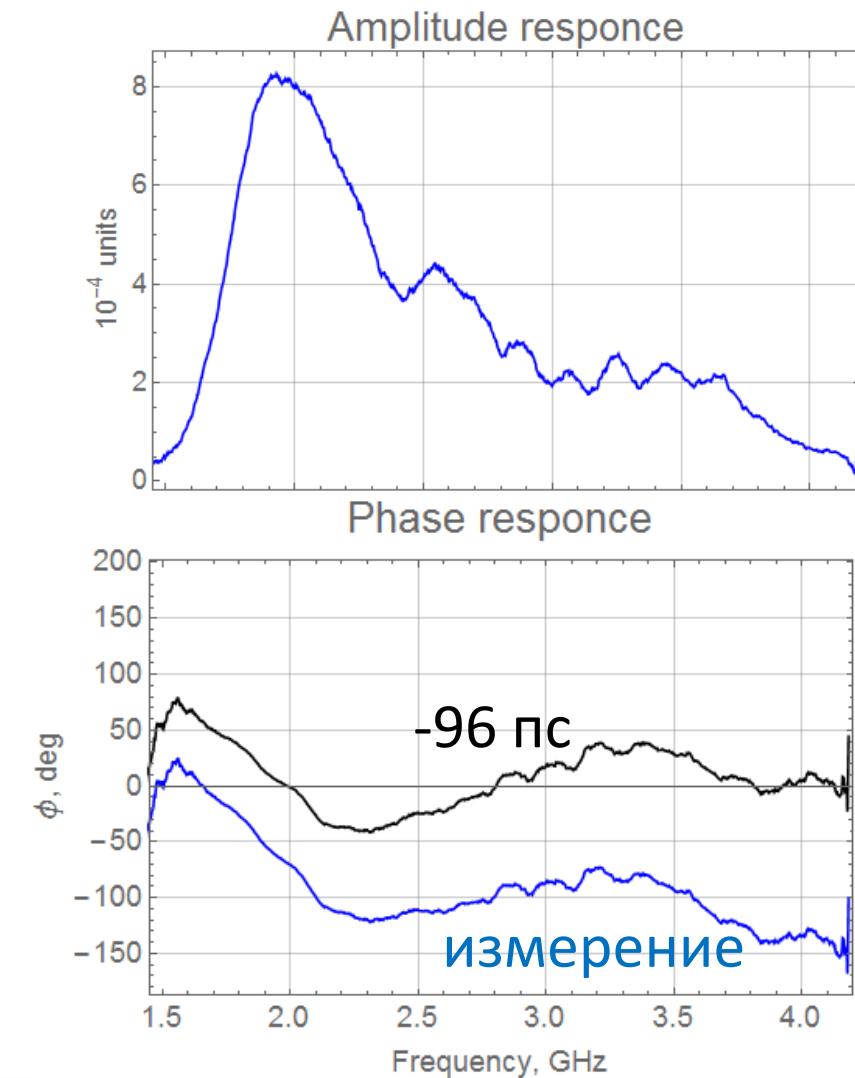




Настройка задержки

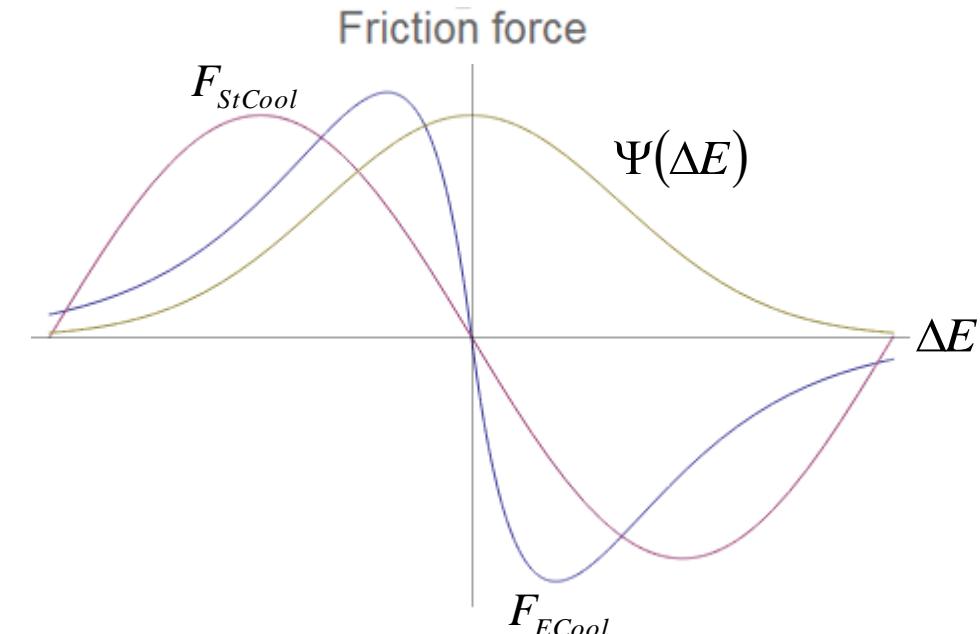
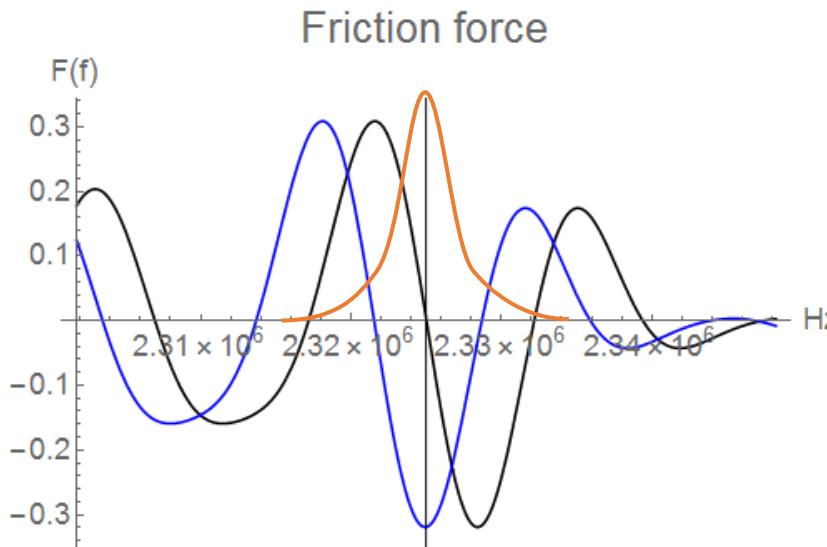


$$F(f) = -\sum_n A_n \sin(2\pi n f_{rev} t_{del} + \varphi_n)$$



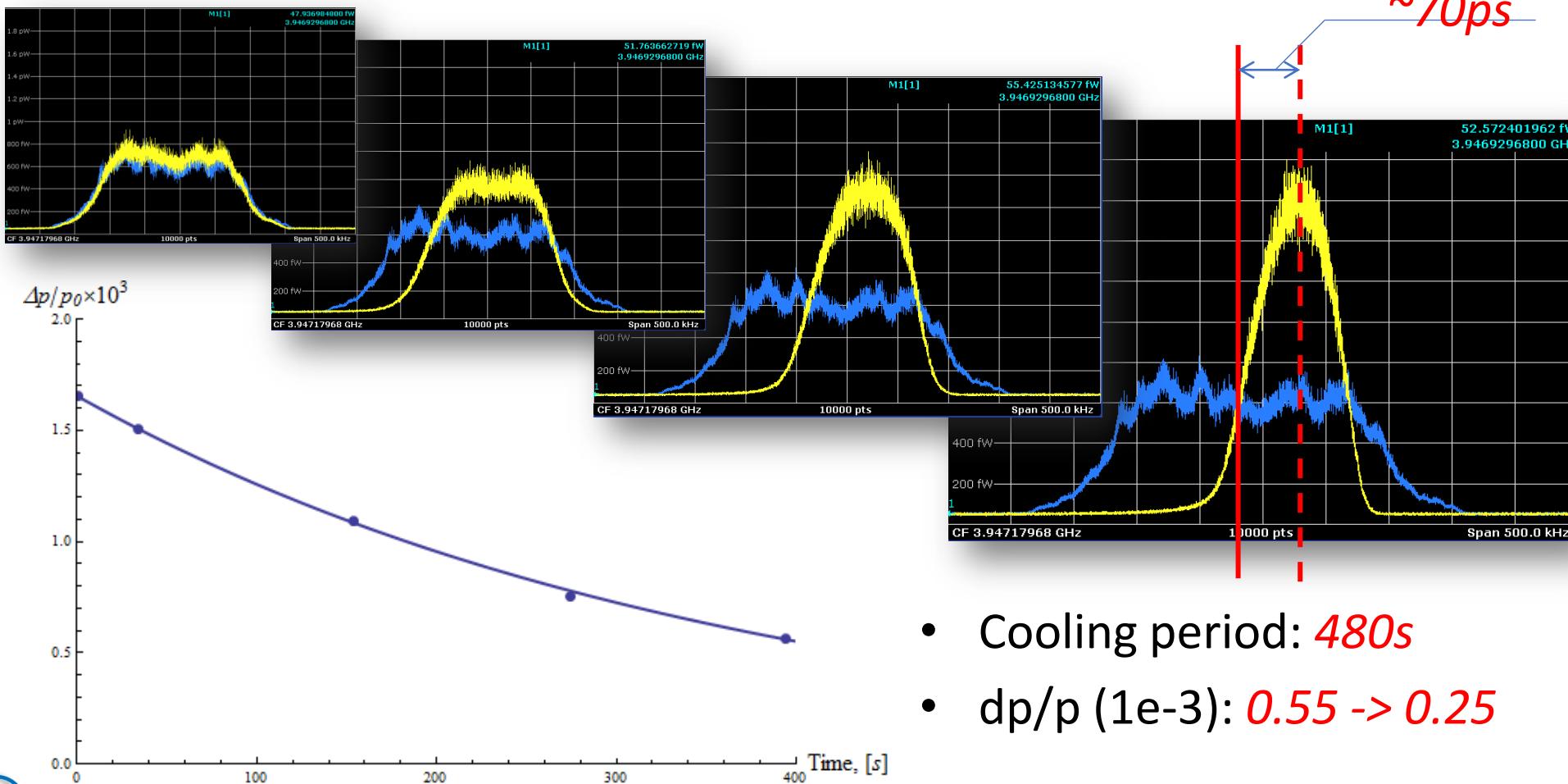
Сила трения, различия ССО и СЭО

$$F(f) = -\sum_n A_n \sin(2\pi n f_{rev} t_{del} + \varphi_n)$$

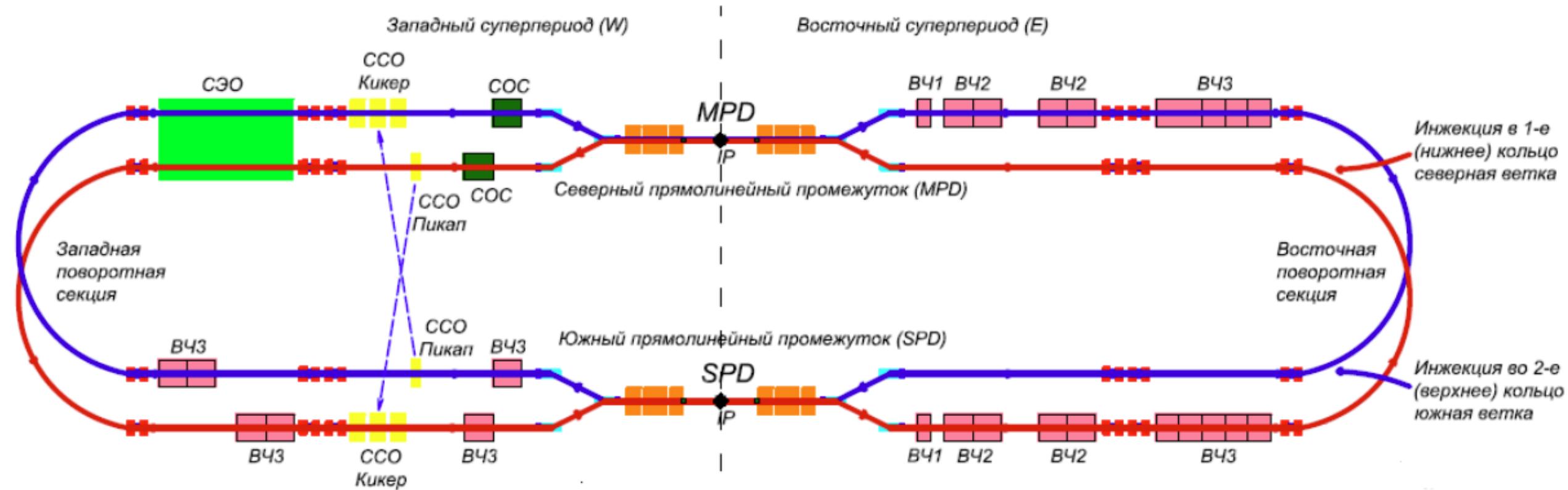


	ССО	СЭО
Принцип действия	Обратная связь	Ускоритель(+1)
Зависимость от N	Линейная ($N \uparrow, \tau \uparrow$)	Нет(слабая)
Зависимость от E	Слабая	Сильная ($E \uparrow, \tau \uparrow$)
Потери	Нет	Рекомбинация

Стохастическое охлаждение на Нуклотроне



Коллайдер NICA



Задачи ССО на NICA

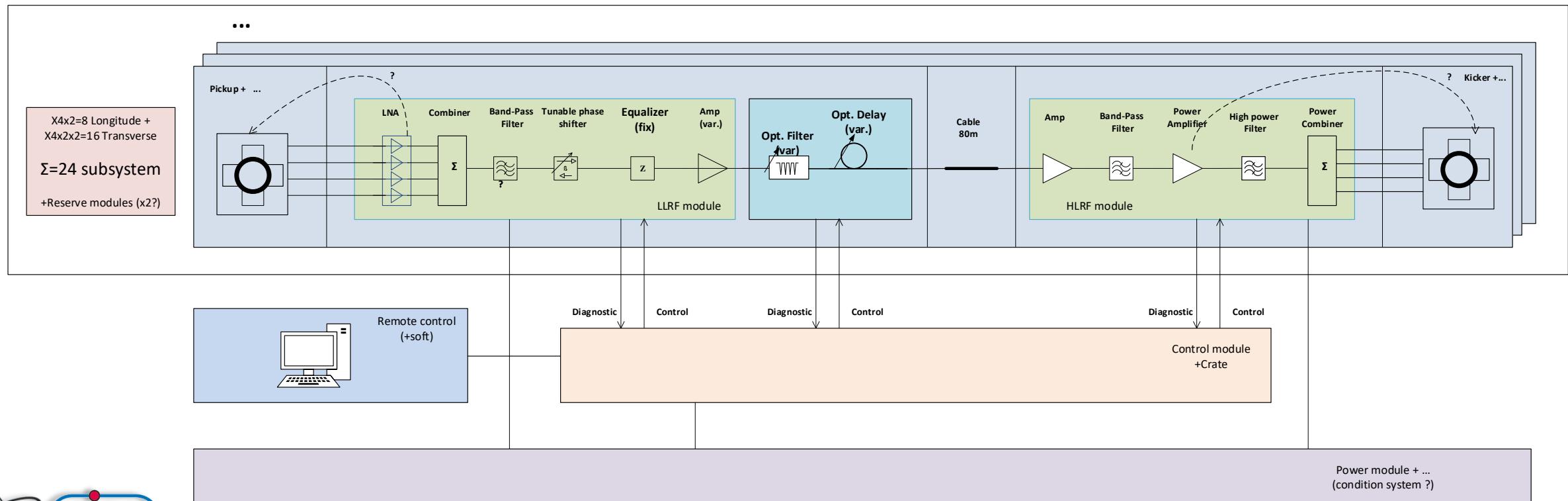
1. Охладить при накоплении
2. Препятствовать нагреву при столкновениях

Параметры ССО Коллайдера

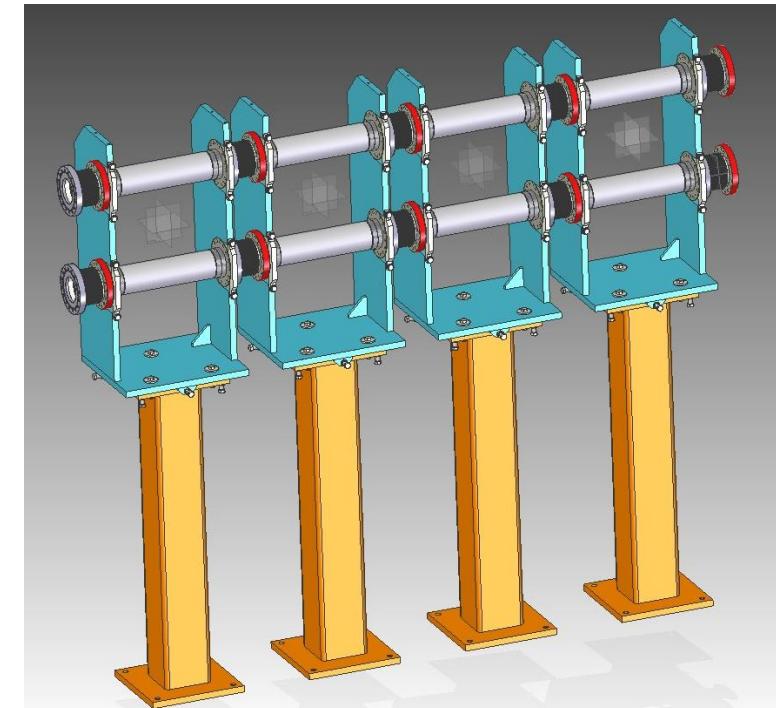
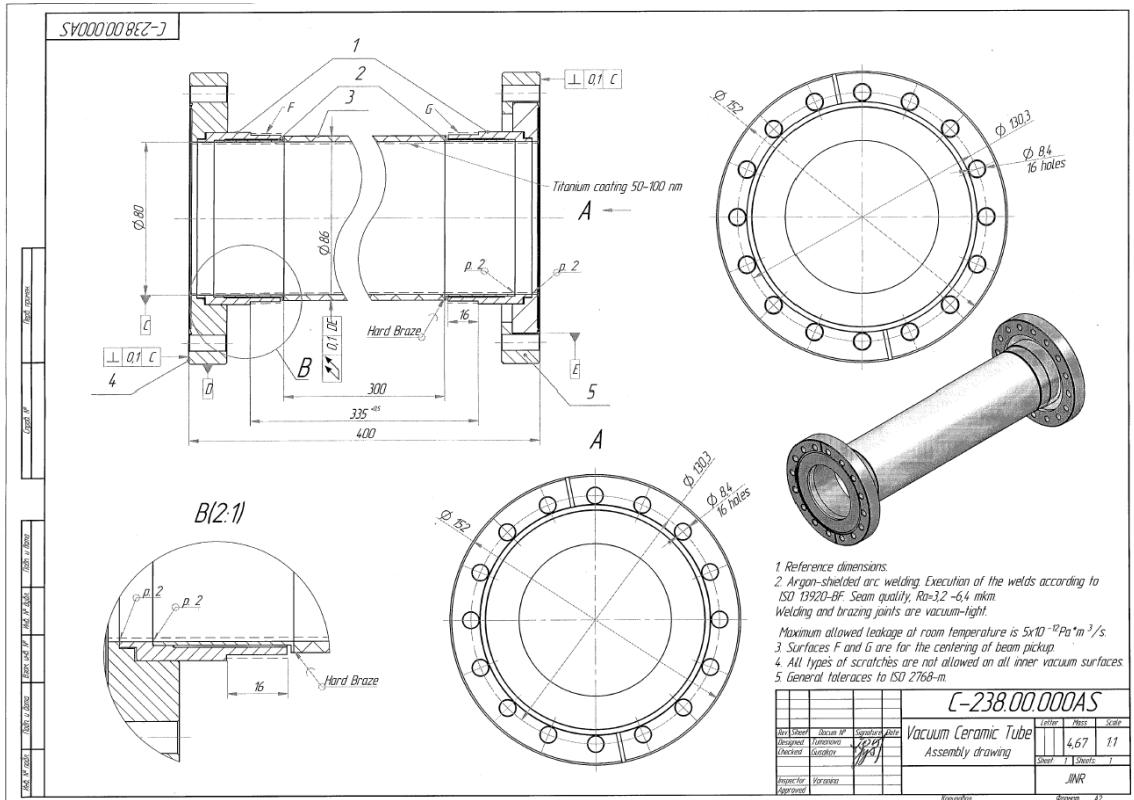
Энергия ионов $^{197}\text{Au}^{79+}$, ГэВ/н	(1.0) 3.0– 4.5			
Метод охлаждения	Фильтр(Δ, Σ)/TOF(0,+1,+2)			
Полоса пропускания, ГГц	0.7 – 3.2			
Разбиение полос, ГГц	0.7-1.0	1.0-1.5	1.5-2.2	2.2-3.2
Пучковое (кабельное) расстояние от пикапа до кикера, м	186 (~100)			
Шунтовое сопротивление пикапа/кикера, Ω	200/800			
Температура пикапа/шума, К	300/40			
Средняя мощность на кикере, Вт	120(), 11(⊥)			
Мощность продольной системы по полосам, Вт	4	12	32	72
Неравномерность АЧХ, дБ	$\leq \pm 2$			
Отклонение от линейной фазы, градусов	$\leq \pm 15$			

Состав системы (подсистемы)

- Механическая.
- Пассивная электродинамическая.
- СВЧ Кабели.
- СВЧ подсистема малой мощности (LLRF)
- Подсистема юстировки (механическая или/и аналоговая)
- Фильтр гармоник оборотной частоты.
- СВЧ подсистема большой мощности (HLRF)
- Система управления.
- Система диагностики.
- Программная подсистема.

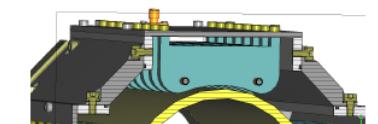
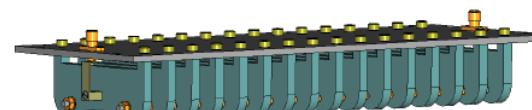
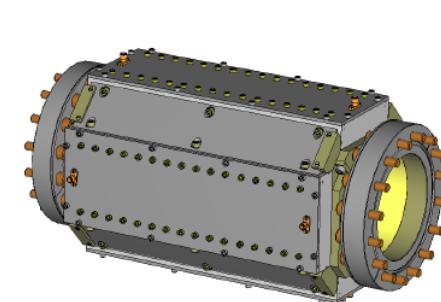
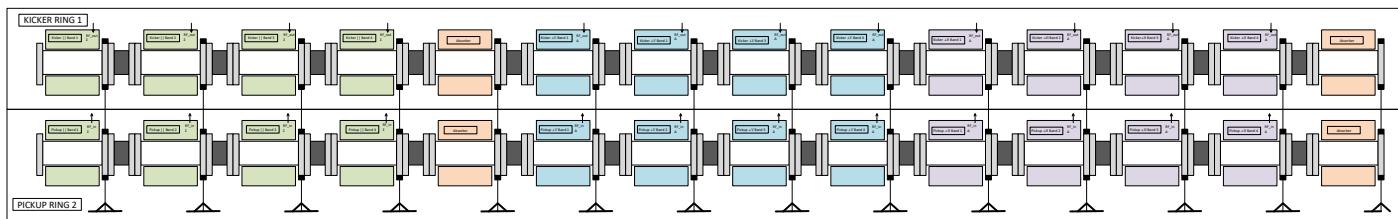
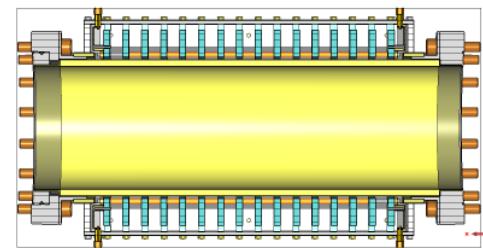
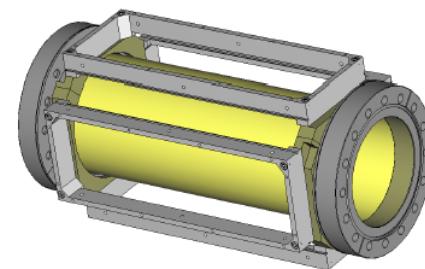
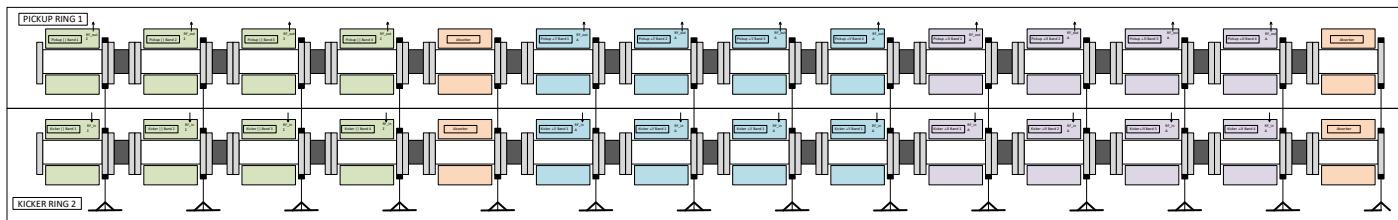


Механическая подсистема

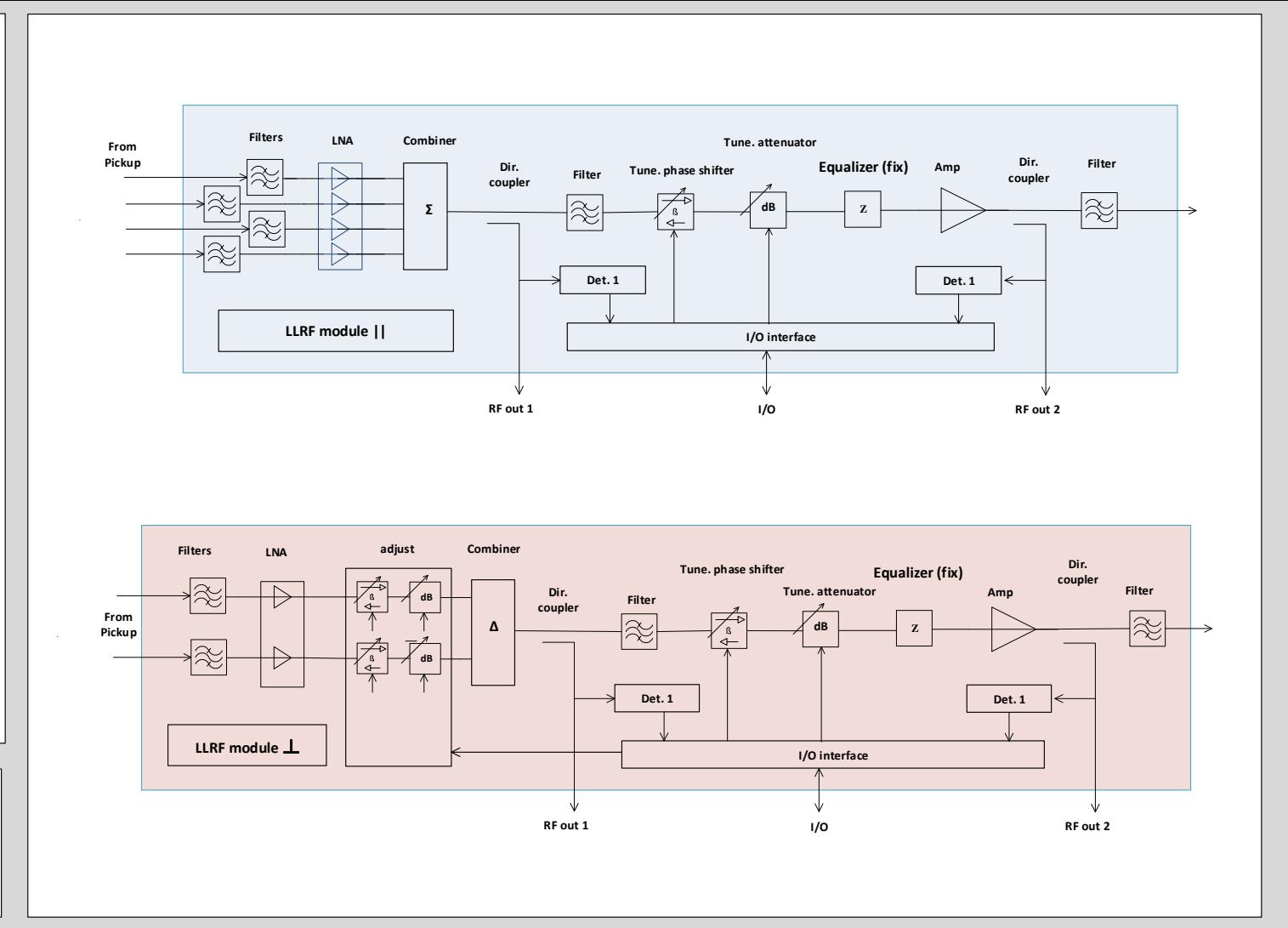


Пассивная СВЧ система

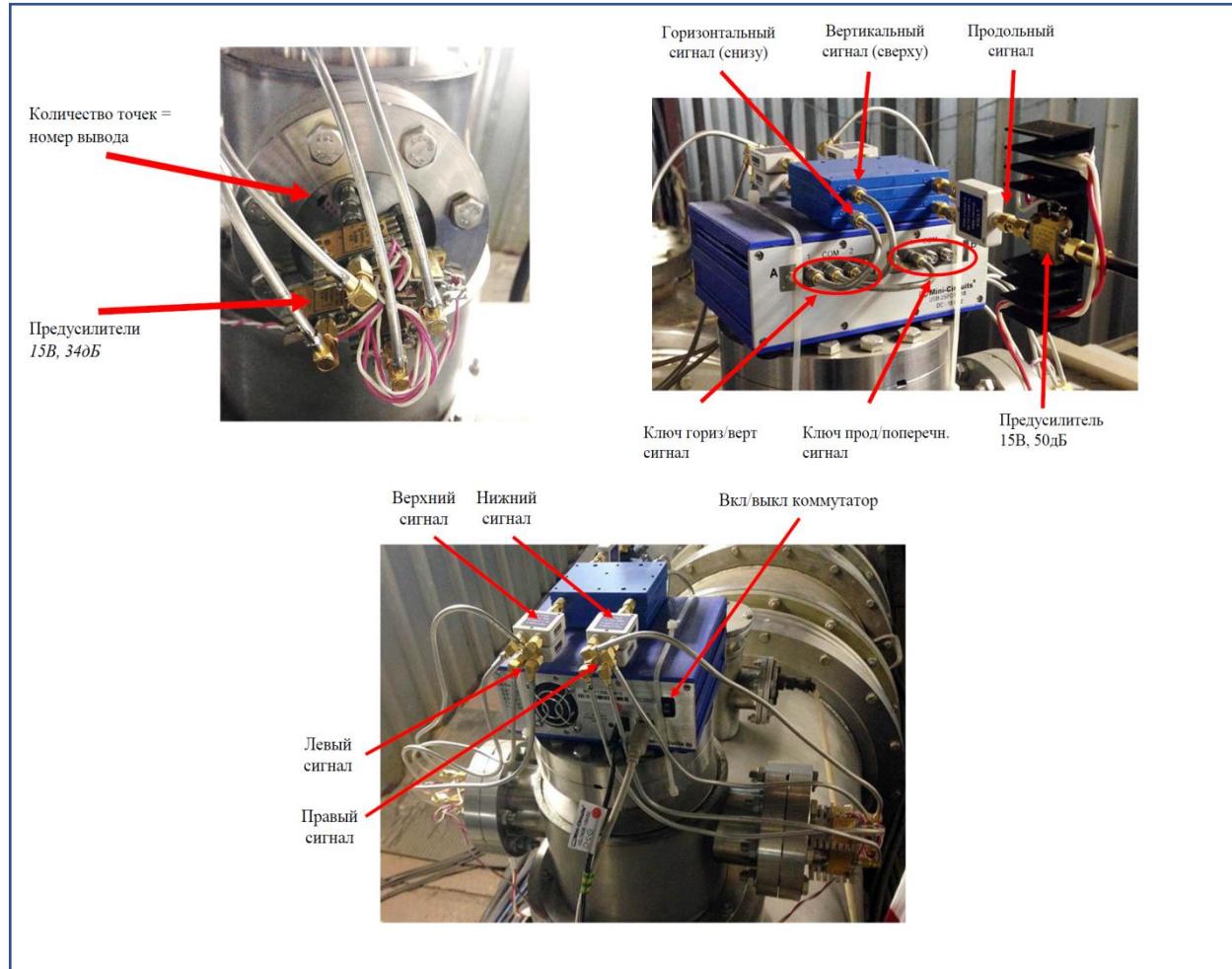
1 полоса 2 – 4 ГГц ---> распределенная полоса 0,7 – 3,2 ГГц на 4 полосы



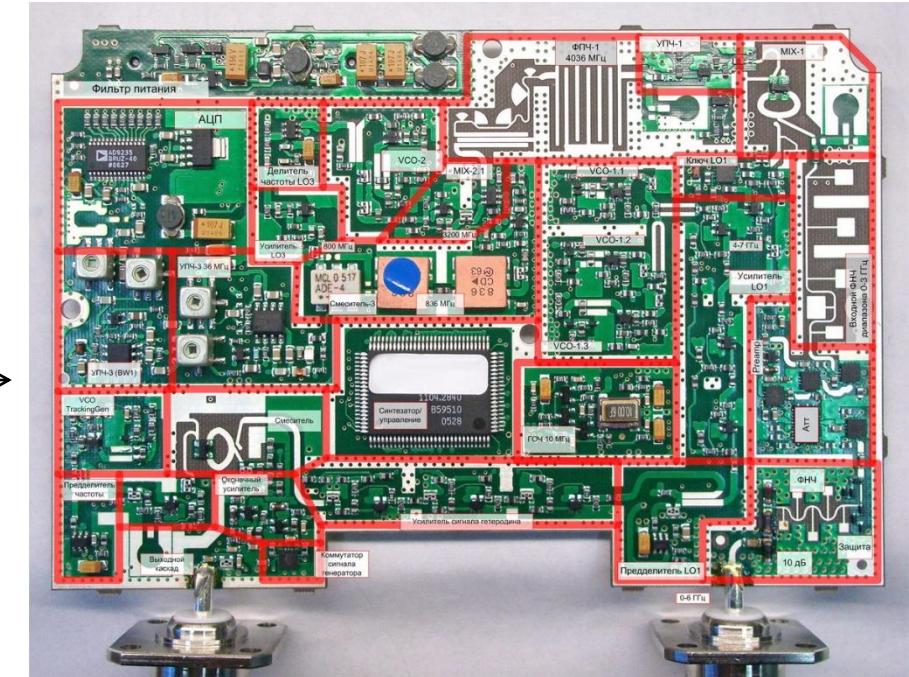
Система LLRF



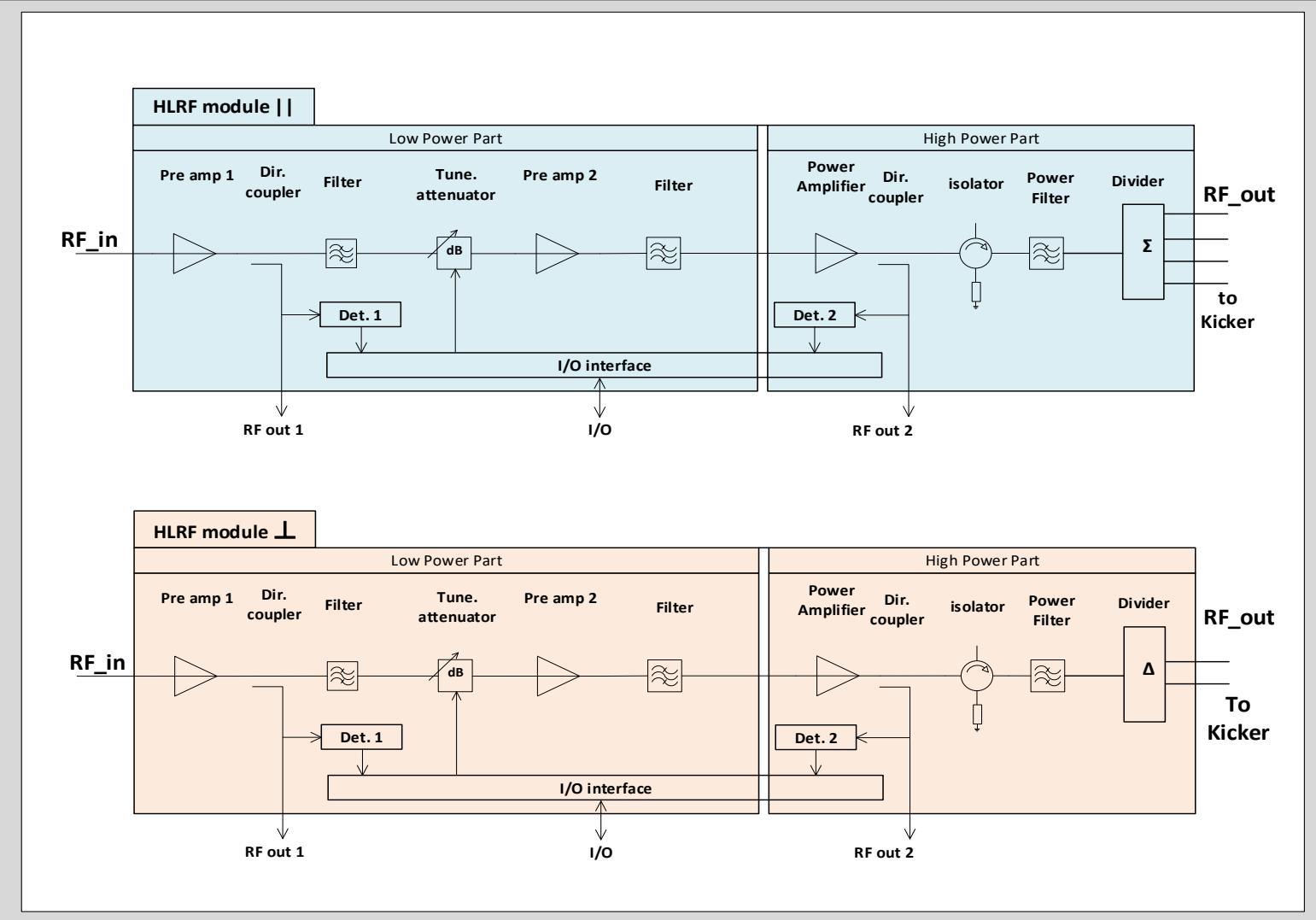
Система LLRF



Модульное исполнение



Система HLRF

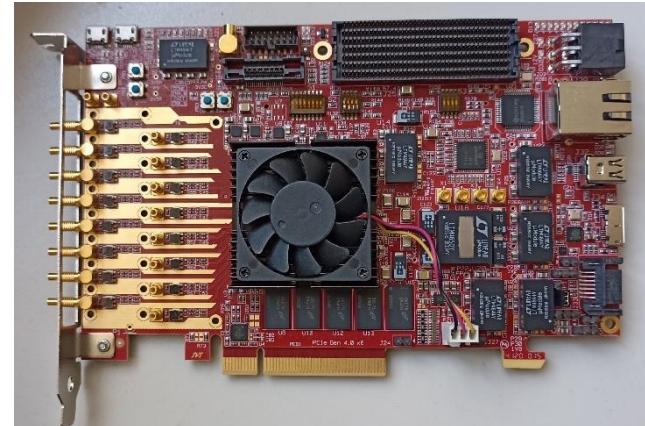
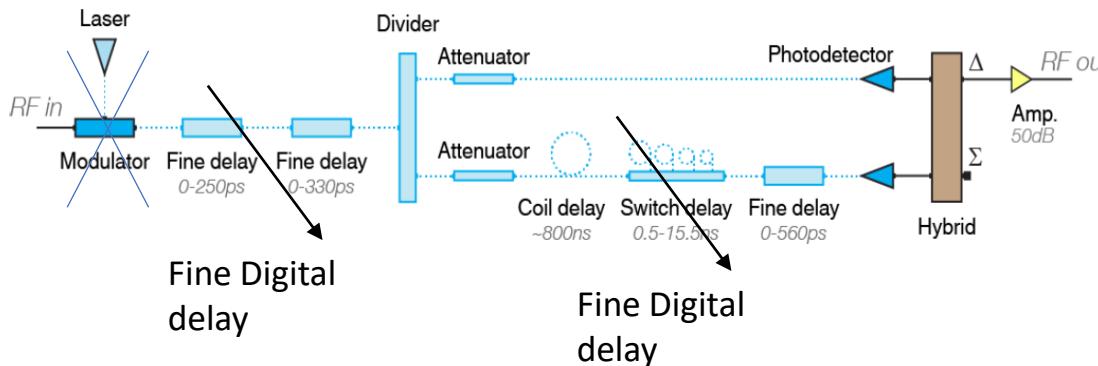


Фильтр гармоник оборотной частоты

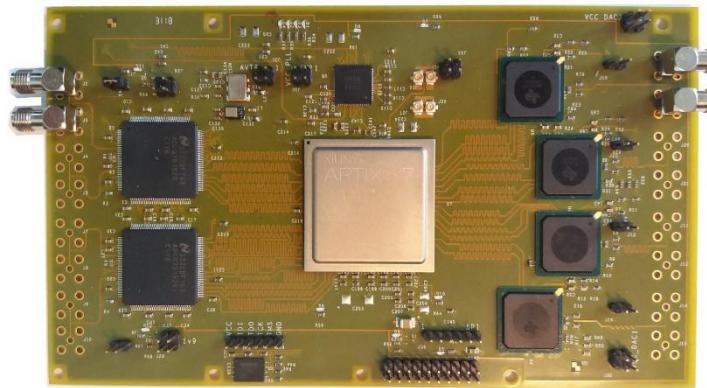
Альтернативы:

1. Оптический фильтр
(программирование низкого уровня)

2. Цифровой фильтр
(программирование ПЛИС)



RFSoc – Xilinx
8 chan in/out
до 8Gsmp



Цифровая линия
задержки от ИТЭФ

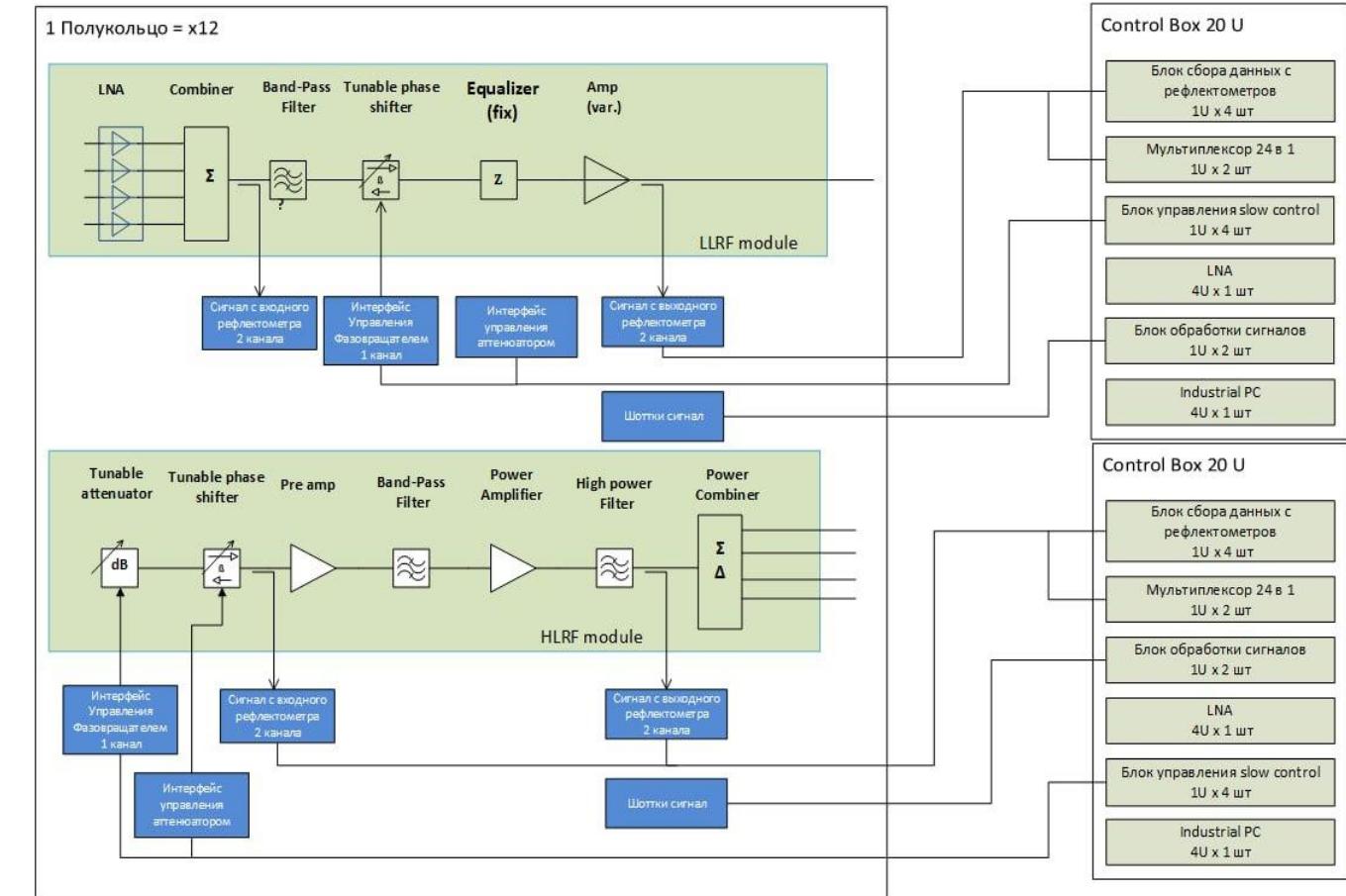
Система управления и диагностики

Система управления должна интегрировать все подсистемы.

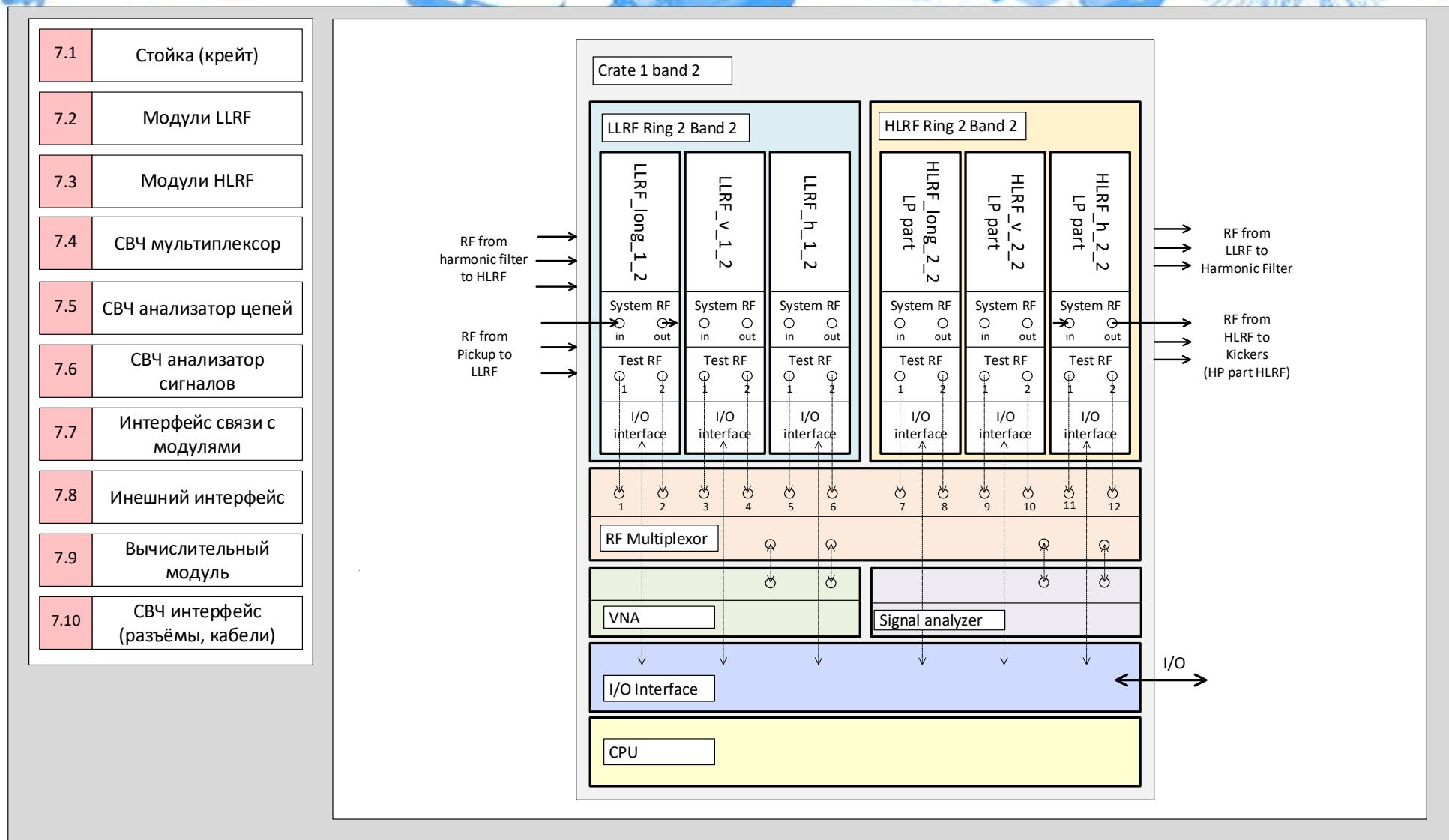
Контролируемые/управляемые параметры системы:

- Контроль функционального состояния модулей (питание, температура и т.д., уровни СВЧ сигналов).
- Контроль передаточной характеристики системы (АЧХ и особенно ФЧХ).
- Измерение Шоттки-шума (продольного и поперечного).
- Управление фильтром гармоник.
- Управление АЧХ и ФЧХ системы (аттенюаторы и фазовращатели).
- Управление юстировкой поперечной системы.

Система управления должна быть унифицирована для всех модулей.



Система управления и диагностики

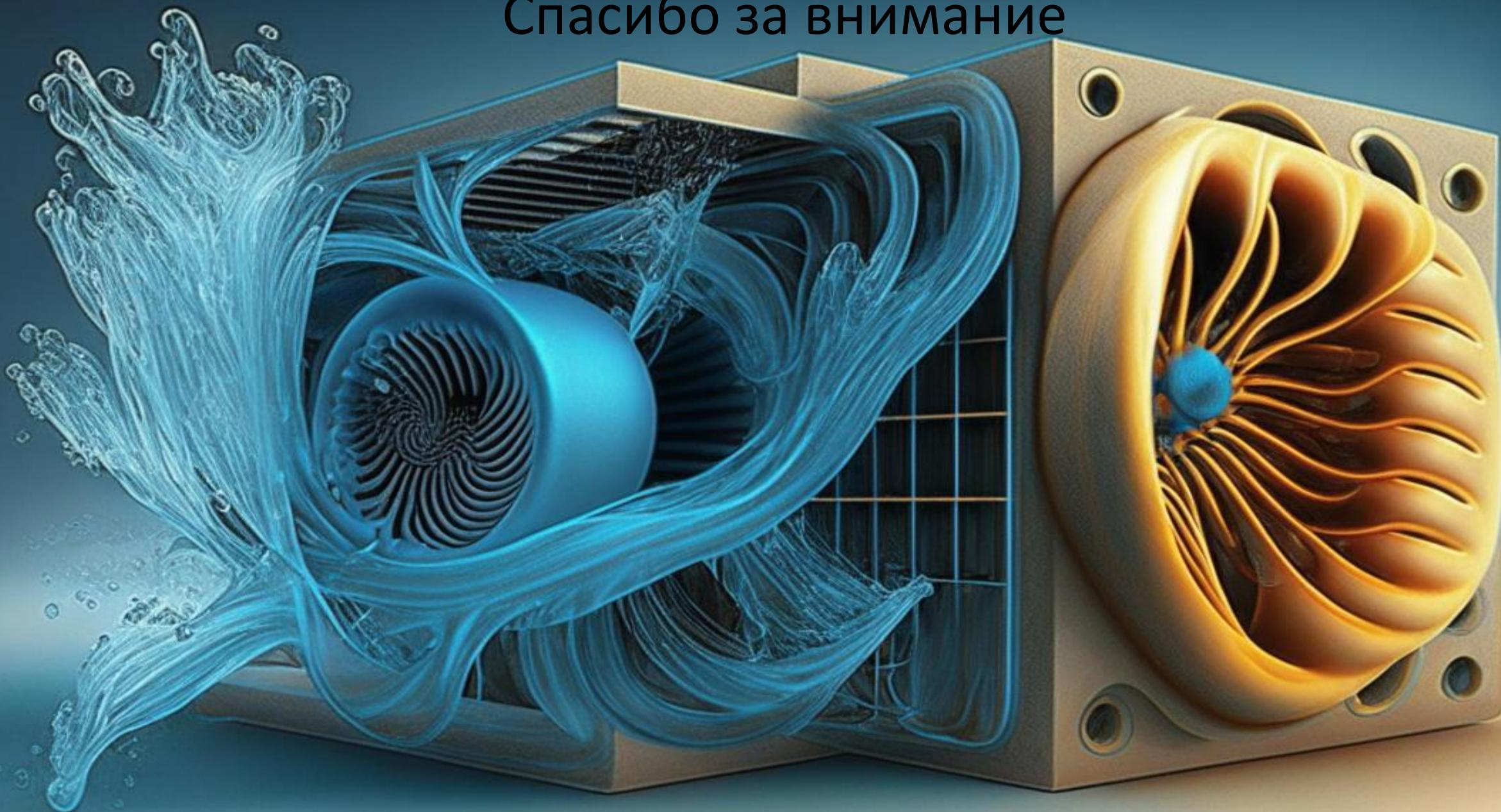


Программная подсистема (высокого уровня)

Требования к программной системе:

- Программная система должна выполнять функции автоматизации эксперимента – максимально освобождая оператора системы от рутинных действий – настройка, регулировка, архивирование данных и т.д.
- Максимально информативный и удобный интерфейс.
- Система должна интегрироваться в единую систему управления коллайдера (на базе Tango controls <https://tango-controls.org>) – получать данные от других подсистем (ВЧ-система, оптика и т.д.) и передавать данные другим подсистемам .
- Потенциально – должна быть единая система, объединяющая стохастическое и электронное охлаждение – как подсистемы единой системы охлаждения.

Спасибо за внимание



Изображение сгенерировано Kandinsky 2.1 по запросу «Стохастическое охлаждение»