

Системы стохастического охлаждения

И.Горелышев

Охлаждение пучка. Что это?

Охлаждение – уменьшение температуры

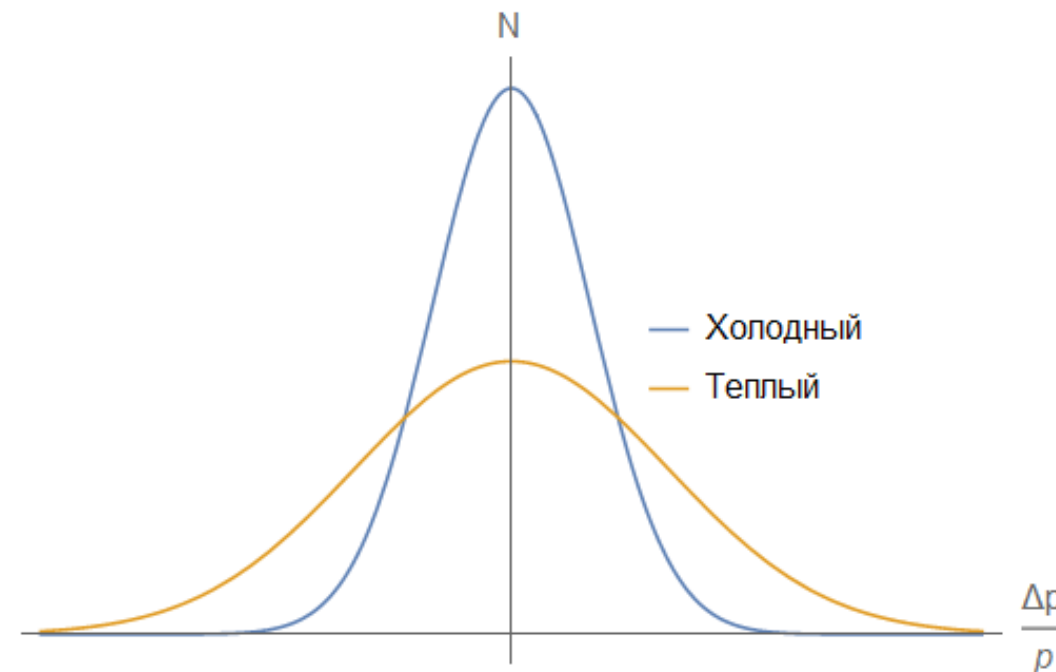
$$\frac{3}{2}kT = \frac{1}{2}m\langle \vec{V}^2 \rangle$$

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 потеряется

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 NAP-M
INS, Токио	1983-1984	Тесты на TARN
Стокгольм	1984	Нобелевская премия по физике (К.Руббиа, 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 Нуклотроне
FNAL (Чикаго)	2021-2022	Реализация оптического стохастического охлаждения

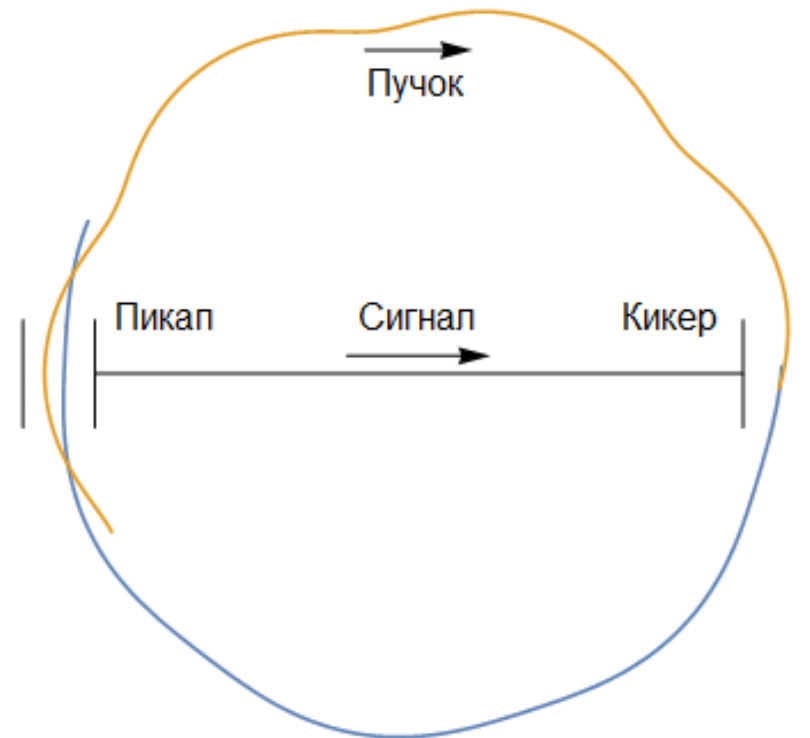
Стохастическое охлаждение. Что это?

Стохастичность – случайность (шумы)

Стохастическое охлаждение

Охлаждение пучка (случайными) шумами
от самого пучка

Широкополосная система обратной связи



Широкополосность

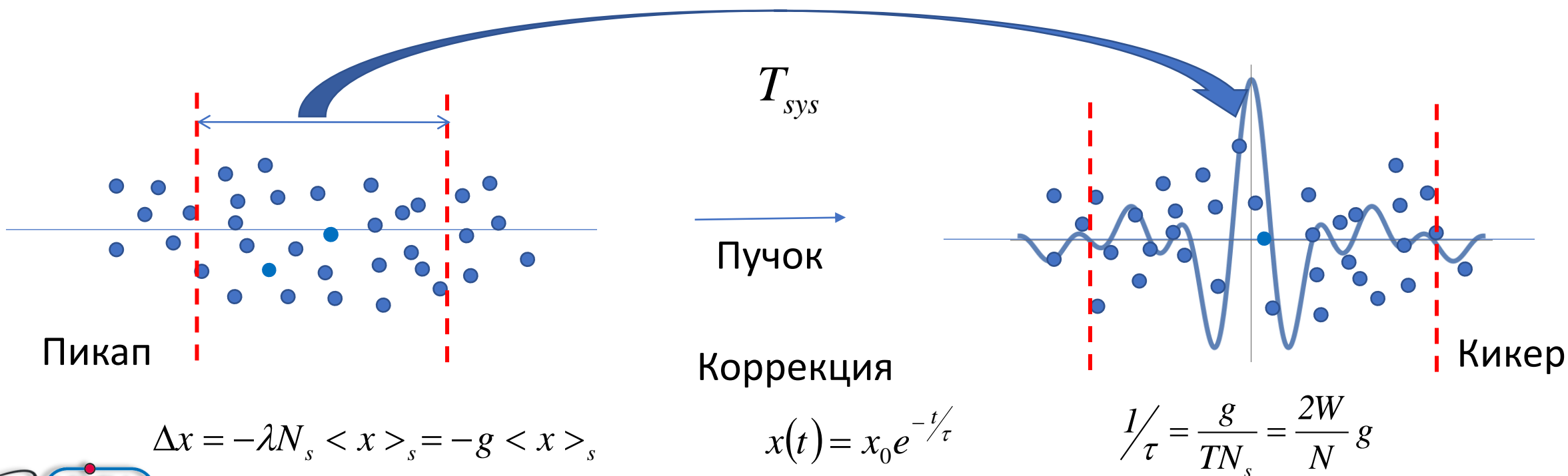
Теорема Котельникова-Найквиста:

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

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

Разрешающая способность

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



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

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

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

Оценка времени охлаждения



Среднеквадратичная коррекция

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

Собственный (когерентный) сигнал способствует охлаждению

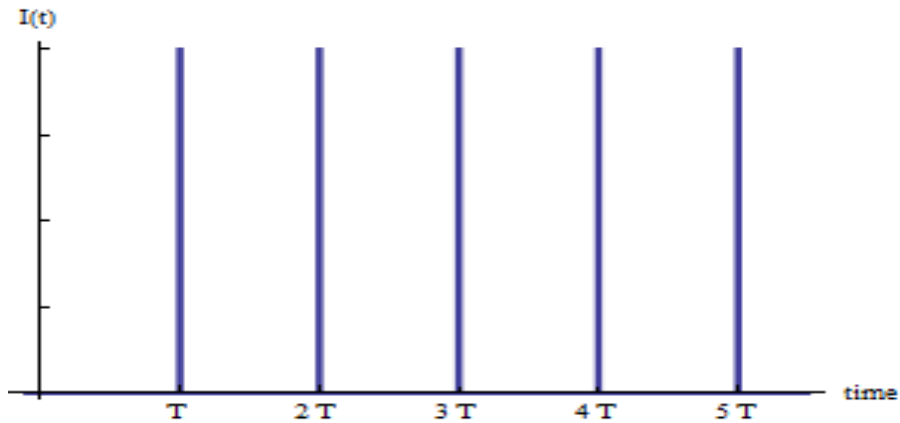
Сигнал других частиц (некогерентный) мешает охлаждению

Системы

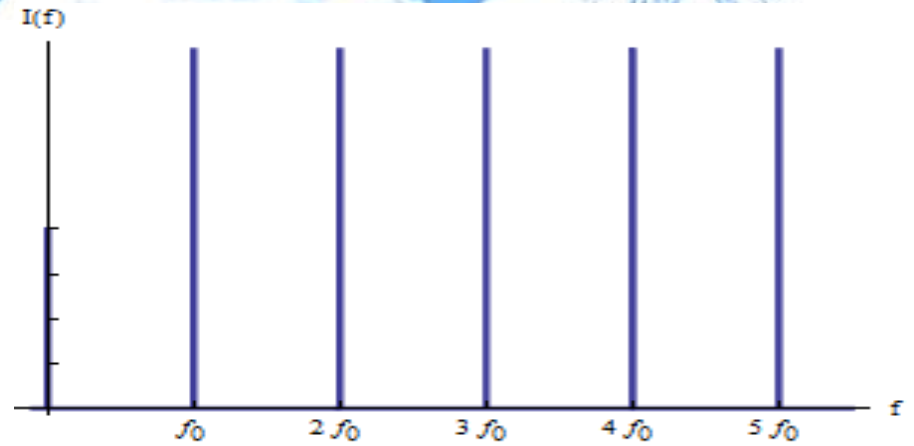
Site	Machine	Frequency (MHz)	Beam Momentum (GeV/c)
CERN	ISR	1000-2000	26.6
	ICE	50-375	1.7-2.1
	AA	150-2000	3.5
	LEAR	5-1000	0.2-2.0
	AC	1000-3000	3.5
	AD	900-1650	2.0-3.5
	FZJ	COSY	1000-3000
GSI	ESR	900-1700	0.48/u

Site	Machine	Frequency (MHz)	Beam Momentum (GeV/c)
FNAL	ECR	20-400	0.2
	Debuncher	4000-8000	8.9
	Accumulator	1000-8000	8.9
	IOTA	306-325 THz	0.1
Tokyo	TARN	20-100	0.007
BINP	NAP-M	100-300	0.062
JINR	Nuclotron	2000-4000	3.9
	NICA	700-3200	2.8

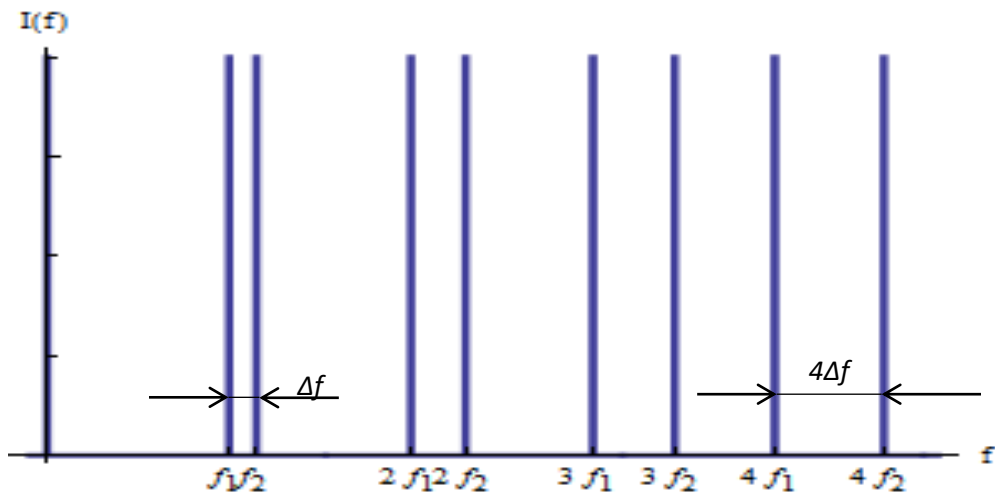
Дробовой шум пучка



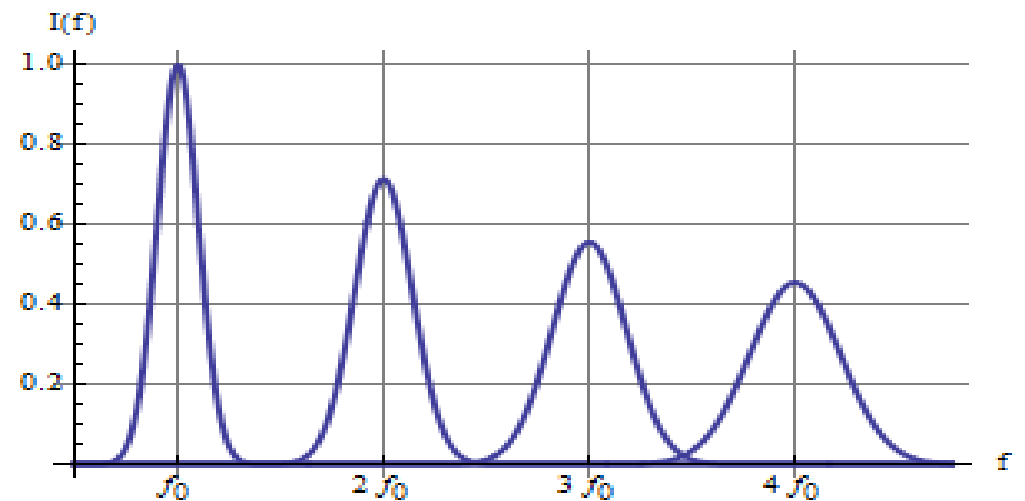
Ток частицы во временной области



Ток частицы в частотной области

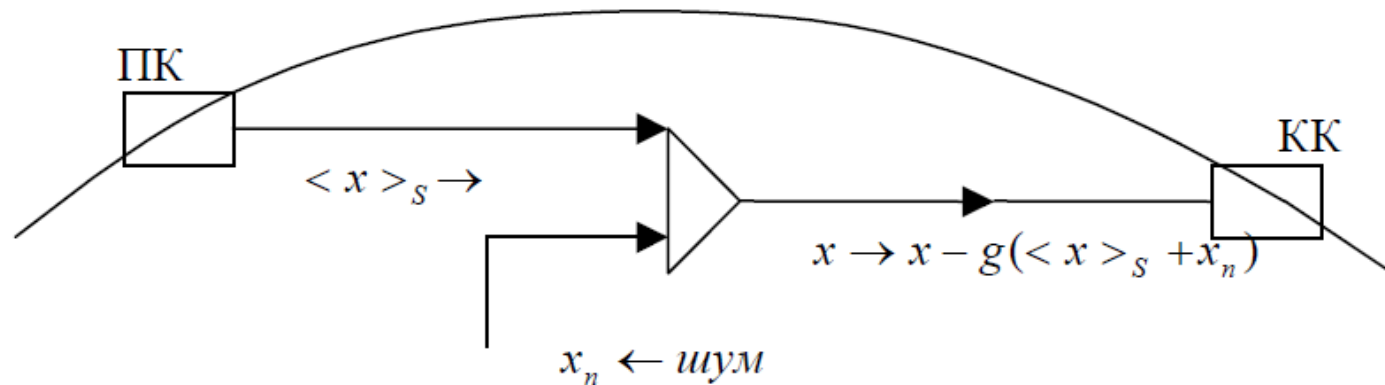


Ток двух частиц в частотной области



Дробовой шум пучка

Оценка времени охлаждения



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

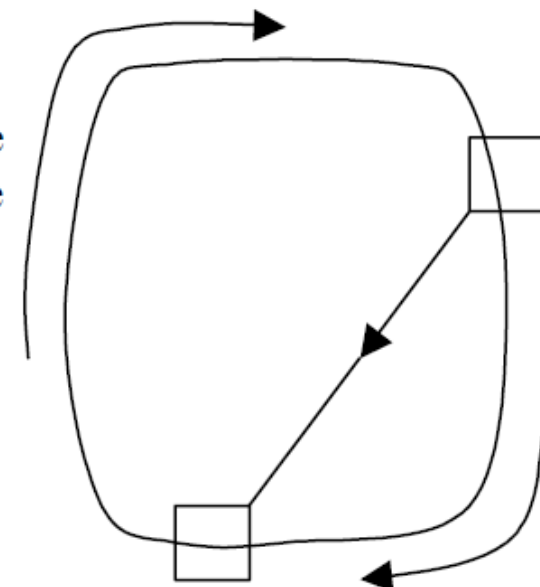
$$\frac{1}{\tau_x} = \frac{W}{N} (2g[1 - \tilde{M}^{-2}] - g^2 [M + U])$$

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

Перемешивание

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

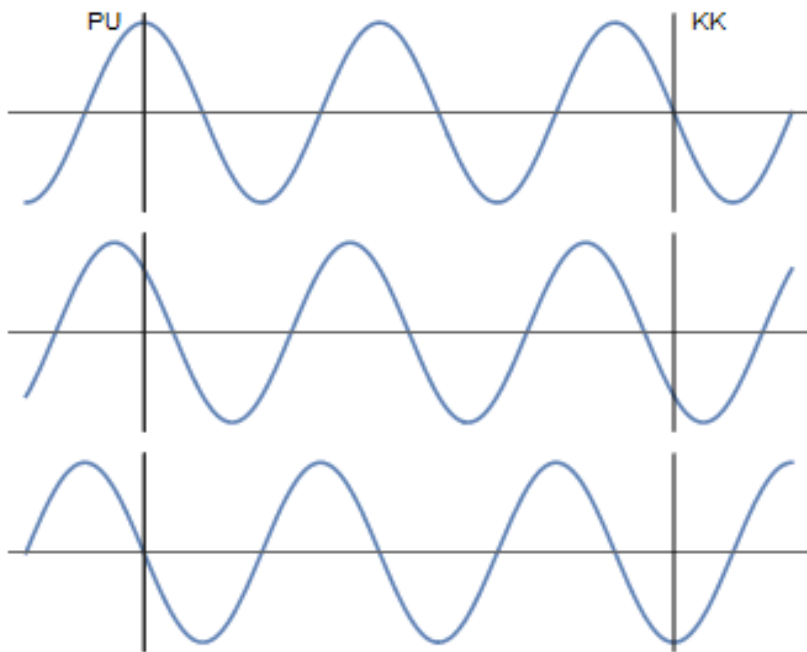
сильное
перемешивание



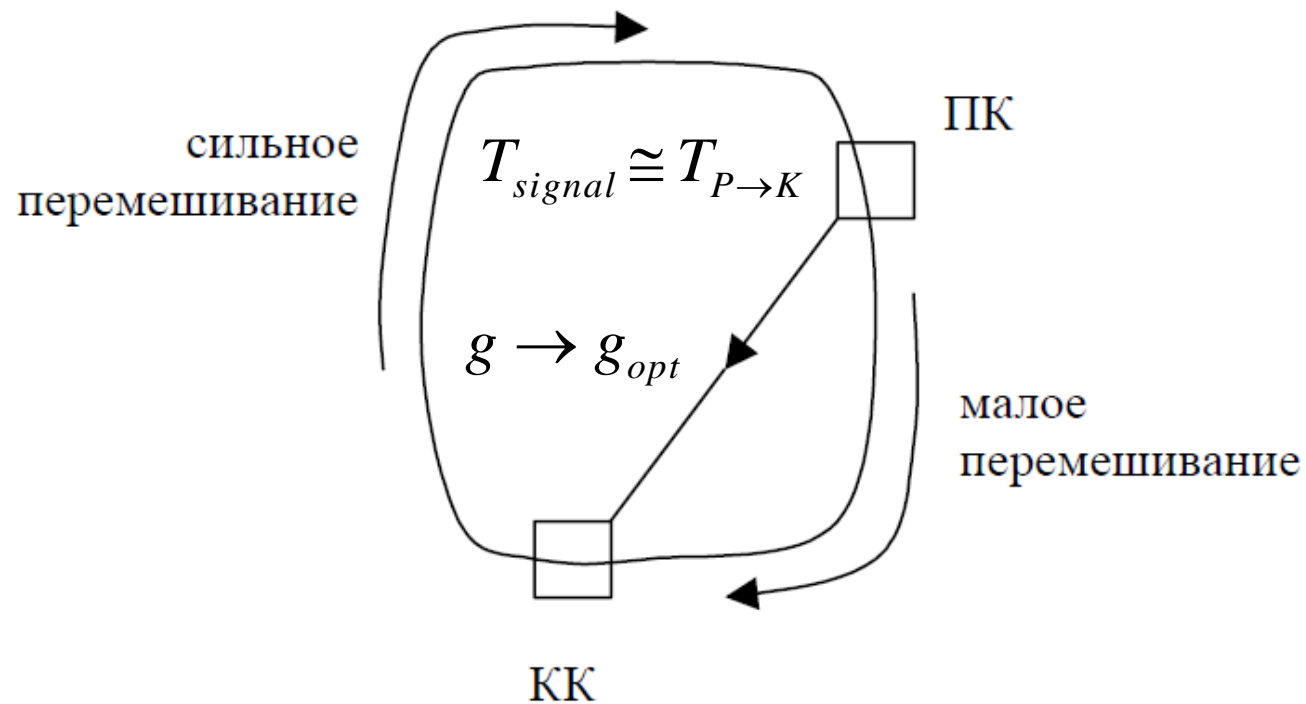
малое
перемешивание

КК

Технические условия работы



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



Состав оборудования

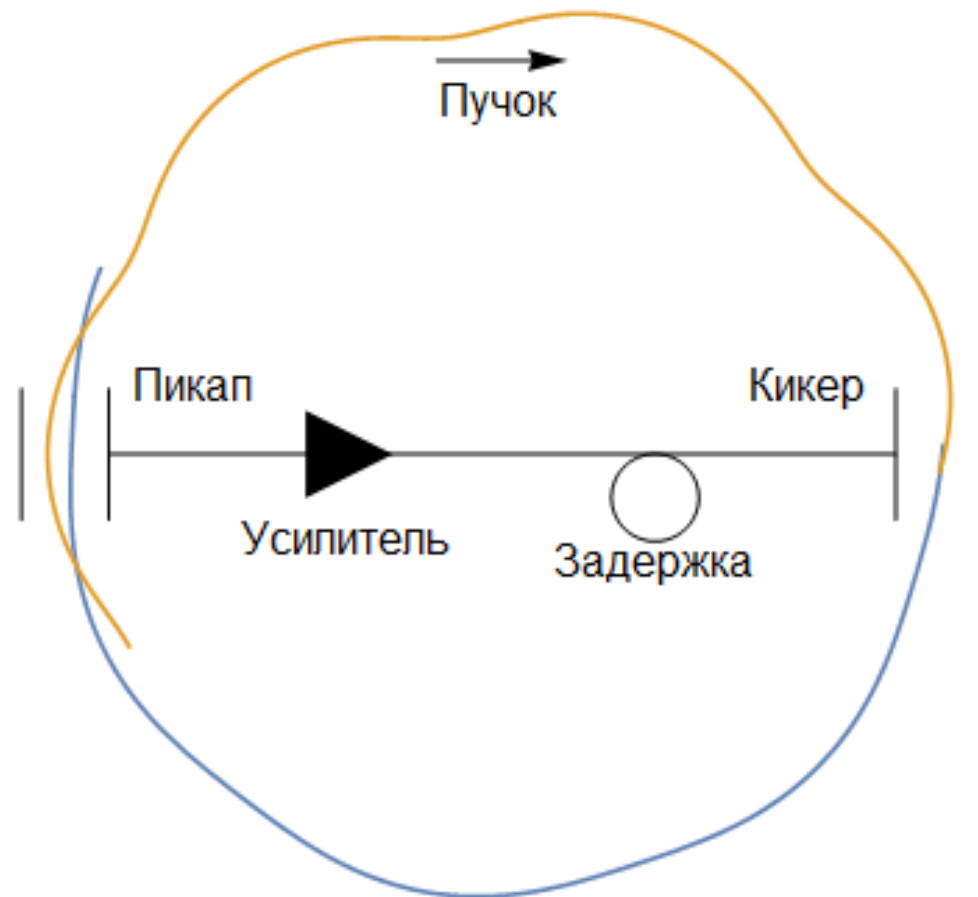
Пикап (регистрация сигнала)

Усилитель

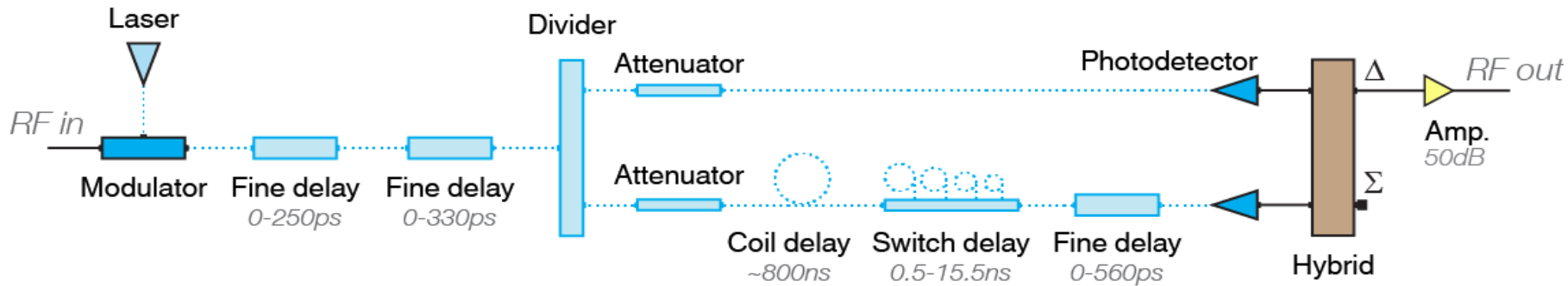
Фильтр (при наличии)

Задержка

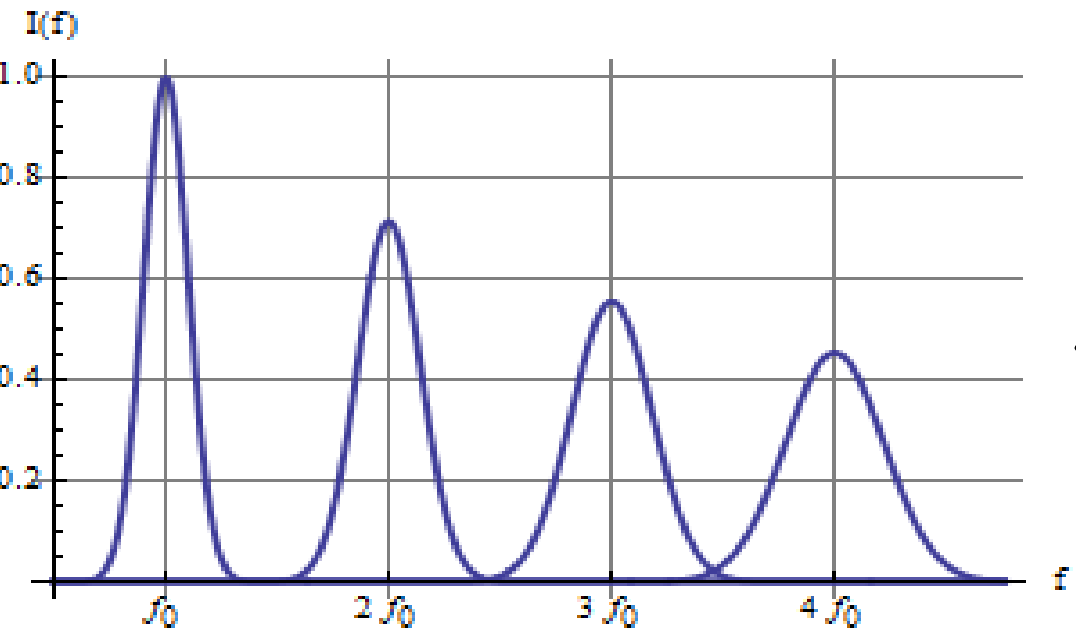
Кикер (применение сигнала к пучку)



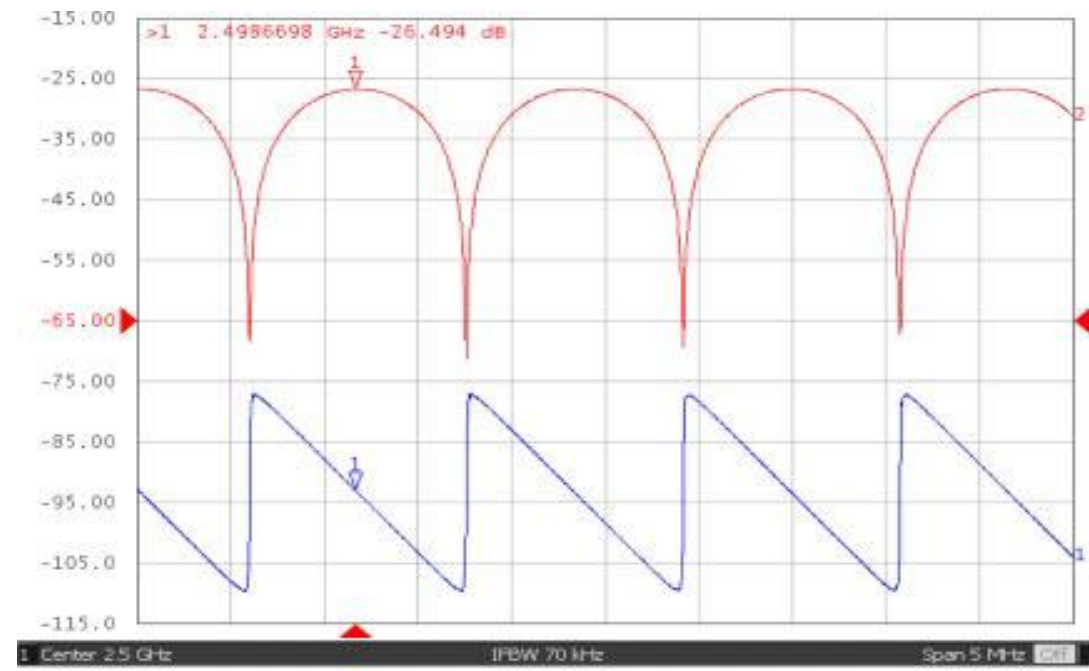
Фильтр гармоник обратной частоты



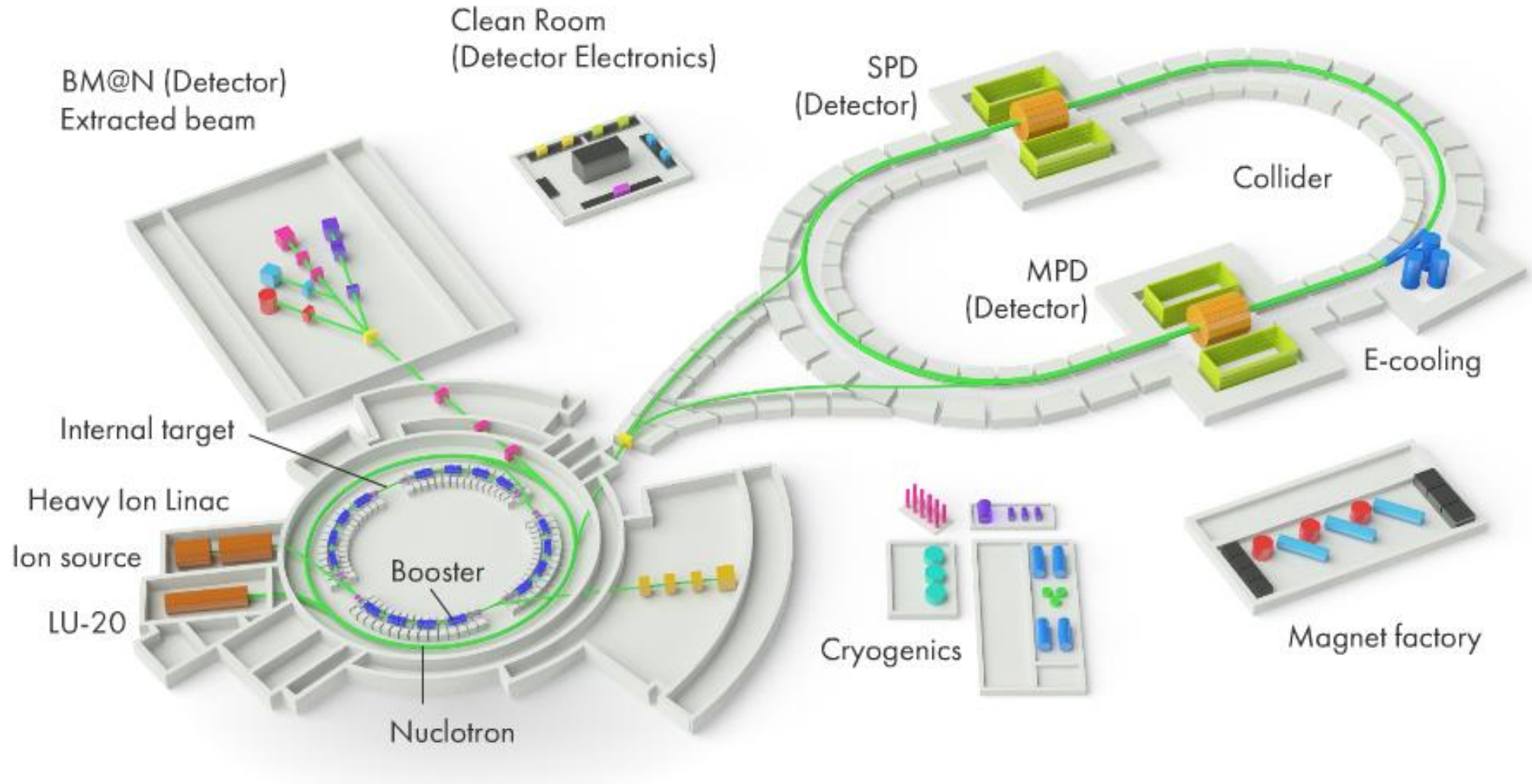
$$f_{notch} = \frac{1}{T_{LongLeg} - T_{ShortLeg}}$$



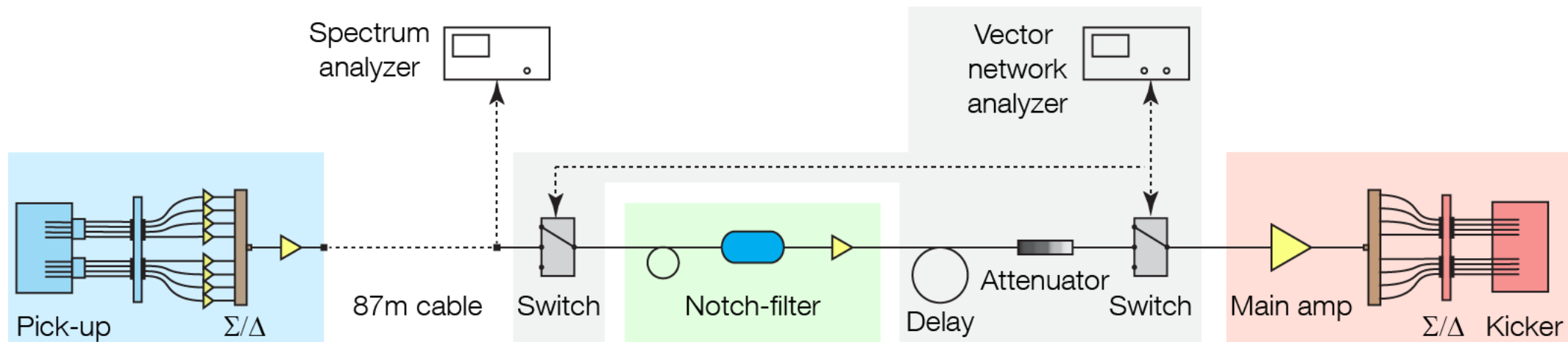
$$f_{notch} = f_{rev}$$



Nuclotron-based Ion Collider Facility (NICA)

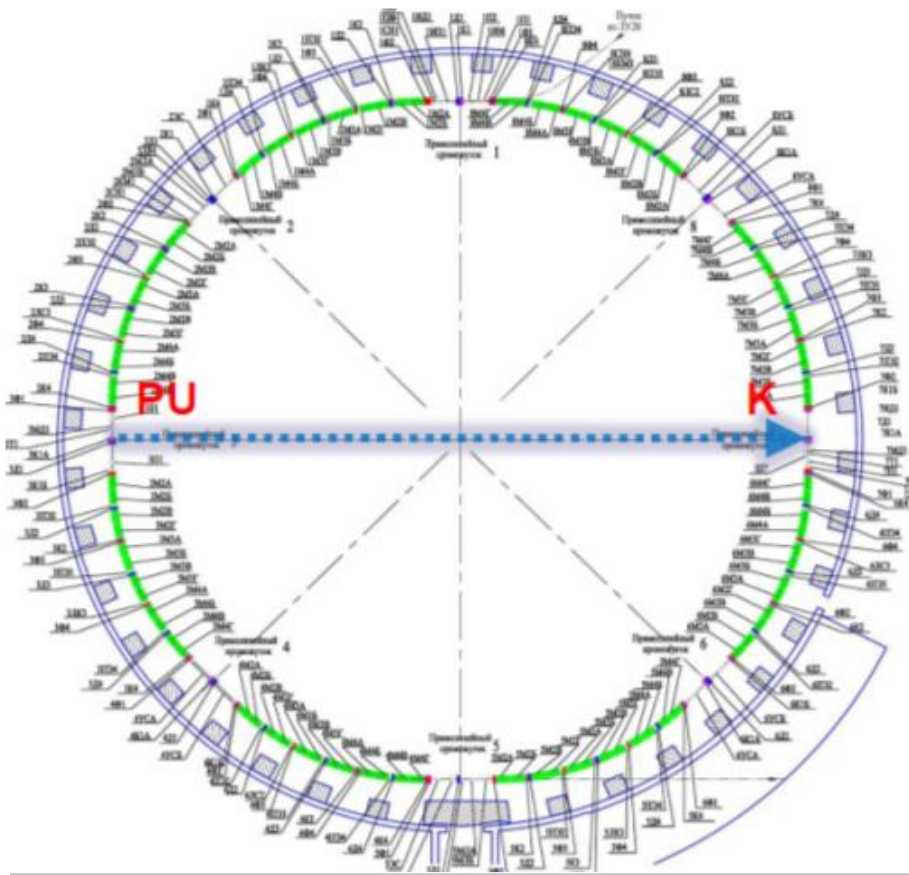


ССО Нуклотрона (прототип)



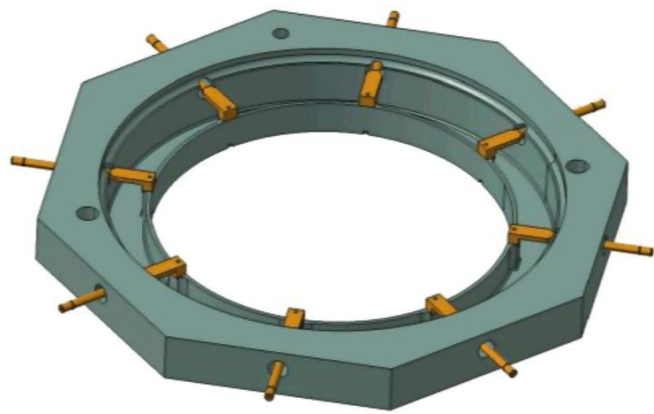
- 1**
 - Коммутация на пикапе
 - Предв. усиление
- 2**
 - Гребенчатый фильтр
 - Задержка 0-0.5нс
- 3**
 - Системная задержка 0.5-15.5нс
 - Атенуатор
 - Коммутация для настройки задержки и фильтра
- 4**
 - Основное усиление
 - Коммутация на кикере

ССО Нуклотрона (прототип)

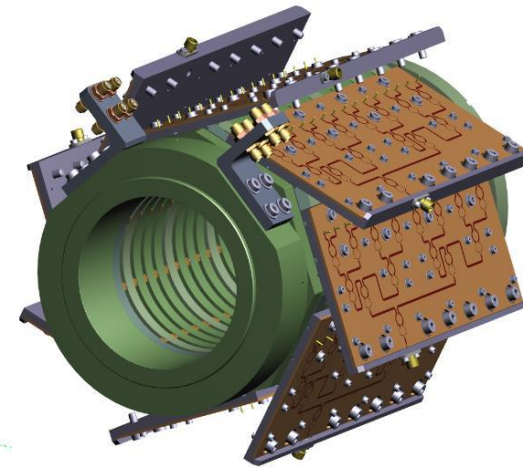
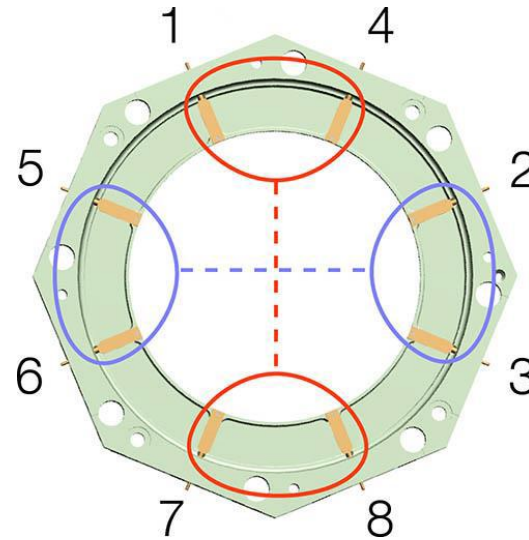


Параметр	Величина
Диапазон энергий	1,7 – 3,5 ГэВ/н
Полоса частот пропускания	2 – 4 ГГц
Средний ток сигнала в рабочей полосе пикапа	1,5 – 6 мкА
Импеданс пикапа	144 Ω
Диапазон коэффициента усиления	84 – 122 \pm 0,5 дБ
Диапазон задержки	435 177 – 501 461 \pm 1нс
Импеданс кикера	576 Ω
Средняя мощность, подводимая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

Пикап/Кикер



Кольцо пикапа

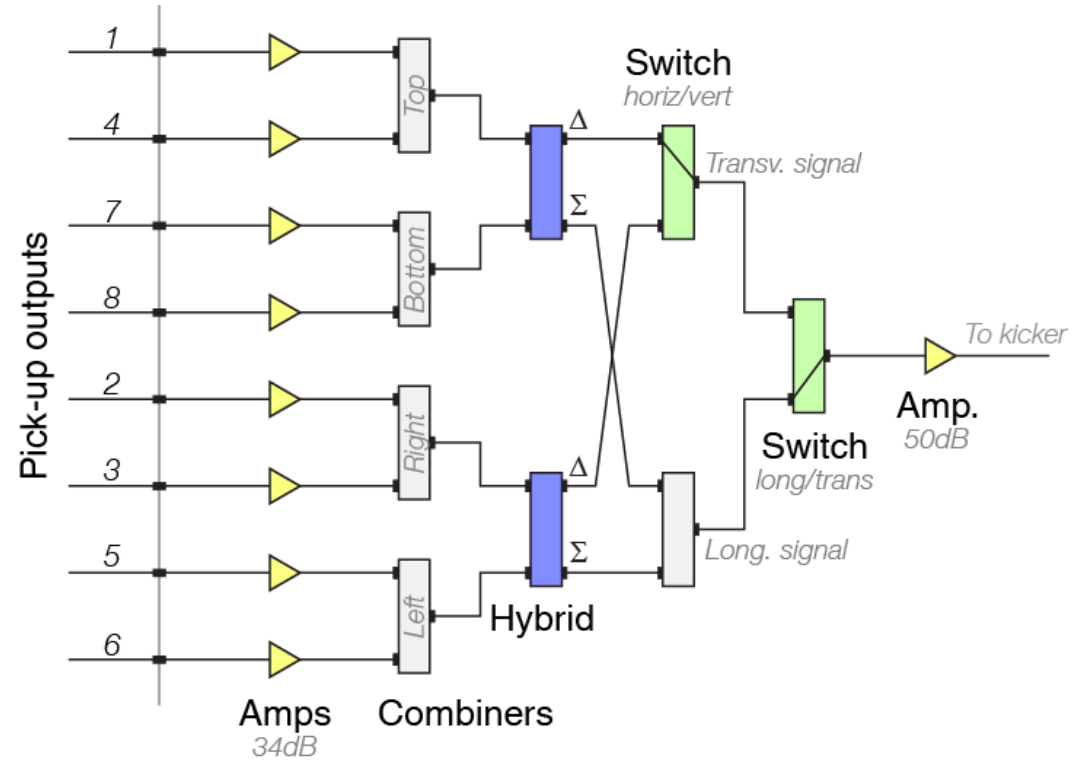
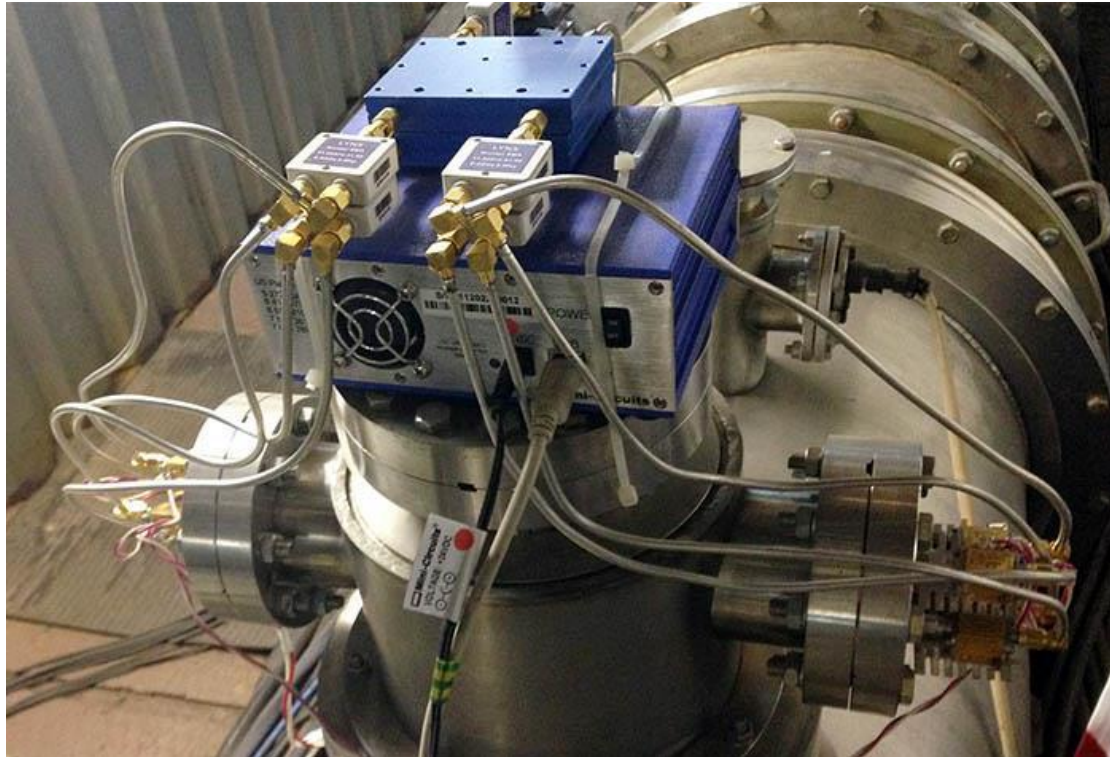


Сборка из 16 колец

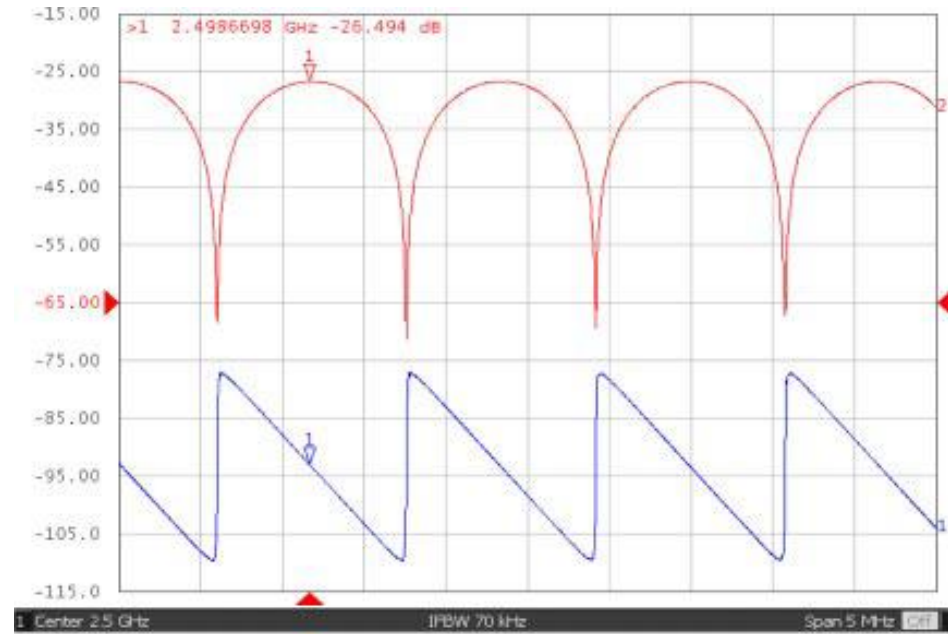
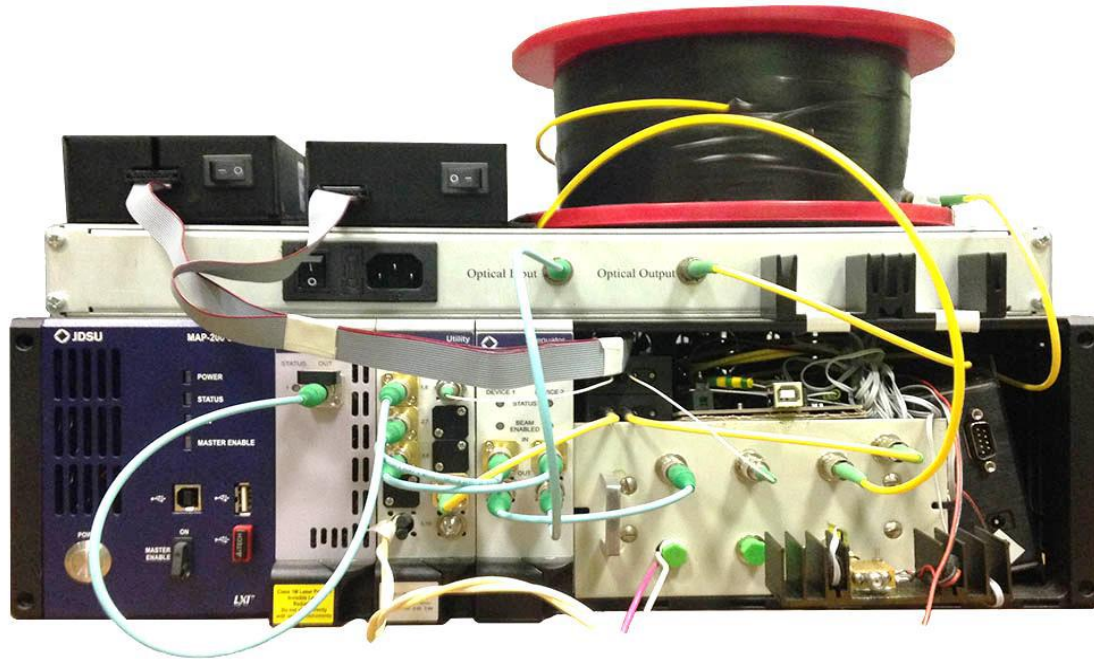
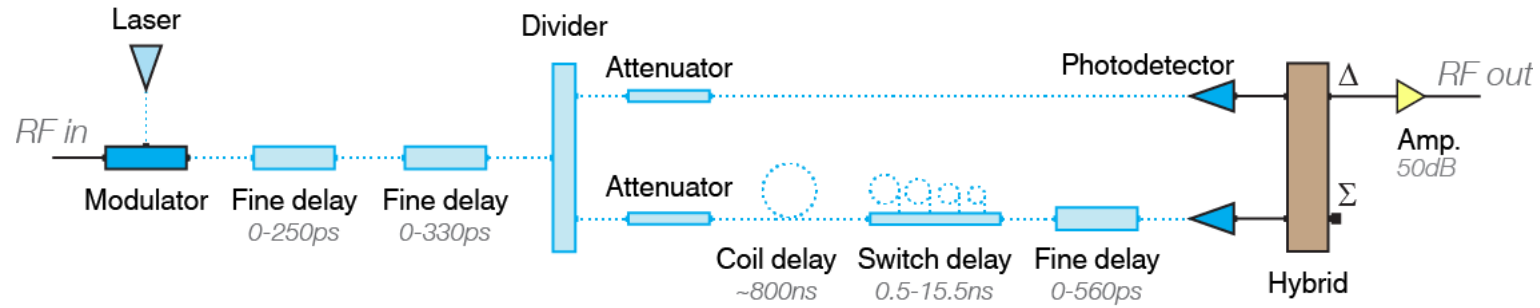
Преимущества:

Высокий импеданс (чувствительность)
Универсальность (продольный/поперечный)

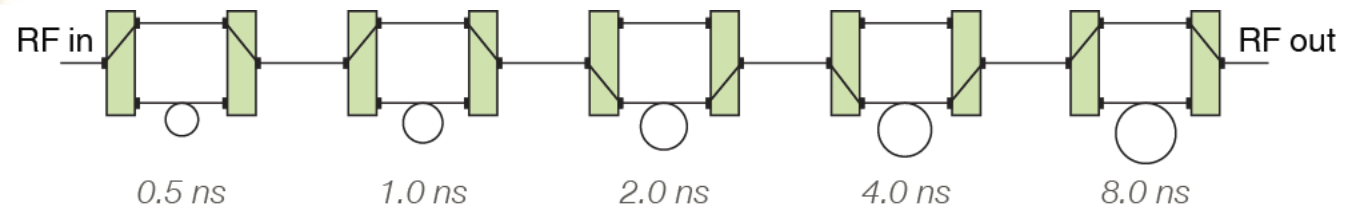
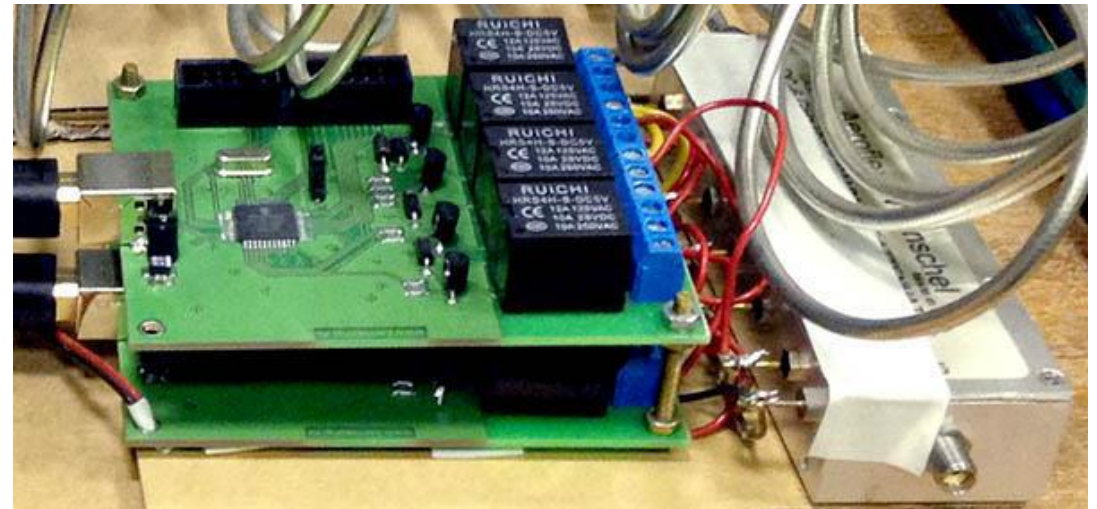
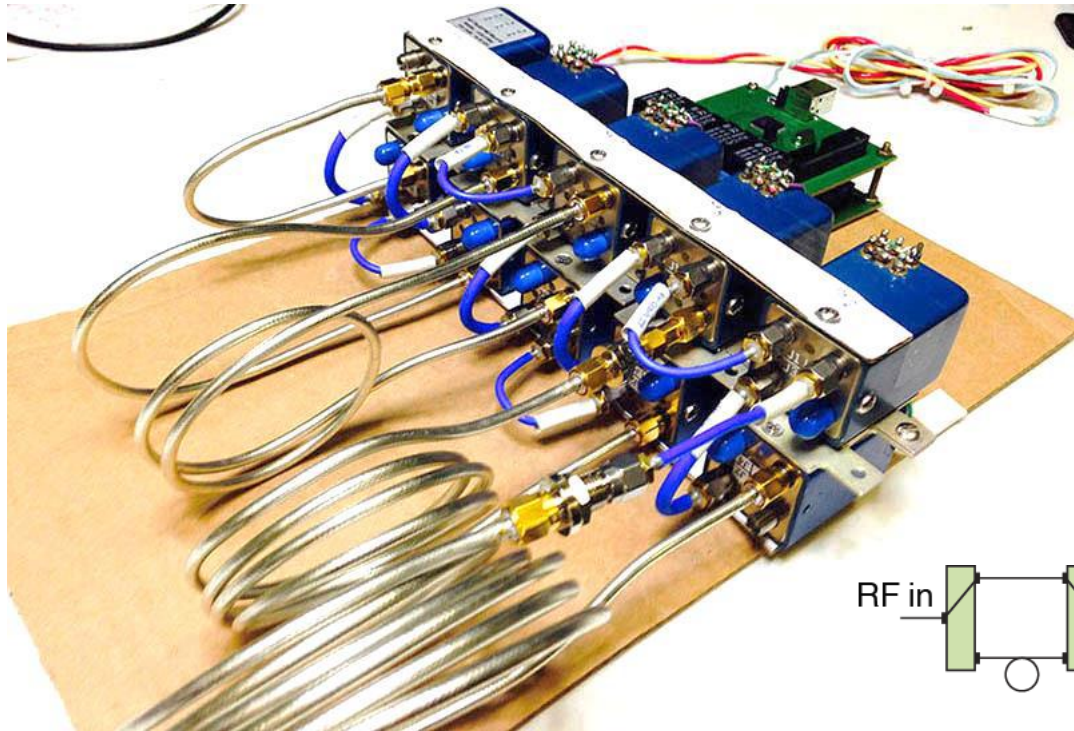
Коммутация на пикапе



Оптический Гребенчатый Фильтр



Переменные аттенюатор и задержка

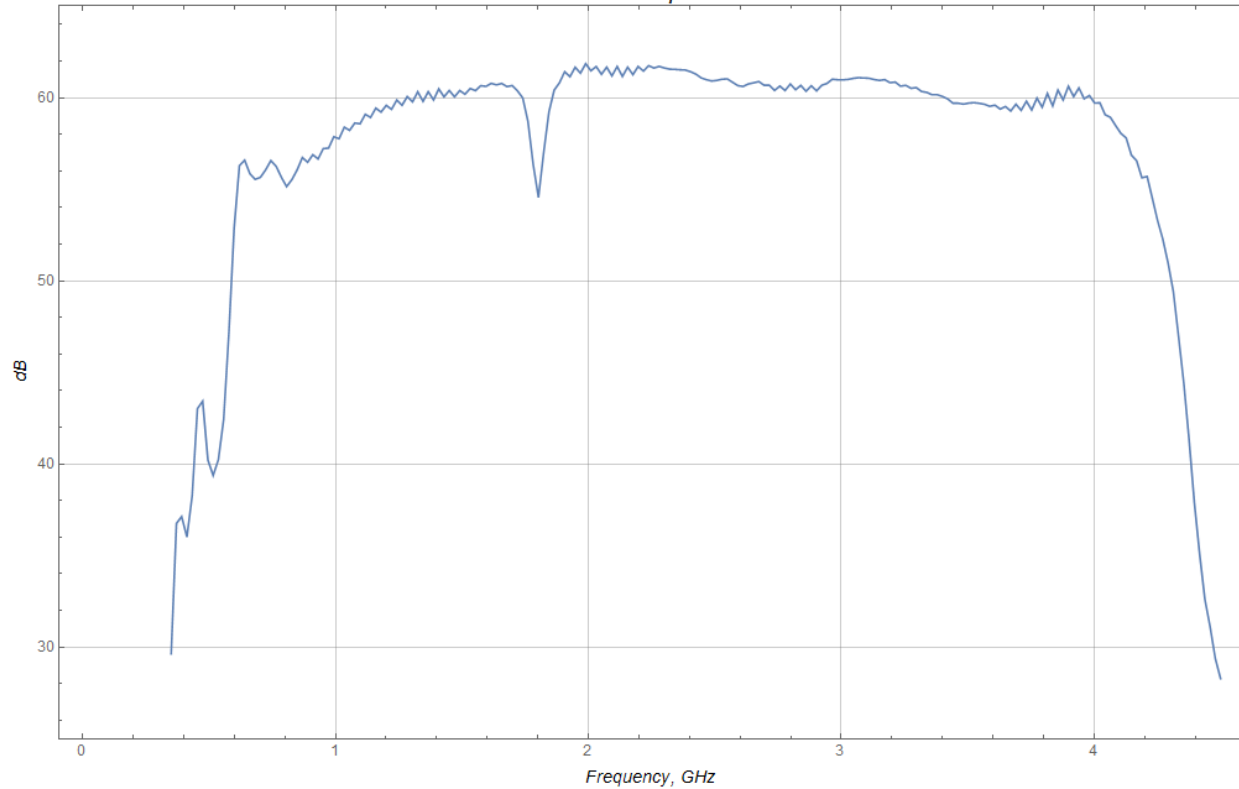


Основной усилитель

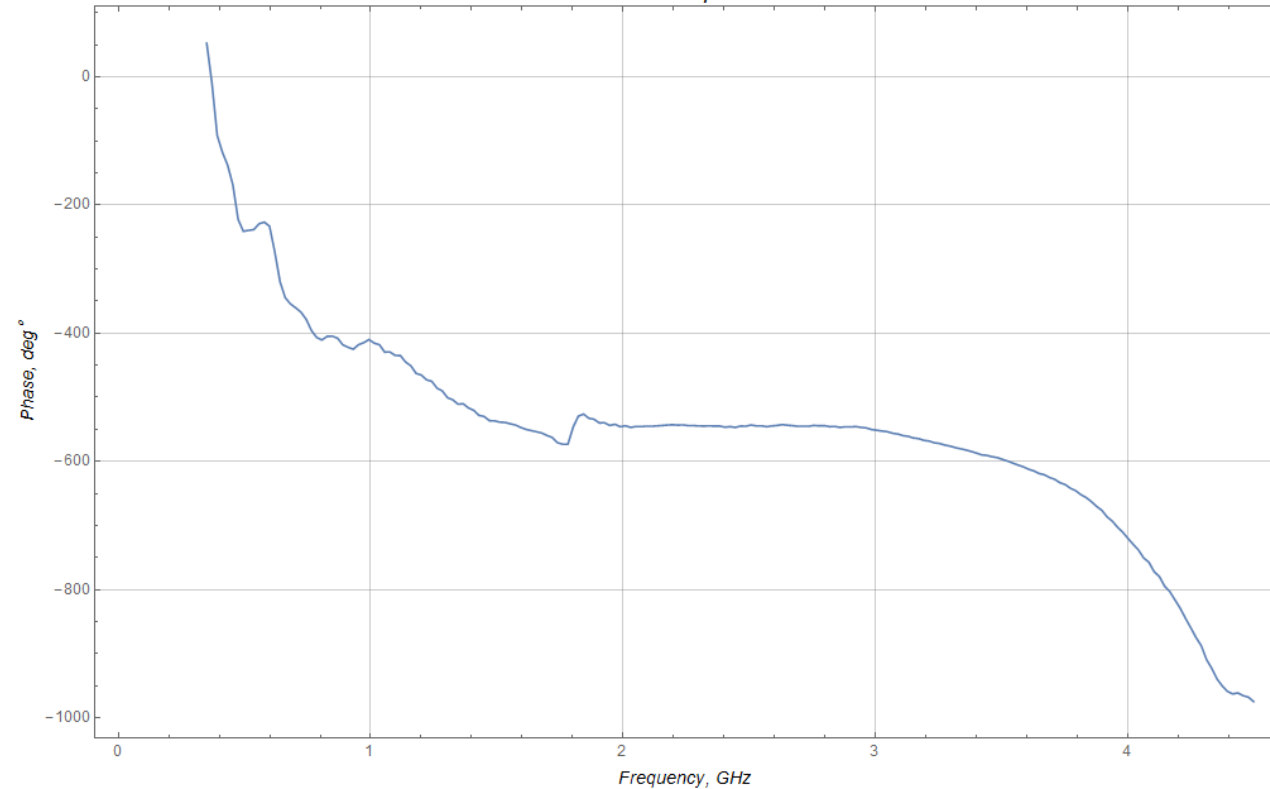


Milmega AS0204-60W

60W Amplifier

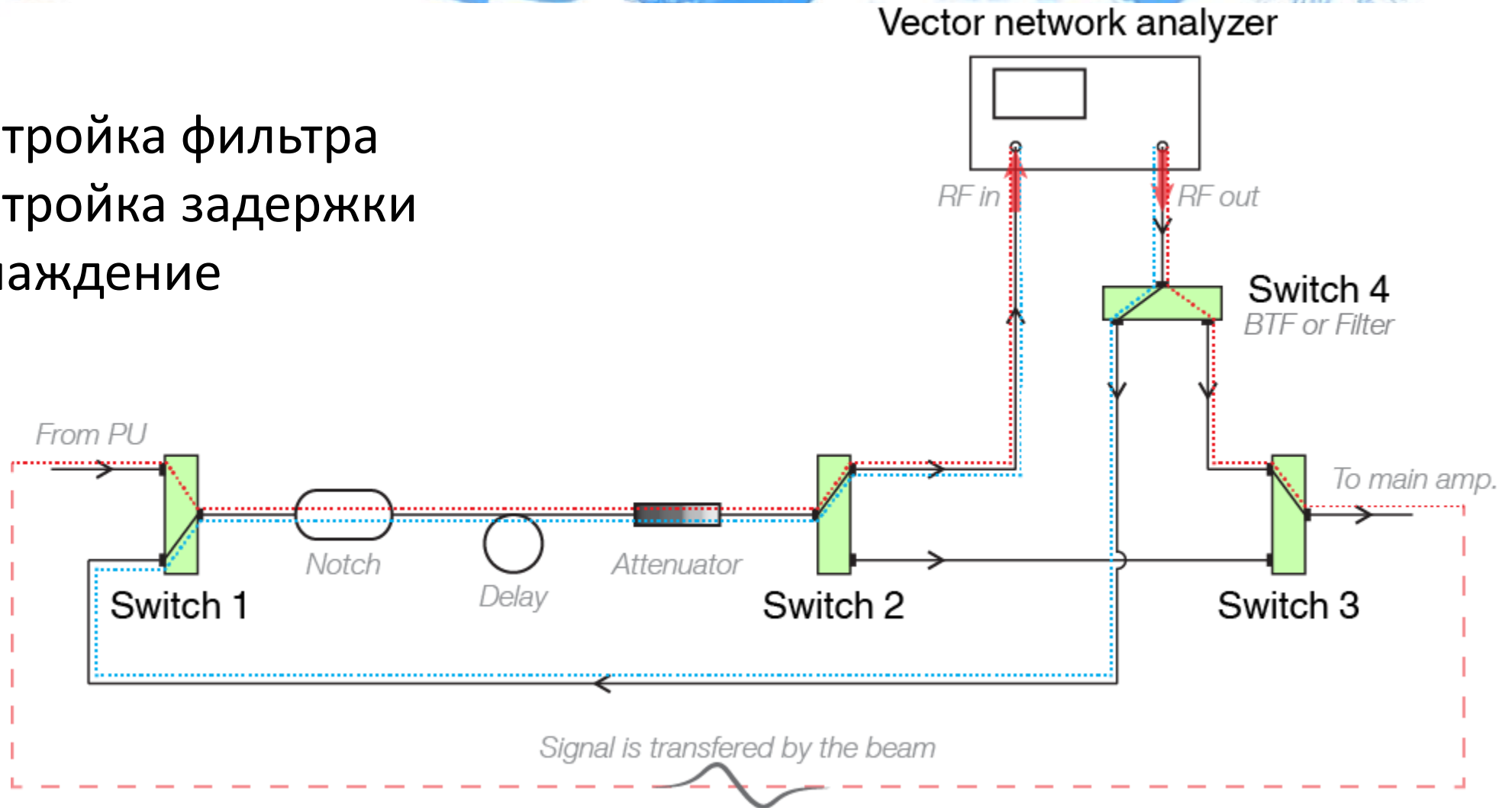


60W Amplifier

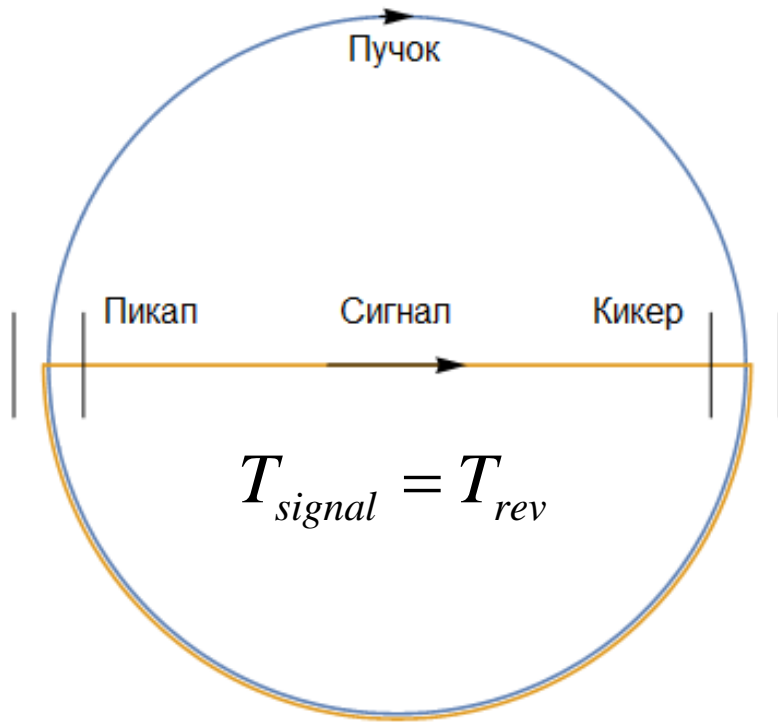


Режимы работы

- Настройка фильтра
- Настройка задержки
- Охлаждение

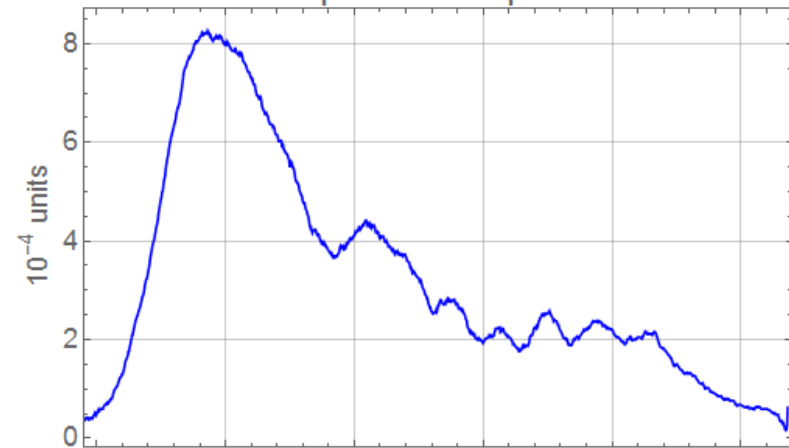


Настройка задержки

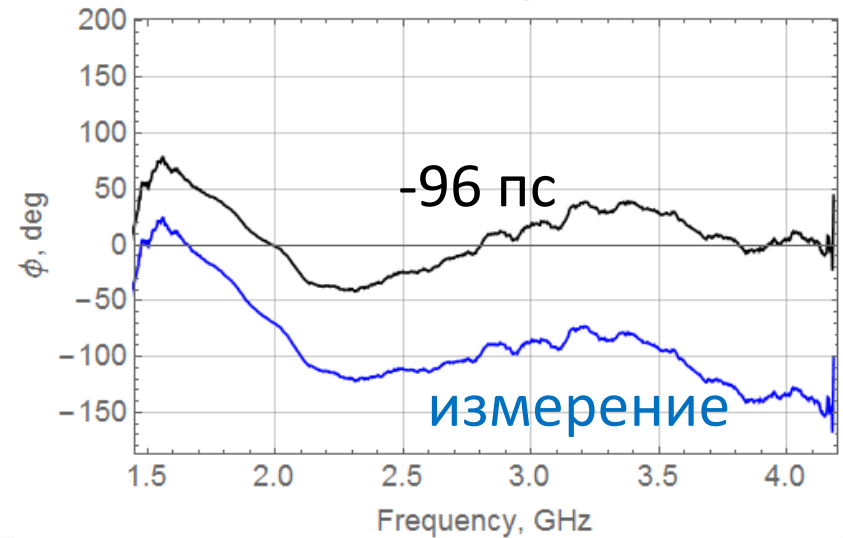


$$F(f) = -\sum_n A_n \sin(2\pi n f_{rev} t_{del} + \varphi_n)$$

Amplitude response

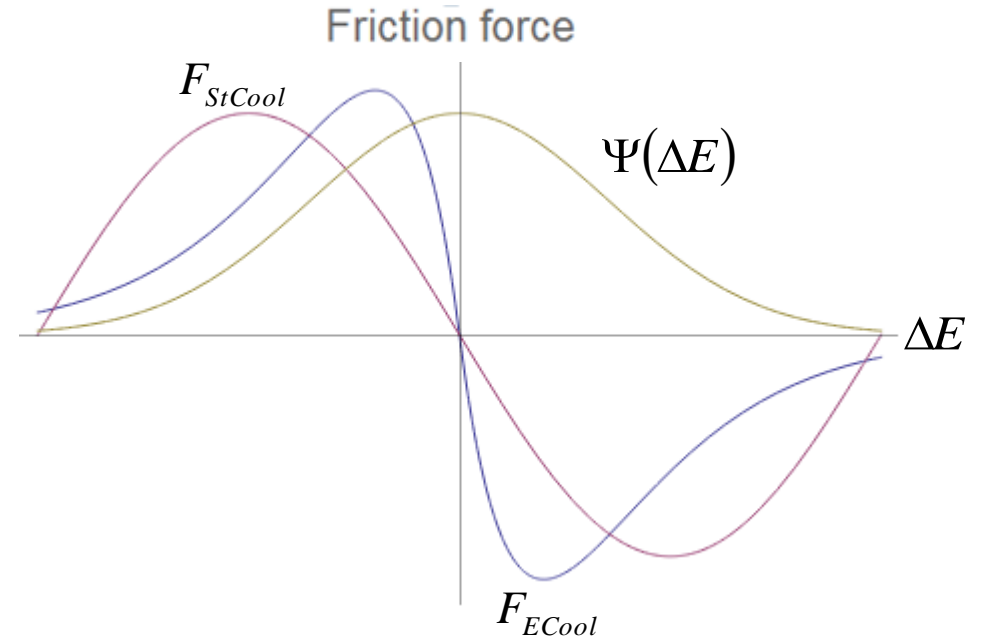
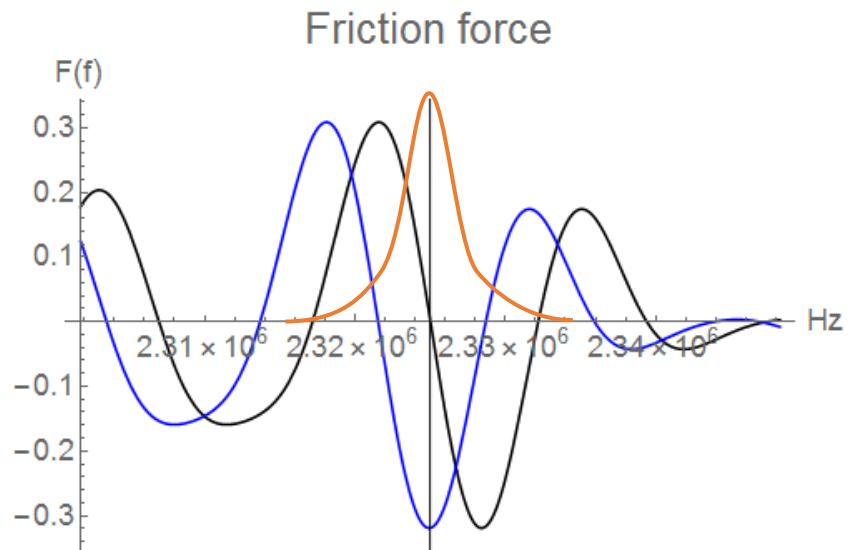


Phase response



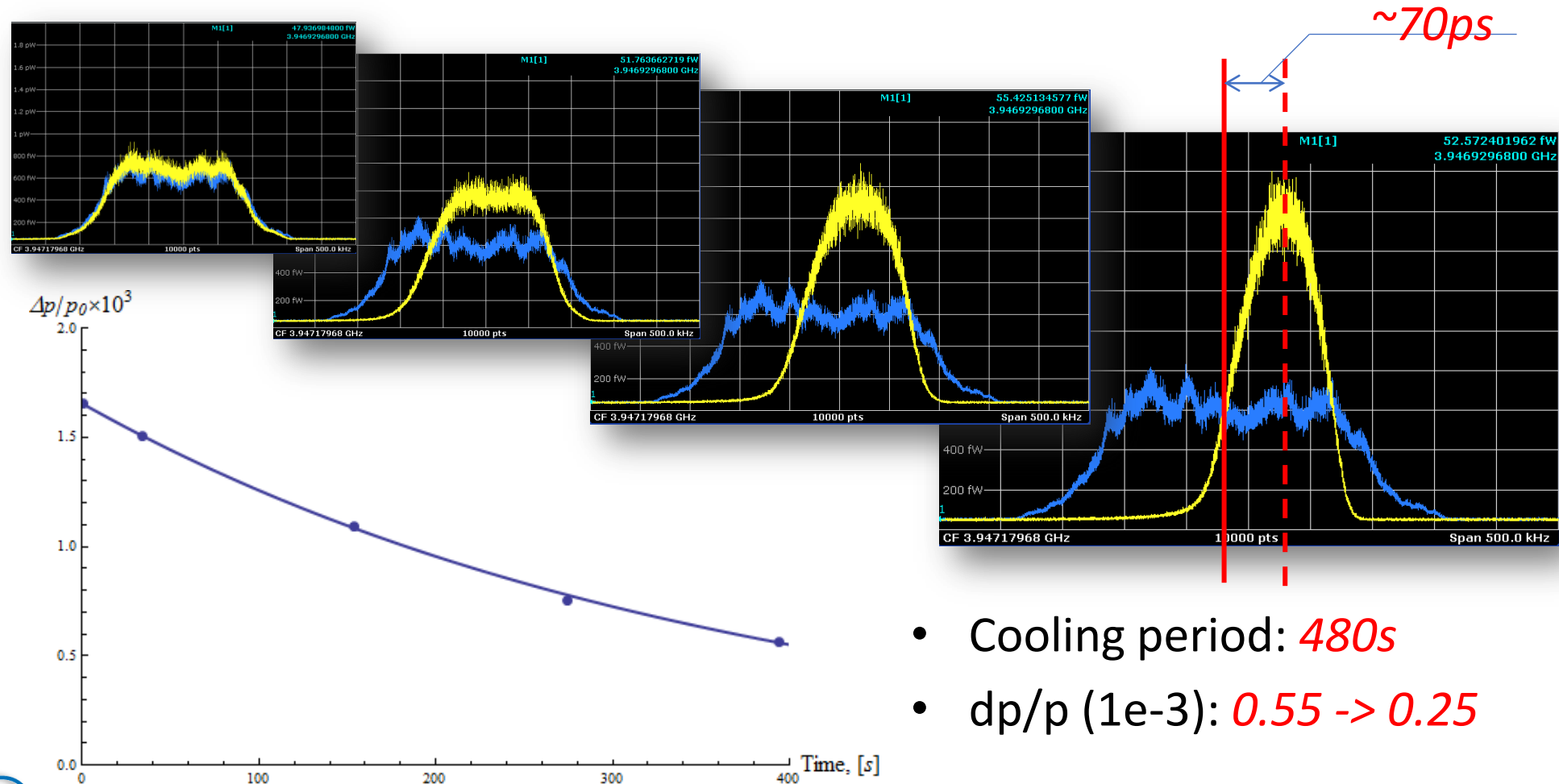
Сила трения, различия ССО и СЭО

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



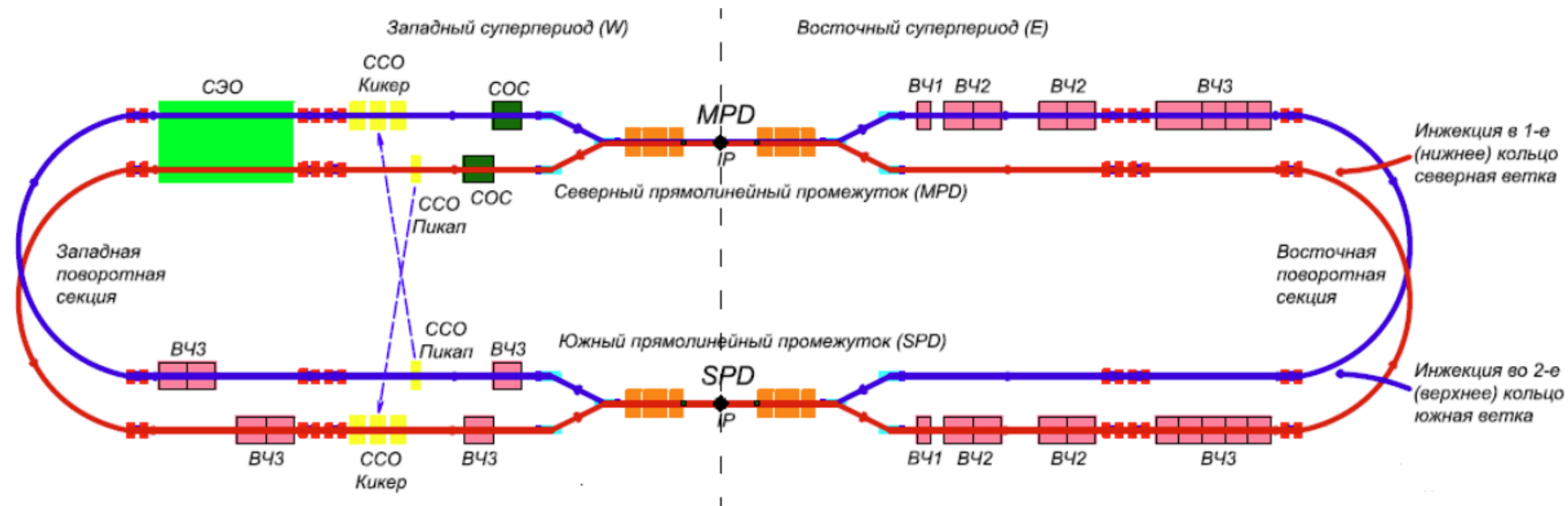
	ССО	СЭО
Принцип действия	Обратная связь	Ускоритель(+1)
Зависимость от N	Линейная (N↑, τ↑)	Нет(слабая)
Зависимость от E	Слабая	Сильная (E↑, τ↑)
Потери	Нет	Рекомбинация

Стохастическое охлаждение на Нуклотроне



- Cooling period: **480s**
- dp/p ($1e-3$): **0.55 -> 0.25**

Коллайдер NICA



Задачи ССО на NICA

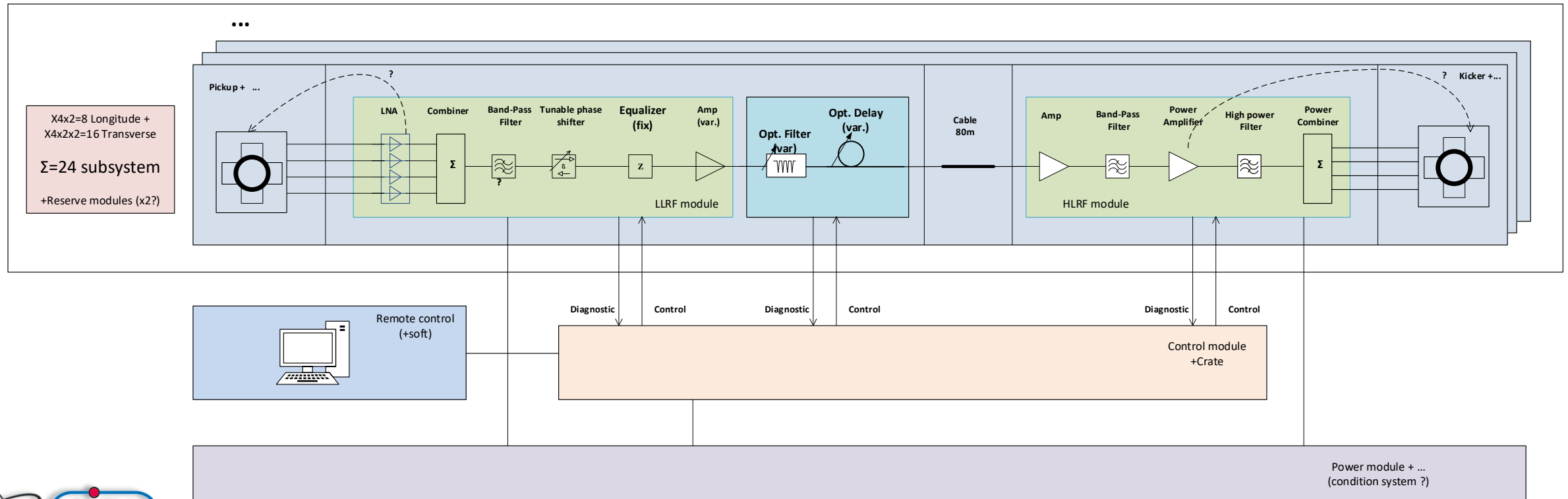
1. Охладить при накоплении
2. Препятствовать нагреву при столкновениях

Параметры ССО Коллайдера

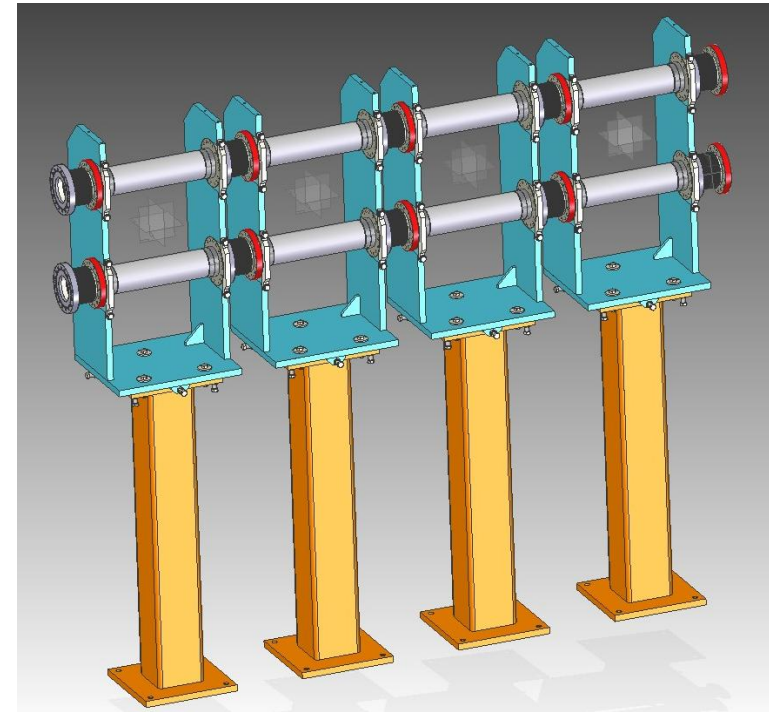
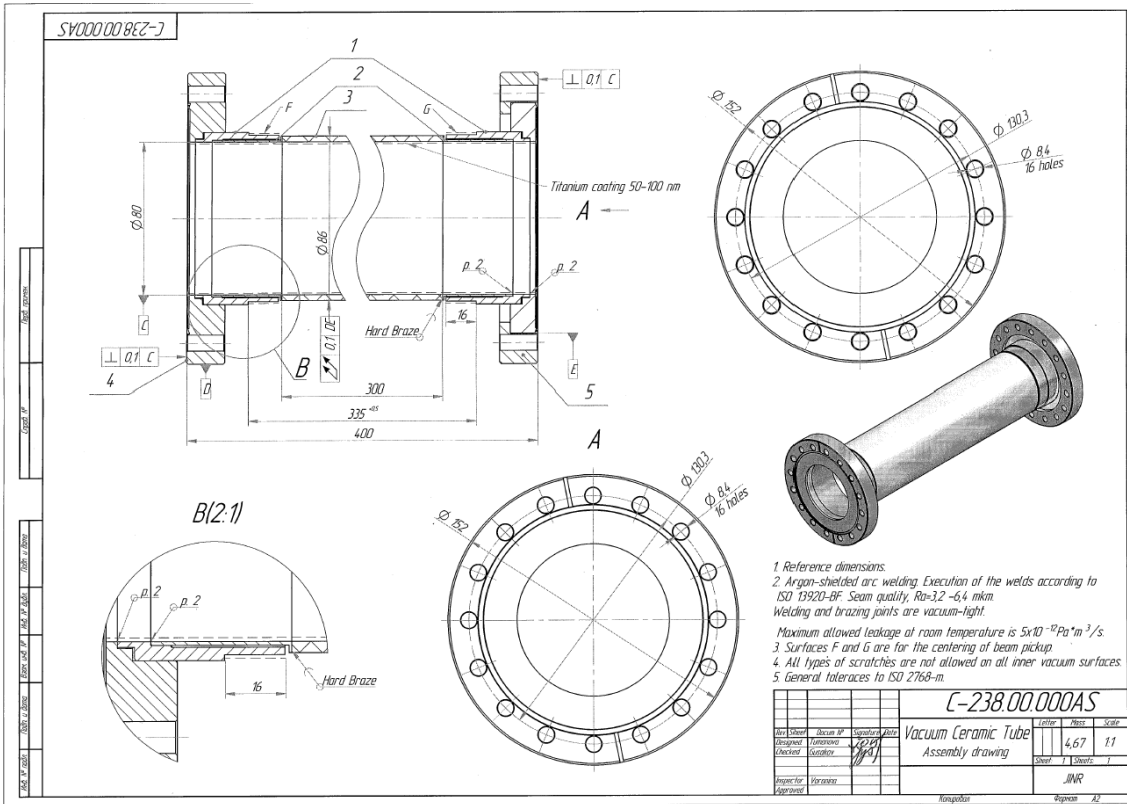
Энергия ионов $^{197}\text{Au}^{79+}$, ГэВ/н	(1.0) 3.0– 4.5			
Метод охлаждения	Фильтр(Δ, Σ)/TOF(0,+1,+2)			
Полоса пропускания, ГГц	0.7 – 3.2			
Разбиение полос, ГГц	0.7-1.0	1.0-1.5	1.5-2.2	2.2-3.2
Пучковое (кабельное) расстояние от пикапа до кикера, м	186 (~100)			
Шунтовое сопротивление пикапа/кикера, 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 обратной частоты.
- СВЧ подсистема большой мощности (HLRF)
- Система управления.
- Система диагностики.
- Программная подсистема.

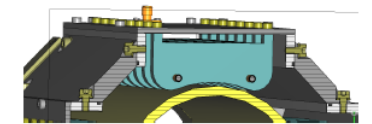
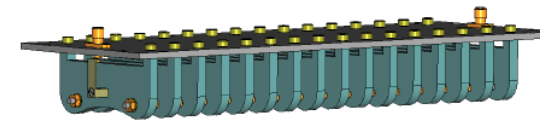
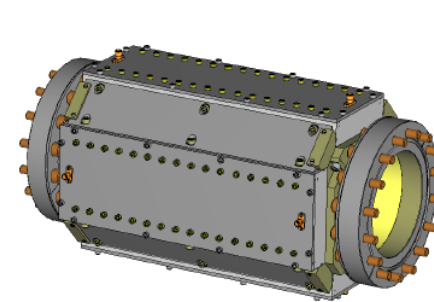
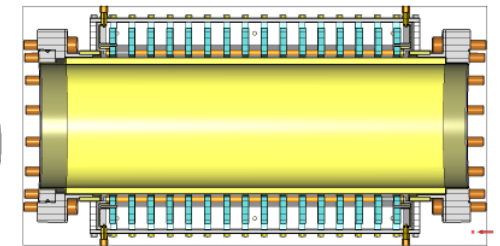
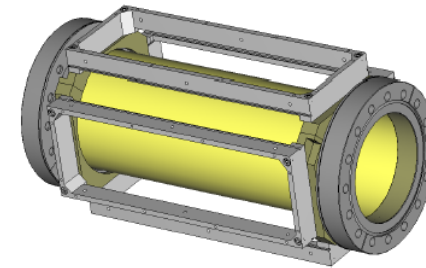
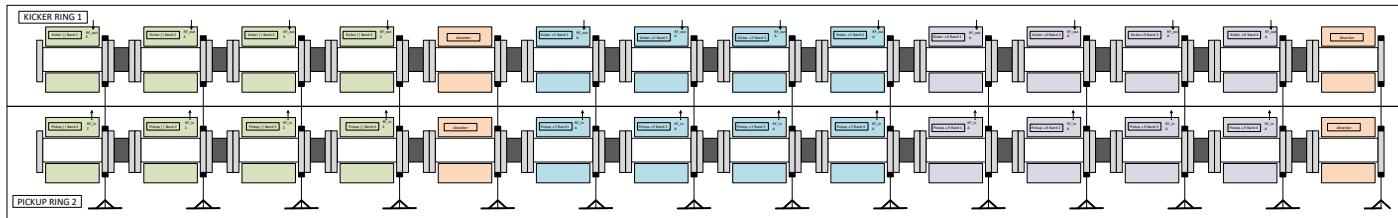
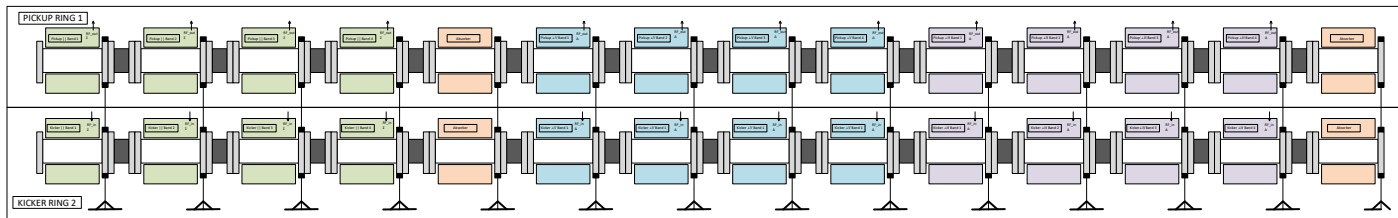


Механическая подсистема



Пассивная СВЧ система

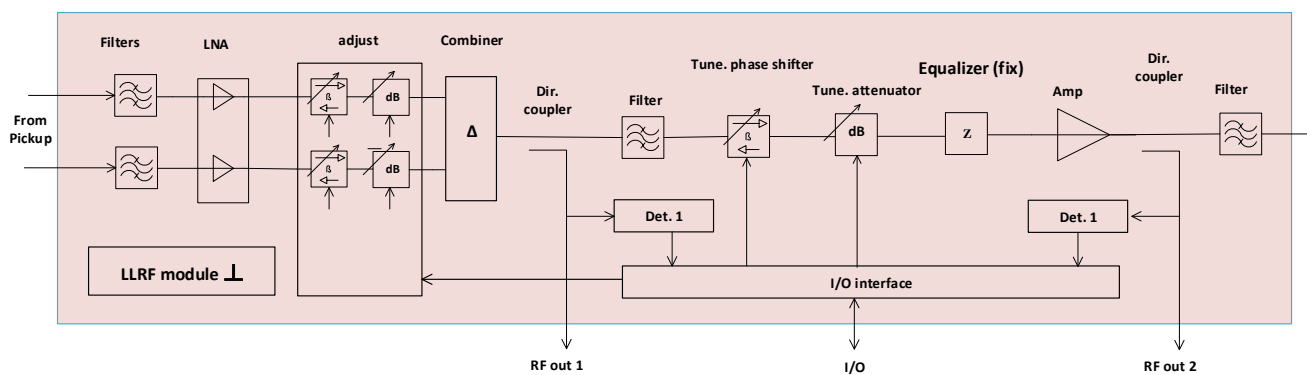
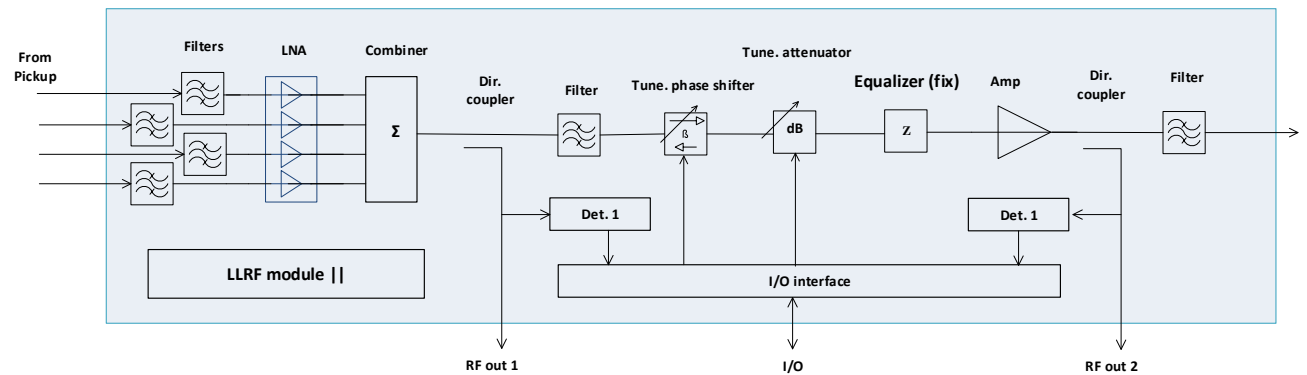
1 полоса 2 – 4 ГГц ---> распределенная полоса 0,7 – 3,2 ГГц на 4 полосы



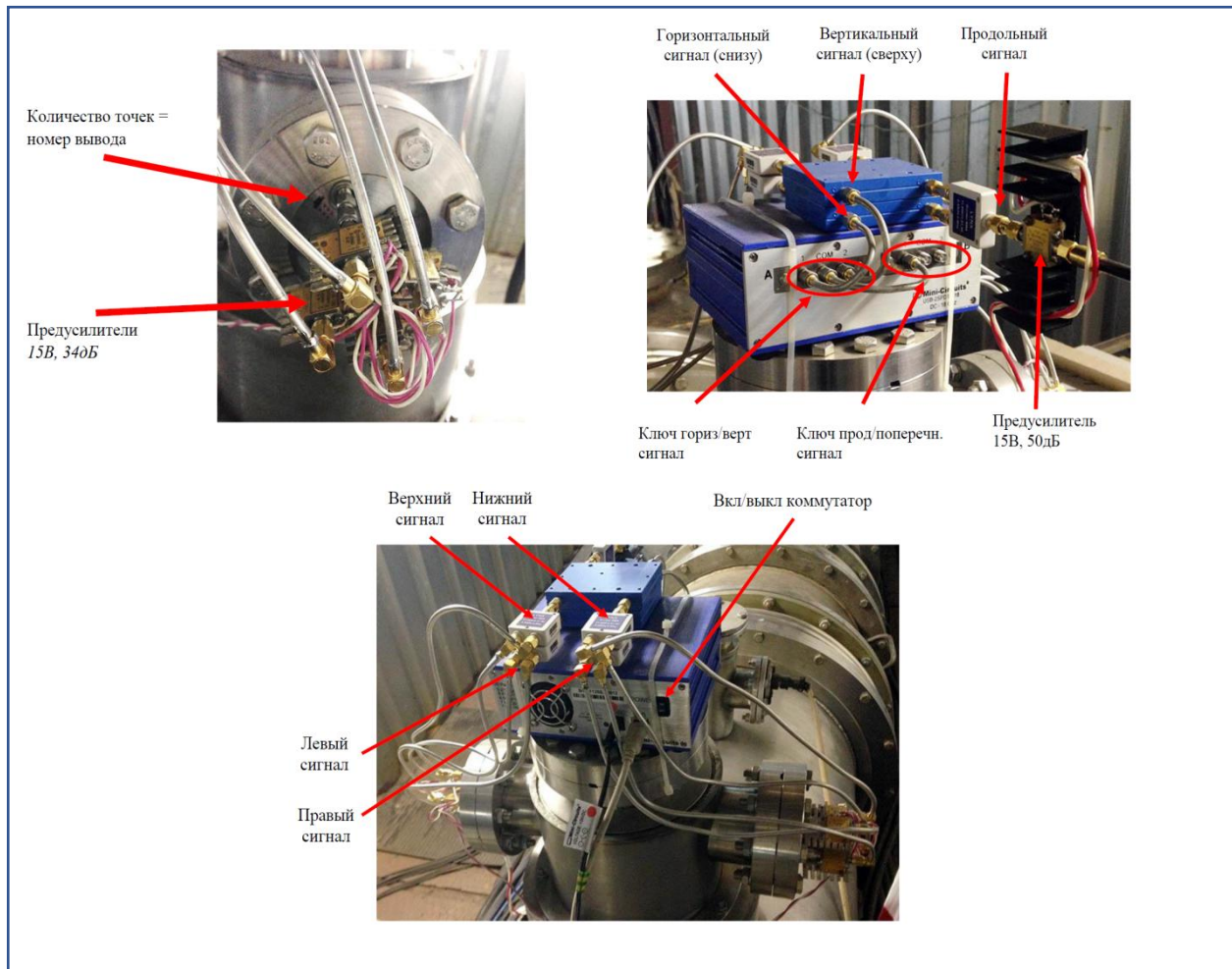
Система LLRF

4.1	LLRF
4.2	LLRF ⊥

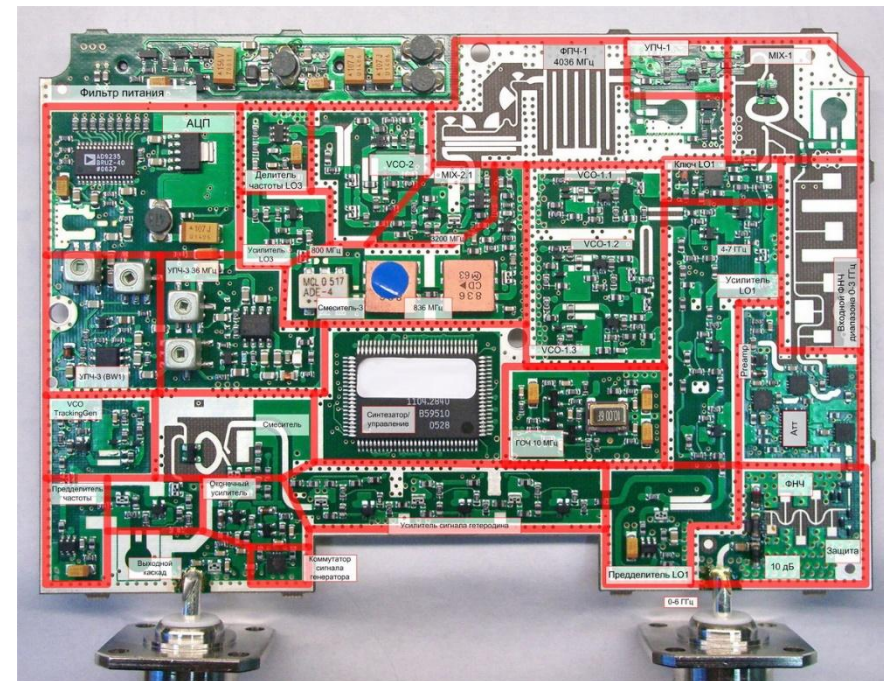
4.1.1	МШУ
4.1.2	Сумматор
4.1.3	Фильтры (вход., промежут., выход.)
4.1.4	Регулируемый фазовращатель
4.1.5	Регулируемый аттенюатор
4.1.6	Эквалайзер
4.1.7	Направленные ответвители
4.1.8	Датчики – мощности, температуры, тока..
4.1.9	Корпус модуля LLRF
4.1.10	Интерфейсы управления и контроля
4.2.1-4.2.10	...
4.2.11	Система юстировки



Система LLRF



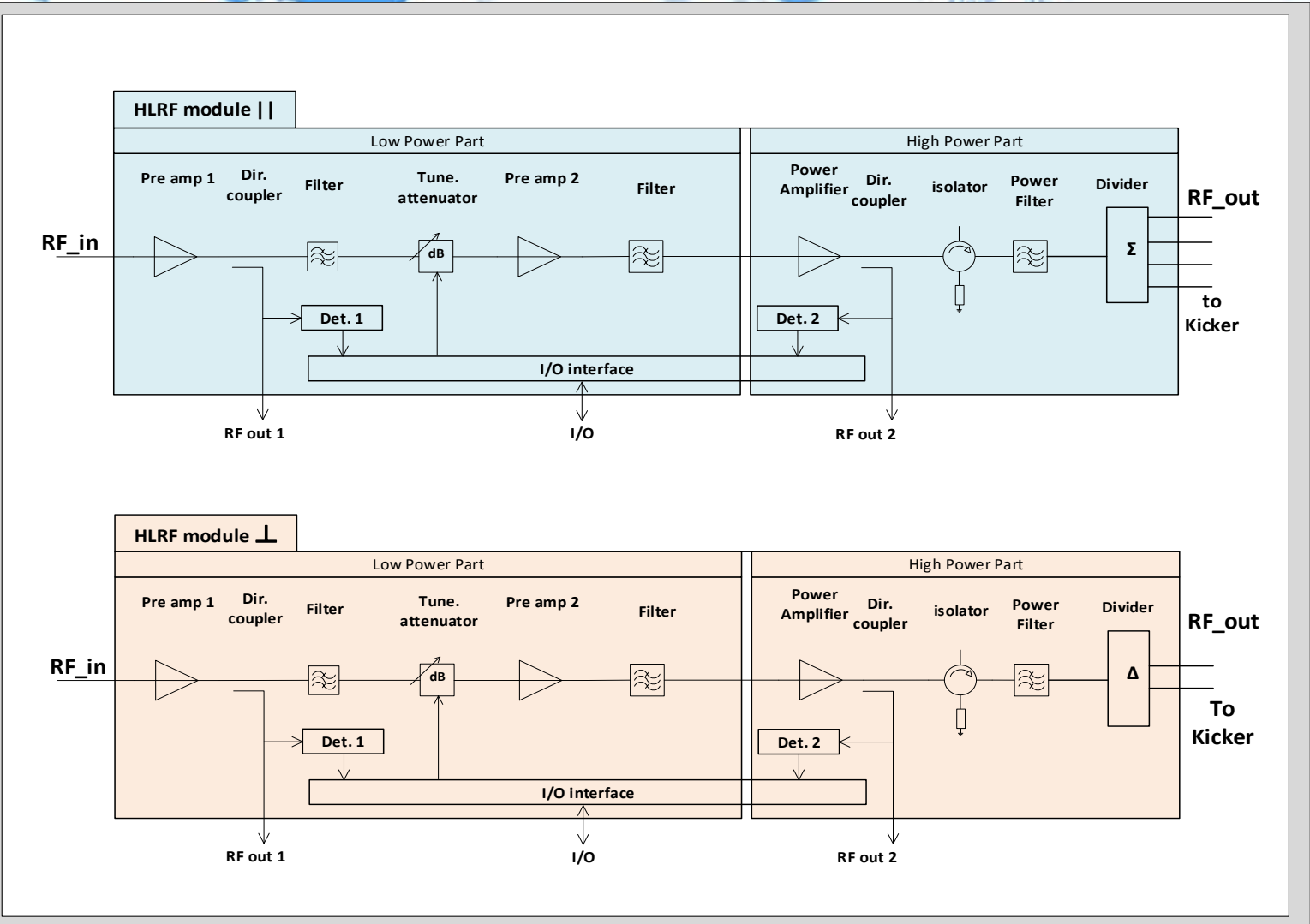
Модульное исполнение



Система HLRF

5.1	HLRF
5.2	HLRF ⊥

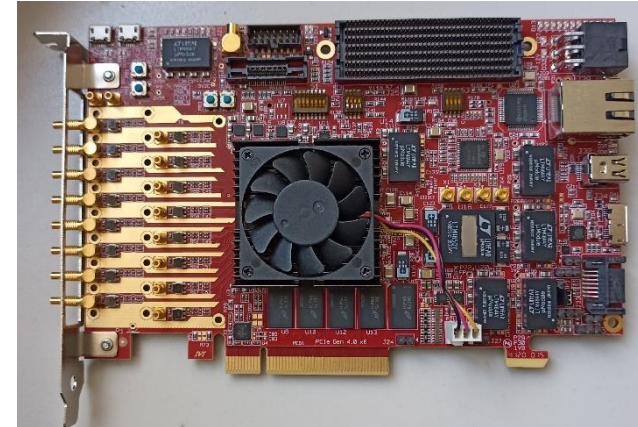
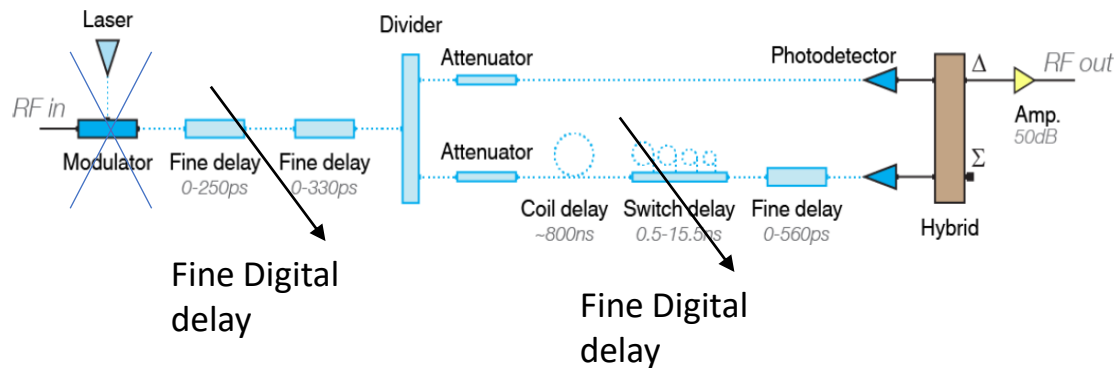
5.1.1	Предусилители
5.1.2	Маломощный НО
5.1.3	Фильтры малой мощности
4.1.4	Регулируемый аттенуатор
5.1.5	Усилитель мощности
5.1.6	Фильтр высокой мощности
5.1.7	Высокомощный НО
5.1.8	Датчики – мощности, температуры, тока..
5.1.9	Вентиль
5.1.10	Корпус модуля HLRF
5.1.11	Делитель высокой мощности
5.1.12	Интерфейсы управления и контроля
4.2.1-4.2.11	...
4.2.12	Система юстировки



Фильтр гармоник обратной 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

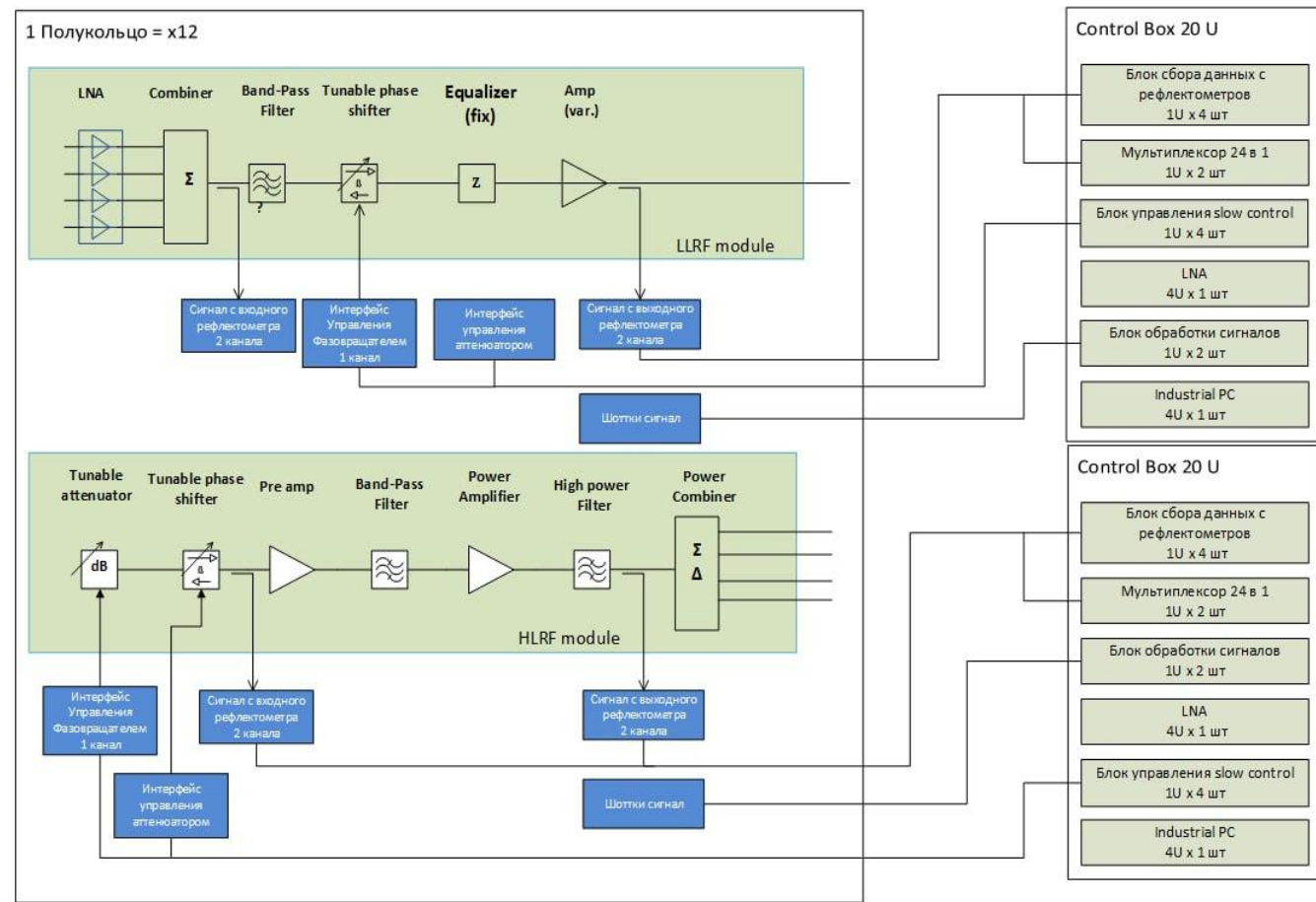
Система управления и диагностики

Система управления должна интегрировать все подсистемы.

Контролируемые/управляемые параметры системы:

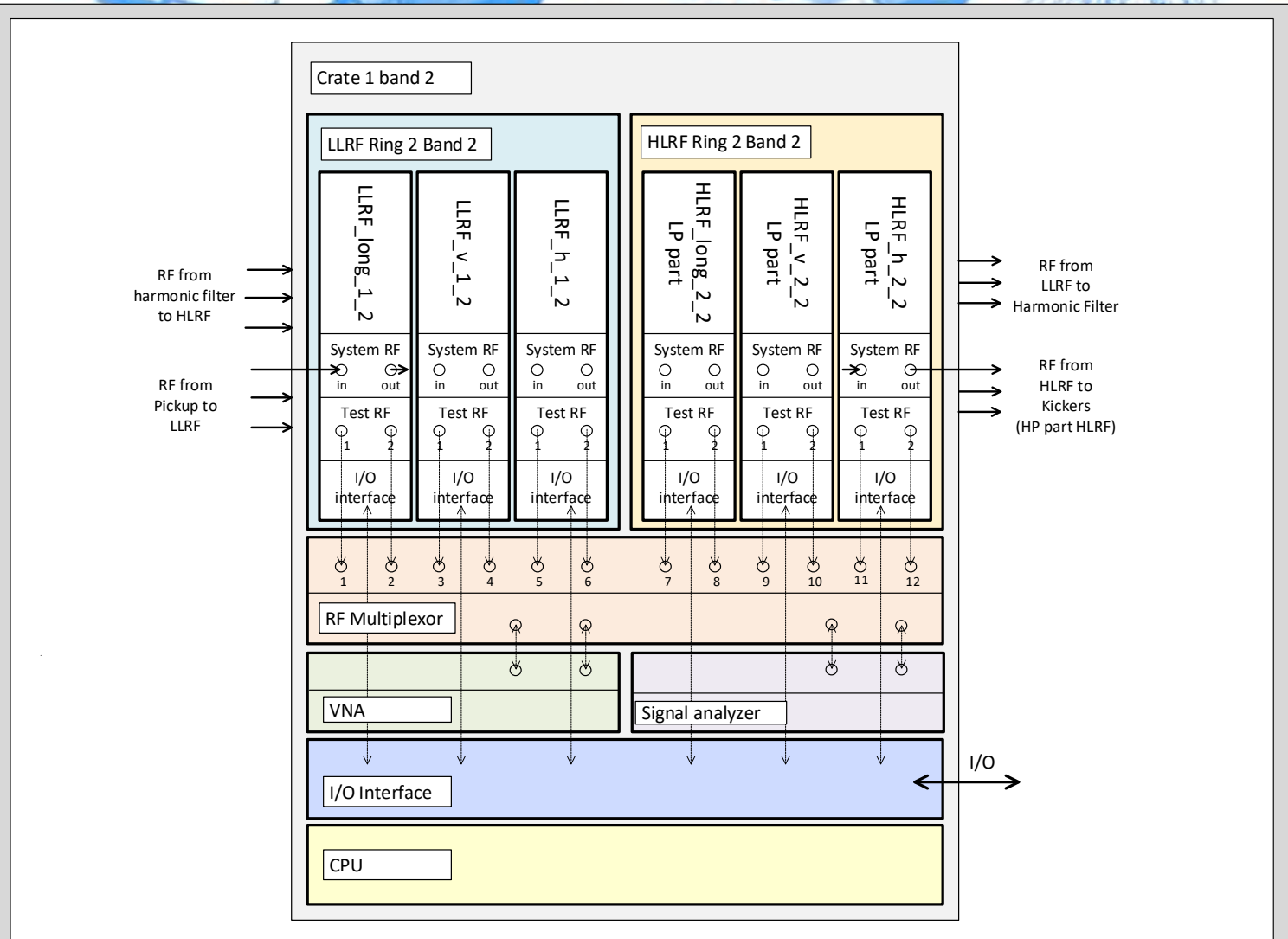
- Контроль функционального состояния модулей (питание, температура и т.д., уровни СВЧ сигналов).
- Контроль передаточной характеристики системы (АЧХ и особенно ФЧХ).
- Измерение Шоттки-шума (продольного и поперечного).
- Управление фильтром гармоник.
- Управление АЧХ и ФЧХ системы (аттенюаторы и фазовращатели).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

Система управления должна быть унифицирована для всех модулей.



Система управления и диагностики

- 7.1 Стойка (крейт)
- 7.2 Модули LLRF
- 7.3 Модули HLRF
- 7.4 СВЧ мультиплексор
- 7.5 СВЧ анализатор цепей
- 7.6 СВЧ анализатор сигналов
- 7.7 Интерфейс связи с модулями
- 7.8 Инешний интерфейс
- 7.9 Вычислительный модуль
- 7.10 СВЧ интерфейс (разъёмы, кабели)

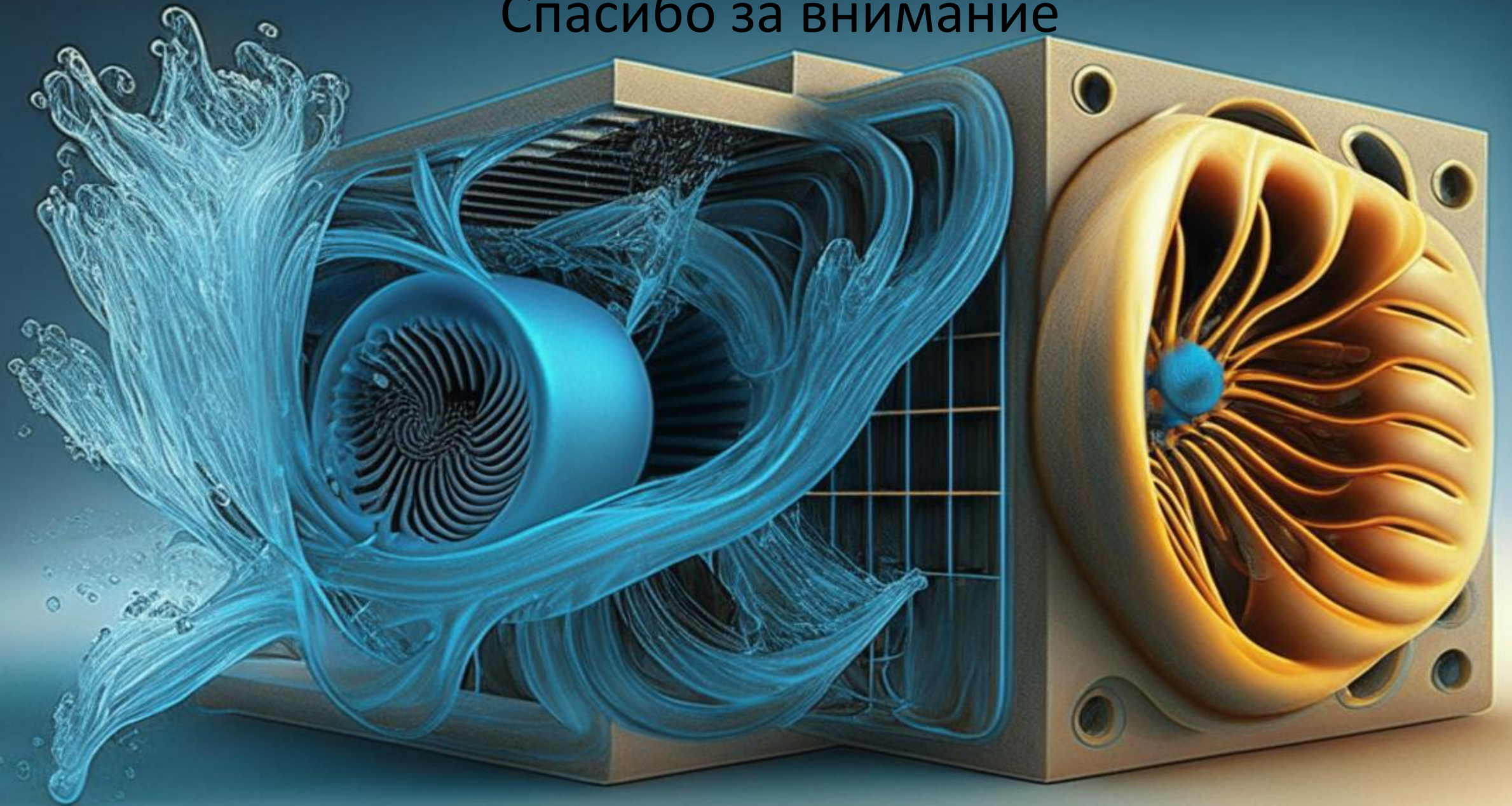


Программная подсистема (высокого уровня)

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»