СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКА



Ходаков Михаил Руководитель отдела вакуумного и криогенного оборудования «Научные приборы и сист<u>емы»</u>



Система измерения поперечного сечения электронного пучка (PRF)

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

- Система измерения поперечного сечения (PRF) с мишенью для сечения это устройство для измерения поперечного размера электронного пучка. Она также является важной частью измерения таких параметров электронного пучка, как эмиттанс, энергия и энергетическое рассеяние.
- Особенности : Интерцептивный метод измерения («видно невооружённым глазом»)

ПРИНЦИП ИЗМЕРЕНИЯ И СТАНДАРТНАЯ КОНФИГУРАЦИЯ СИСТЕМЫ

• Принцип измерения:

При бомбардировке высокоэнергетическими частицами флуоресцентного материала (Al₂O₃/YAG) облучаемая область испускает флуоресцентное излучение. Форма светового пятна соответствует форме поперечного сечения пучка электронов. Система формирования изображения фиксирует и обрабатывает данные о световом пятне, что позволяет определить размеры сечения пучка.

• Конфигурация системы

- Вакуумная камера с мишенью
- Механизм перемещения
- Оптический блок
- Система управления движением и сбора данных изображения



Картиное оборудование на одной волне

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

НА ПРИМЕРЕ ЛИНЕЙНОГО УЧАСТКА SHINE

Состав системы: вакуумная камера, механизм перемещения и оптический блок



- Разрешение изображения: лучше 20 мкм при 100 пКл
- Точность повторного позиционирования: лучше 20 мкм





 IST-SSRF – изготовлено по спецзаказу
 Встроенные компоненты: двигатель, энкодер, контроллер, I/О-порты – компактная и удобная в обслуживании система
 Управление по TCP/IP, самоблокирующиеся разъёмы

Матричная камера

- Компактная и надежная конструкция
- Разрешение 1440×1080 (размер пикселя 3.45 мкм)
- Регулируемые усиление и время экспозиции

Теоретическое разрешение изображения: лучше 15 мкм

А СТАТИТИКИ СТАТИТИКИ. СТАТИТИКИ СТАТИТИКИ СТАТИТИКИ СТАТИТИКИ СТАТИТИКИ СТАТИТИКИ. СТАТИТИКИ СТАТИТИКИ СТАТИТИКИ СТАТИТИКИ СТАТИТИКИ СТАТИТИКИ. СТАТИТИКИ СТАТИТИКИ СТАТИТИКИ СТАТИТИКИ. СТАТИТИКИ СТАТИТИКИ СТАТИТИКИ. СТАТИТИКИ СТАТИТИКИ СТАТИТИКИ. СТАТИТИКИ СТАТИТИКИ СТАТИТИТИ. СТАТИТИТИКИ СТАТИТИТИ. СТАТИТИТИ СТАТИТИТИ СТАТИТИ. СТАТИТИТИ СТАТИТИТИ. СТАТИТИТИ СТАТИТИТИ СТАТИТИ. СТАТИТИТИ СТАТИТИТИ. СТАТИТИТИ СТАТИТИТИ. СТАТИТИТИ СТАТИТИТИ. СТАТИТИТИ СТАТИТИ. СТАТИТИТИ СТАТИТИ. СТАТИТИТИ СТАТИТИТИ. СТАТИТИТИ. СТАТИТИТИ СТАТИТИ. СТАТИТИТИ. СТАТИТИ СТАТИТИТИ. СТАТИТИТИ. СТАТИТИТИ. СТАТИТИТИ. СТАТИТИТИТИТИ. СТАТИТИТИ. СТАТИТИТИ. СТАТИТИТИ. СТАТИТИТИТИ. СТАТИТИТИТИТИ. СТАТИТИТИ. СТАТИТИТИ. СТАТИТИТИ. СТАТИТИТИТИТИТИТИТИТИТИ. СТАТИТИТИТИТИТИТИ. СТАТИТИТИТИТИТИ. СТАТИТИТИТИТИ. СТАТИ

Проволочная система измерения положения пучка (Wire BPM)



ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМЫ WIRE BPM

Параметр	Технические характеристики	Примечание
Режим работы	Беспрепятственное прохождение пучка	Обеспечивает сигнал для MPS
Длина датчика	360мм/230(BC1/2)/400 (LTD/LTU1/LUT2)	
Точность повторного позиционирования	<20 мкм	При рабочей точке 100 рС
Разрешение	10 мкм	
Диапазон измерений (Г x В)	>10×10 (перед ВС2)	В магнитно-компрессионной секции возможны аномалии формы, измеряется только вертикальный размер
Диапазон заряда	10~300pC	
Диапазон среднеквадратичной длины пучка	15 фс ~ 4 пс	

Состав системы: вакуумная камера, механизм перемещения и оптический блок
--

Nº	Основные технические параметры	Значения
1	Конструкция и размеры датчика	Согласно предоставленным чертежам
2	Магнитная проницаемость и остаточная намагниченность	µ<1.05, Br<0.56 Гс (кроме вводов)
3	Медное покрытие	Толщина 15±5 мкм, 3R>30
4	СҒ-фланцы	Твердость >140 HBW, соответствует стандарту SHINE
5	Скорость натекания	<1×10 ⁻¹² Па·м³/с
6	Предельный вакуум	<3×10 ⁻⁷ Па после 48-часового прогрева при 150°С
7	RGA (анализатор остаточных газов)	Соотношение lamus-44/ltotal <1/1000
8	Чистота поверхности	0 частиц ≥0.3 мкм, ≤5 частиц других размеров на 10 см²
9	Соосность	<0.05 мм относительно оси электродов
10	Параллельность фланцев	<0.1 мм
11	СҒ-фланцы	Наличие экранирующего уступа
12	Материалы	Утвержденные марки с сертификатами
13	Рабочий ход	≥100 мм (по согласованию)
14	Точность повторного позиционирования	<20 мкм

В НАУЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ НА ОДНОЙ ВОЛНЕ

Общая техническая схема







ДАТЧИК С СИГНАЛЬНОЙ СВЯЗЬЮ

- Длина датчика: 360/230/400 мм
- Апертура трубки пучка: 35 ×115×35 мм
- Максимальный ход: 100/160 мм
- Максимальная скорость сканирования: 1 м/с
- Вольфрамовая/позолоченная вольфрамовая проволока: 20 мкм

СЦИНТИЛЛЯЦИОННОЕ ОПТОВОЛОКНО + ФРОНТЕНД ОБРАБОТКИ СИГНАЛА: КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ СИГНАЛА

- Пластиковое сцинтилляционное волокно: детектирование вторичных частиц
- Пластиковое передающее волокно: сердцевина 1 мм (согласована со сцинтилляционным волокном)
- ФЭУ (Фотоэлектронный умножитель): рабочий диапазон 300~500 нм
- Регулируемое усиление с дистанционным управлением
- Серверная система управления на базе EPICS IOC
- Корпус 1U

СБОР И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ:

- АЦП с аналоговой полосой пропускания >1 ГГц
- Поддержка внутреннего/внешнего триггера с временной меткой
- Поддержка внутреннего/внешнего тактирования (внешний тактовый сигнал от фемтосекундной синхронизирующей системы, частота 216.67 МГц, джиттер <200 фс)
- ПЛИС (FPGA) для обработки данных пучков в реальном времени
- Публикация данных (измерения сечения пучка и др.) через EPICS IOC и высокоскоростной Ethernet

НА ОДНОЙ ВОЛНЕ НА ОДНОЙ ВОЛНЕ

Система измерения величины заряда



Разработка системы измерения заряда

- Измерение темнового тока электронной пушки проводится с помощью 1 МэВ Фарадеевой чаши.
- Измерение заряда пучка выполняется с использованием коммерческого продукта ІСТ.
- IOC1: низкочастотный интегрированный выходной сигнал используется для калибровки соседних BPM (датчиков положения пучка);

для высокочастотного поканального измерения заряда пучка (Bunch by Bunch) применяется SBPM и сигнал, а также эталонный сигнал CBPM.



При низком уровне заряда (в несколько пикокулон) относительная точность (разрешающая способность) измерения заряда электронного пучка составляет лучше 1%

НАУЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ НА ОДНОЙ ВОЛНЕ

Электрическая схема ІСТ и принцип его работы

Категория	Детализация	
Источники пучка	3 инжектора 6 линейных сегментов	
Оборудование в канале	Локальная станция диагностики пучка, включающая: - 9 комплектов фронтенд- электроники - 9 плат осциллографов	
Синхронизация	Тактовый сигнал Trigger	
Аппаратные компоненты	 - ІСТ-датчик и вакуумные узлы - Кабельные переходные платы: • SMA-X → X-16 (коаксиальные соединения) • N-SMA → X-9 (магистральные сигнальные кабели) 	
Электроника	- Радиочастотный фронтенд (> 9 интерфейсов) - Платы осциллографов (X-9 интерфейсов)	EAM
Связь	Подключение к управляющей сети (дублированное)	BE











В НАУЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ НА ОДНОЙ ВОЛНЕ

Проектирование Фарадеевой чаши для измерения темнового тока при 1 МэВ

- Материал корпуса чаши: медь
- Форма чаши: коническая

1 H													3					2 He
3	4												5	2	7	8	9	10
Li	Be											8	В		Ν	0	F	Ne
11	12												13	14	15	16	17	18
Na	Mg												AI	Si	Р	S	CI	Ar
19	20	21	[22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K	Ca	Sc		Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr

Расчет пробега электронов

Энергия электронов	Материал	Плотность (г/см³)	Атомный номер	CSDA Range (г/см²)	Пробег электронов (мм)
1 MэB	Al	2.70	13	0.555	2.055
1 MэB	Cu	8.96	29	0.637	0.711

Источник данных: <u>NIST ESTAR Database</u>

НА ОДНОЙ ВОЛНЕ НА ОДНОЙ ВОЛНЕ



Проектирование Фарадеевой чаши для измерения темнового тока при 1 МэВ

- Для обработки слабого тока, выводимого из Фарадеевского цилиндра, требуется разработка специализированной фронтенд-схемы с последующим сбором и обработкой данных.
- Разработаны две серии фронтенд-схем:
 - Сверхмалошумящая серия
 - Высокоскоростная серия
- Обеспечивают измерение тока в диапазонах: фА, пА, нА, мкА.



Общие характеристики:

- Входной шум: до 180 аА/√Гц
- Полоса пропускания: до 400 кГц
- Коэффициент усиления: до 10¹³

Модель	Коэффициент усиления	Шумовой ток (аА/√Гц)	Полоса пропускания (f₋₃дБ)
LNK-07	107	63	400 кГц
LNK-08	10 ⁸	17	40 кГц
LNK-09	10 ⁹	6.3	4 кГц
LNK-10	10 ¹⁰	1.5	200 Гц
LNK-11	10 ¹¹	1.5	200 Гц
LNK-12	10 ¹²	0.5	30 Гц
LNK-13	10 ¹³	0.18	2 Гц

Высокоскоростная серия усилителей

Общие характеристики: Входной шум: от 270 фА/√Гц Полоса пропускания: до 400 МГц Коэффициент усиления: до 10⁶

Модель	Коэффициент усиления	Шумовой ток	полоса пропускания (f _{−з} дБ)
НК-03	5×10³	21 пА/√Гц	400 МГц
НК-04	5×10 ⁴	3.8 пА/√Гц	100 МГц
НК-05	105	3.7 пА/√Гц	40 МГц
HK-06	10 ⁶	270 фА/√Гц	1 МГц

12

Электроника

- Диапазон заряда электронных пучков: 10-300 пКл
 Электронная система измерения заряда пучков на базе ПЛИС (FPGA)



Параметр	Требование
Модель FPGA	XCZU7EV
Частота дискретизации АЦП	≥2 GSPS (гигавыборок/с)
Разрядность АЦП	>10 бит
Метод интегрирования	Цифровое интегрирование
Погрешность интегрирования	<1%
Глубина памяти	>10 млн точек
Скорость передачи данных	>100 Мбит/с
Интерфейс связи	Гигабитный Ethernet или USB
Питание	АС 220 В, 50 Гц





. .

Система полоскового монитора пучка (Strip BPM)



Технические требования к системе SBPM

Физико-технические характеристики

Технические характеристики датчика SBPM

Параметр	Технические показатели
Режим работы	Беспрепятственное прохождение пучка
Длина датчика	220 мм
Разрешение	<10 мкм
Диапазон измерений (Г×В)	>20×20 мм²
Диапазон заряда	10-300 пКл
Длина пучка	15 фс – 4 пс
Зона четкости пучка	ø35 мм

Параметр	Технические показатели
Конструкция и размеры датчика	Согласно предоставленным чертежам физической конструкции
Магнитная проницаемость и остаточная намагниченность	µ < 1.05, Br < 0.5 Гс (кроме вводов)
Медное покрытие	Толщина 15±5 мкм, 3R > 30
СҒ-фланцы	Твердость >140 HBW, конструкция согласно стандарту SHINE CF
Импеданс	Волновое сопротивление 50±2.5 Ом
Скорость натекания	<1×10 ⁻¹² Па·м³/с
Предельный вакуум	<3×10 ⁻⁷ Па после 48 ч прогрева при 150°С
RGA (анализатор остаточных газов)	Соотношение lamu>44/ltotal <1/1000
Чистота поверхности	0 частиц ≥0.3 мкм, ≤5 частиц других размеров на 10 см²
Соосность	<0.05 мм относительно оси электродов
Параллельность фланцев	<0.1 мм
СҒ-фланцы	Наличие экранирующего уступа
Материалы	Утвержденные марки с сертификатами

НА ОДНОЙ ВОЛНЕ НА ОДНОЙ ВОЛНЕ

Техническая схема SBPM



ДАТЧИК С СИГНАЛЬНОЙ СВЯЗЬЮ

- Длина датчика: 150/220/240/250 мм
- Диаметр камеры пучка: 50/35/115×35 мм
- Длина электродов: 100/150 мм
- Центральная рабочая частота: 500 МГц
- Четырехэлектродная конструкция с
- короткозамкнутым выходным участком Согласование импеданса 50 Ом

КАРИНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ НА ОДНОЙ ВОЛНЕ

РАДИОЧАСТОТНЫЙ ФРОНТЕНД (РЧ-ФРОНТЕНД): ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

- Схема полосовой фильтрации
- (узкополосная фильтрация)

•

- Центральная рабочая частота: 500 МГц
- Одинаковая структура для четырёх каналов
- Управление регулируемым аттенюатором по удалённому доступу + удалённый перезапуск питания
- Система управления на основе EPICS IOC-сервера

СБОР И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ:

- АЦП: Частота дискретизации более 1 ГГц.
- Поддержка внутреннего/внешнего триггера с возможностью временной привязки
- Тактирование:
 - Поддержка внутреннего/внешнего тактового сигнала
 - Внешний синхросигнал обеспечивается фемтосекундной синхронизирующей системой
 - Частота тактового сигнала: 216.67 МГц
 - Джиттер: менее 200 фс
- Реальная обработка данных по пучкам на ПЛИС (FPGA)
- Публикация данных (положение пучка и др.) в реальном времени через EPICS IOC и высокоскоростной Ethernet

Экспериментальные данные SBPM

При работе с пучком на мягкой линии системное разрешение составляет лучше 5,1 мкм при 188 пКл (горизонтальное направление) и 4,3 мкм при 188 пКл (вертикальное направление).



17

Криогенная система BPM (Cold-BPM)



Криогенная система ВРМ

- Используется для высокоточного измерения положения пучка внутри сверхпроводящего модуля, может дополнительно применяться для обратной связи по траектории пучка и системы безопасной блокировки
- Технические требования:
 - Расположение: криогенная система ВРМ установлена между сверхпроводящими резонаторами и сверхпроводящими магнитами и требует низкой магнитной проницаемости материала.
 - Разрешающая способность по положению пучка: высокая точность измерения — лучше 200 мкм при заряде пучка 10 пКл.
 - Материал и покрытие: внутренняя поверхность ВРМ выполнена из меди или покрыта медью для обеспечения высокой поверхностной электропроводности. Это необходимо для минимизации омических потерь высокочастотных собственных мод (HOM) в сверхпроводящем резонаторе, что снижает мощность охлаждения при низких температурах и эксплуатационные расходы.
 - Тепловая устойчивость: система обладает высокой стойкостью к тепловым ударам и стабильно работает в температурном диапазоне жидкого гелия.
 - Герметичность и вакуум: полностью металлическое уплотнение, соответствует требованиям сверхвысокого и сверхчистого вакуума, принятым в проекте PF.
 - Габариты: длина по оси 180 мм, диаметр трубки для пучка 78 мм.

НА ОДНОЙ ВОЛНЕ НА ОДНОЙ ВОЛНЕ







Криогенная система ВРМ

КОМПОНЕНТЫ COLD-BPM:

- Криогенная система ВРМ внутри криомодуля
- Радиочастотный фронтенд (RFFE) вне криомодуля для кондиционирования сигнала
- Цифровой ВРМ (DBPM) вне криомодуля для обработки сигнала
- Высокоуровневое прикладное программное обеспечение



Технические требования

Параметр	Спецификация
Разрешение	< 200 мкм @ 10 пКл
Тип	Кнопочный ВРМ
Габариты	Длина 180 мм
Диаметр кнопки	20 мм
Рабочая температура	4 К
Магнитная проницаемость	< 1.05
Криогенные термоциклы	≥10
Скорость вакуумной утечки	< 1.0Е-12 Па∙м³/с
Толщина медного покрытия	10~15 мкм
RRR медного слоя	30~80
Отсутствие частиц	Нет частиц ≥0.3 мкм

В научное оборудование на одной волне

Криогенная система ВРМ: испытания с пучком при комнатной температуре

2018: Криогенная система ВРМ была установлена на SXFEL (тёплый участок): получен сигнал при 100 пКл и оценено разрешение системы: 32 мкм при 10 пКл по горизонтали, 33 мкм при 10 пКл по вертикали. 2022 и 2023: Наблюдался сигнал ВРМ в криомодуле ВСР на установке High Rep. Test Facility.







300

300

Фильтрованный сигнал с низкочастотным фильтром 1 ГГц

НА ОДНОЙ ВОЛНЕ

Резонаторные датчики положения пучка Cavity BPM (CBPM)



Система резонаторных датчиков положения пучка (Cavity BPM)

Измерение поперечного положения пучка является одним из основных параметров в части ускорителей частиц.
 Когда пучок проходит через резонаторную камеру, он генерирует узкополосный сигнал с высоким отношением сигнал/шум, что характеризует систему
 резонаторных ВРМ как обладающую очень высокой пространственной разрешающей способностью, достигающей субмикрометрового и даже нанометрового
 уровня.

Архитектура системы



Система резонаторных датчиков положения пучка

НА ПРИМЕРЕ SHINE

Измерение поперечного положения пучка является одним из основных параметров в части ускорителей частиц.
 Когда пучок проходит через резонаторную камеру, он генерирует узкополосный сигнал с высоким отношением сигнал/шум, что характеризует систему
 резонаторных ВРМ как обладающую очень высокой пространственной разрешающей способностью, достигающей субмикрометрового и даже нанометрового
 уровня.

• СВРМ-зонд диаметром 35 мм





• СВРМ-зонд диаметром 8 мм





• Радиочастотный фронтенд для обработки сигнала



• Электроника сбора и обработки сигналов





Резонаторные мониторы времени прихода пучка (СВАМ)



Система резонаторных датчиков положения пучка (Cavity BPM)

• Влияние джиттера времени прихода электронного пучка:

- Влияет на синхронизацию накачивающего лазера с электронным пучком, что влияет на яркость и стабильность.
- Влияет на точность временного детектирования в пользовательских экспериментах.
- Цель измерения времени прихода пучка (ВАМ):
 - Обеспечить сверхвысокое разрешение мониторинга временной информации для работы установки SHINE.
 - Предоставить справочный инструмент для этапа последующей настройки пучка установки SHINE.
- Преимущества системы измерения времени прихода пучка на основе резонаторной камеры:
 - Простая структура системы и настройка.
 - Большие возможности для оптимизации.

Технические требования

Параметр	Значение/Требование
Режим работы	Неинтерцептирующий
Длина датчика	200 мм
Диаметр вакуумного канала	Ф35 мм
Диапазон заряда	0.01–0.3 нКл
Длительность пучка	15 фс – 4 пс
Разрешение системы	100 фс (@100 пКл)



НАУЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ НА ОДНОЙ ВОЛНЕ

Система резонаторных датчиков положения пучка (Cavity BPM)



Результаты тестирования пучка в мягкой линии





Variation of beam arrival times @ 100pC

Три модернизированные системы ВАМ, установленные в LINAC SXFEL-UF, были протестированы. Неопределённости измерения времени прибытия пучка в краткосрочном периоде (~10 мин @100 пКл): **30 фс** @ BAM01 **61 фс** @ BAM02 **62 фс** @ BAM03 Производительность системы значительно улучшена.

Электронно-оптическая система измерения времени прибытия пучка (ЕО-ВАМ)



Электронно-оптическая система (ЕО-ВАМ)

Принцип работы: пучковый зонд «снимает» широкополосный радиочастотный сигнал, несущий информацию о времени прихода пучка, с помощью линейного электрооптического эффекта в электрооптическом кристалле реализует интенсивностную модуляцию опорного светового импульса этим RFсигналом, кодируя информацию о времени прихода в интенсивность светового импульса; измерение глубины модуляции светового импульса позволяет «декодировать» время прихода.

Состав системы ЕО-ВАМ

• Широкополосный пучковый зонд

Генерирует широкополосный радиочастотный (RF) сигнал, несущий информацию о времени прихода электронного пучка.

- Оптический передний тракт
 С использованием электромодулятора (ЕОМ) реализуется интенсивностная модуляция опорного светового сигнала широкополосным RF-сигналом, кодируя информацию о
- времени прихода в интенсивность лазерного сигнала.
 Электроника детектирования RF передний тракт Оптические импульсы преобразуются в электрические, проводится обработка электрического сигнала.
- Электроника детектирования сбор и обработка сигналов АЦП осуществляет выборку, измеряется глубина модуляции световой интенсивности, рассчитывается время прихода.
- Высокоуровневое управление

Удалённое управление оборудованием, построение логики совместной работы устройств, реализация функций сканирования сигнала EO-BAM, обратной связи по рабочей точке и других функций.



Казичное оборудование на одной волне

Оптоволоконная система измерения потерь пучка



Цели и технические характеристики оптоволоконной системы измерения

потерь пучка

- Устанавливается в основной секции ускорителя для мониторинга дозы потерь пучка и локализации точек потерь, используется как инструмент для диагностики настройки пучка.
- Устанавливается в секции волноводного сегмента для защиты магнитов волновода и предотвращения радиационных повреждений.
- Устанавливается на линии распределения пучка для контроля эффективности распределения пучка и защиты ключевого оборудования.
- Интегрируется в систему защиты установки.

LCLS-II Final Design Report DRAFT September 21, 2015

(Проектный отчет по окончательному дизайну Линейного свободноэлектронного лазера второго поколения)

КАЛИНИИ СТОРУДОВАНИЕ НА ОДНОЙ ВОЛНЕ

- Пространственное разрешение: менее 1 метра
- Возможность установки в ограниченных пространствах
- Простота монтажа и демонтажа
- Длинное покрытие от 40 до 100 метров
- Широкий диапазон энергии от нескольких десятков МэВ до нескольких десятков ГэВ
- Хорошее соотношение сигнал/шум (нечувствительность к рентгеновскому излучению)
- Высокая радиационная стойкость (используется чистый кварц)
- Высокая экономическая эффективность
- Используется для защиты оборудования
- Применяется как инструмент для диагностики и настройки пучка

Системный анализ



- Время нарастания фотоумножителя (ФЭУ) 0,57 нс, сигнал непериодический
- Для пространственного разрешения <1 м требуется временное разрешение около 4 нс (соответствует 8,3 нс/м)
- Включение в систему защиты оборудования, обработка сигналов на FPGA, время отклика системы <1 мкс, полоса пропускания отклика лучше 1 МГц
- Время распространения сигнала по 100-метровому оптическому волокну примерно 500 нс
- Регулировка управляющего напряжения ФЭУ для согласования амплитуды сигнала

КАЗИЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ НА ОДНОЙ ВОЛНЕ

Анализ сигналов фотоумножителя (РМТ) вверх и вниз по потоку



• Временная разница вниз по потоку: сжатие

• Временная разница вверх по потоку: растяжение

НАУЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ НА ОДНОЙ ВОЛНЕ

Локализация точек потерь пучка



35

Анализ для локализации потерь пучка

Расчет позиции D: $\Delta t = 199 - 129.9 = 69.1 \text{ HC} \rightarrow 30 - 69.1/10 = 23.09 \text{ M}$ Расчет позиции C: $\Delta t = 205.7 - 104.3 = 101.4 \text{ HC} \rightarrow 30 - 101.4/10 = 19.86 \text{ M}$ Расстояние между C и D: 23.09 - 19.86 = 3.23 M Алгоритм 2: Разница времени между C и D: 129.9 - 104.3 = 25.6 HC Расстояние между C и D: 25.6 / 8.3 = 3.1 M



НА ОДНОЙ ВОЛНЕ НА ОДНОЙ ВОЛНЕ

Стационарная система мониторинга потерь пучка (PBLM)



Функциональное назначение системы PBLM

Оперативный мониторинг информации о потерях пучка, обеспечение защиты оборудования (коллиматоры, стопперы, дампы, ондуляторы) в секциях распределения пучка и волноводного сегмента, а также предотвращение радиационных повреждений. Кроме того, данные о потерях пучка могут использоваться в качестве диагностического инструмента для выявления неисправностей установки и оптимизации её параметров.



Параметры системы PBLM

Место установки	Количество	Диаметр вакуумного канала	Разрешение измерений
Транспортные линии	35	Ф35 мм	<0.01%@100 пКл
Ондуляторные секции	134	Ф8 мм	<0.01%@100 пКл

Параметр	Значение/Описание
Тип детектора	Фиксированный детектор потерь пучка
Количество (LTD/LTU-2/3/1)	6/10/10/9
Место установки	Туннель линейного ускорителя, рабочая шахта №2, туннель ондулятора
Длина зонда (фланец-фланец)	<150 мм
Диаметр вакуумного канала	35 мм
Относительное разрешение (@100pC)	0.01%
Примечания	По два детектора с каждой стороны в каждой группе, участвуют в быстром блокировании

Технические характеристики в ондуляторных секциях

Параметр	Значение/Требования
Количество	134 единицы
Режим работы	Неинтерцептирующий, участвует в быстром блокировании
Разрешение (@100 пКл)	<0.01%
Диапазон заряда	10-200 пКл

Технические характеристики датчиков PBLM









НА ОДНОЙ ВОЛНЕ НА ОДНОЙ ВОЛНЕ

Характеристики блоков электроники системы PBLM

Параметры электроники обработки сигналов

Параметр	Значение параметра
Количество каналов АЦП	4
Аналоговая полоса пропускания АЦП @3dB	<= 1 ГГц
Разрядность АЦП	14 бит
Диапазон входного уровня АЦП	1.6 Vpp
Максимальная частота дискретизации	1 GSPS
Максимальный период внешнего триггера	<= 1 МГц
Режим тактовой частоты дискретизации	Внешние/внутренние такты
Режим триггера	Внешний/внутренний/периодический триггер
Программное обеспечение	Linux / EPICS

ФУНКЦИИ ЭЛЕКТРОНИКИ PBLM:

- Реальная обработка данных о потерях пучка (значение потерь, номер пучка)
- Обновление и отображение формы сигнала каналов в реальном времени с понижением частоты обновления до 10 Гц
- Обновление и отображение обработанных данных в реальном времени с понижением частоты обновления до 10 Гц
- Сбор данных с АЦП сбор и сохранение по команде (триггеру)



ФУНКЦИИ СИСТЕМЫ PBLM:

- Измерение пучок за пучком с временной меткой
- Блокировка по превышению порога потерь пучка с быстрой реакцией (10 мкс)
- Исторические данные по дозе (интегральные значения)
- Самотестирование системы: предупреждения о неисправностях, калибровка данных, оценка состояния кристаллов
- Калибровка дозы (TLD термолюминесцентные детекторы)



Благодарим за внимание!