

ПРЕЦИЗИОННАЯ ЛАЗЕРНАЯ МЕТРОЛОГИЯ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ И ДЕТЕКТОРНЫХ КОМПЛЕКСОВ

ТЕМА 02-0-1127-2016/2021

СПИСОК АВТОРОВ

ОИЯИ	Н.С. Азарян, Ю.А. Будагов, В.В. Глаголев, Ю.И. Давыдов, С.М. Коломоец, А.М. Кузькин, М.В. Ляблин, А.А. Плужников, А.В. Сазонова, С.Н. Студенов, Г.Т. Торосян, Г.В. Трубников, Г.Д. Ширков
CERN (Женева, Швейцария)	О. Bruning, J.-C. Gayde, B. Di Girolamo, H. Mainaud Durand, D. Mergelkuhl, L. Rossi
DESY (Гамбург, Германия)	J. Mnich, N. Walker
INFN (Пиза, Италия)	F. Bedeschi
АНССЗ (Гарни, Армения)	Л. Ахвердян, В.Г. Арзуманян, А. Байрамян, Г. Петросян, А.К. Товмасян
Shirak Technologies (Ереван, Армения)	А. Есаян
ИФВЭиК (Тбилиси, Грузия)	Д.И. Хубуа

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА	Ю.А. Будагов
ЗАМЕСТИТЕЛЬ РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА	М.В. Ляблин
РУКОВОДИТЕЛЬ ТЕМЫ	Г.Д. Ширков

ДАТА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПРОЕКТА В НОО _____

ДАТА НТС ЛАБОРАТОРИИ _____ НОМЕР ДОКУМЕНТА _____

ДАТА НАЧАЛА ПРОЕКТА _____
(ДЛЯ ПРОДЛЕНИЙ — ДАТА ПЕРВОГО УТВЕРЖДЕНИЯ ПРОЕКТА) _____

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА

**ПРЕЦИЗИОННАЯ ЛАЗЕРНАЯ МЕТРОЛОГИЯ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ
И ДЕТЕКТОРНЫХ КОМПЛЕКСОВ**

ТЕМА 02-0-1127-2016/2021

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА: **БУДАГОВ ЮЛИАН АРАМОВИЧ**

УТВЕРЖДЕН ДИРЕКТОРОМ ОИЯИ	_____	__/__/2018г.
СОГЛАСОВАНО		
ВИЦЕ-ДИРЕКТОР ОИЯИ	_____	__/__/2018г.
ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ	_____	__/__/2018г.
ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР	_____	__/__/2018г.
НАЧАЛЬНИК НОО	_____	__/__/2018г.
ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ	_____	__/__/2018г.
ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ЛАБОРАТОРИИ	_____	__/__/2018г.
РУКОВОДИТЕЛЬ ТЕМЫ	_____	__/__/2018г.
РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА	_____	__/__/2018г.
ЗАМ. РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА	_____	__/__/2018г.
ОДОБРЕН		
ПКК ПО НАПРАВЛЕНИЮ	_____	__/__/2018г.

**Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы
для осуществления проекта**

**ПРЕЦИЗИОННАЯ ЛАЗЕРНАЯ МЕТРОЛОГИЯ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ
И ДЕТЕКТОРНЫХ КОМПЛЕКСОВ**

ТЕМА 02-0-1127-2016/2021

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования		Стоимость (тыс. долл.). Потребности в ресурсах	Предложение лаборатории по распределению финансирования и ресурсов			
			1 год 2019	2 год 2020	3 год 2021	
Затраты	1. Прецизионный Лазерный Инклинометр (ПЛИ)	68	24	23	21	
	2. Интерферометрический Измеритель Длины (ИИД)	106	36	34	36	
	3. Лазерная Реперная Линия (ЛРЛ)	139	48	45	46	
	4. Сейсмостабилизированная платформа (ССП)	34	12	11	11	
Необходимые ресурсы	Нормо-час	Ресурсы – конструкторского бюро лаборатории, – опытного производства ОИЯИ, – опытного производства лаборатории, – ускорителя, – реактора, – ЭВМ. Эксплуатационные расходы	998	358	319	321
		Затраты из бюджета, в том числе финансирование ВМВФ	347	120	113	114
Источники финансирования	Бюджетные средства					
	Внебюджетные средства	Вклады коллаборантов Средства по грантам. Вклады спонсоров. Средства по договорам. Другие источники финансирования и т.д.				

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА

Ю.А. Будагов

ЗАМЕСТИТЕЛЬ РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА

М.В. Ляблин

РУКОВОДИТЕЛЬ ТЕМЫ

Г.Д. Ширков

Смета затрат по проекту

**ПРЕЦИЗИОННАЯ ЛАЗЕРНАЯ МЕТРОЛОГИЯ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ И
ДЕТЕКТОРНЫХ КОМПЛЕКСОВ**

ТЕМА 02-0-1127-2016/2021

NN пп	Наименование статей затрат	Полная стоимость	1 год 2019	2 год 2020	3 год 2021
	Прямые расходы на Проект				
1.	Ускоритель, реактор	час.			
2.	ЭВМ	час.			
3.	Компьютерная связь	тыс. долл.			
4.	Конструкторское бюро	нормо-час			
5.	Опытное производство	998 нормо-час	358	319	321
6.	Материалы	104 тыс. долл.	39	32	33
7.	Оборудование	201 тыс. долл.	67	67	67
8.	Строительство/ремонт помещений	тыс. долл.			
9.	Оплата НИР, выполняемых по договорам	тыс. долл.			
10.	Командировочные расходы,	42	14	14	14
	в т.ч.	тыс. долл.			
	а) в страны нерублевой зоны	36	12	12	12
	б) в города стран рублевой зоны	6	2	2	2
	в) по протоколам				
	Итого по прямым расходам:	347	120	113	114
	В том числе:				
	Из бюджета ЛЯП	84	28	28	28
	Бюджетные от ВМВФ	263	92	85	86

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА

Ю.А.Будагов

ЗАМЕСТИТЕЛЬ РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА

М.В. Ляблин

РУКОВОДИТЕЛЬ ТЕМЫ

Г.Д. Ширков

ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ

В.А. Бедняков

ВЕДУЩИЙ ИНЖЕНЕР-ЭКОНОМИСТ ЛАБОРАТОРИИ

Г.А.Усова

ПРЕЦИЗИОННАЯ ЛАЗЕРНАЯ МЕТРОЛОГИЯ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ И ДЕТЕКТОРНЫХ КОМПЛЕКСОВ

АННОТАЦИЯ

Продление Проекта «Прецизионная лазерная метрология для ускорителей и детекторных комплексов» на 2019-2021 гг. предусматривает создание высокоточных новых метрологических инструментов и развитие ранее созданных авторами, а именно:

- распределённая сеть (Network) из шести Прецизионных Лазерных Инклинометров;
- Интерферометрический Измеритель Расстояний на основе высокочастотной амплитудной модуляции мощности лазерного луча;
- Лазерная Реперная Линия длиной 130 м адаптированная к условиям метрологической лаборатории ЛЯП;
- Дополнительная активность: действующий прототип сеймостабилизированной от угловых колебаний поверхности Земли исследовательской платформы в Метрологической Лаборатории ЛЯП.

Предлагаемые метрологические устройства, как предполагается, составят основу элементной базы нового поколения для будущей роботизированной измерительной системы в экспериментах на Большом Адронном Коллайдере.

THE PRECISION LASER METROLOGY FOR ACCELERATORS AND DETECTOR COMPLEXES

ABSTRACT

Prolongation of the Project “The Precision Laser Metrology for Accelerators and Detector Complexes” for 2019-2021 involves the development of new metrological instruments and upgrading of the existing ones, i.e.:

- distributed network of six Precision Laser Inclometers;
- the Interferometric Distance Meter on the basis of high-frequency amplitude modulation of the laser beam power;
- The 130 m Laser Fiducial Line adapted to the conditions of the DLNP Metrological Laboratory.
- an additional activity: the operating prototype of the Research Platform in the DLNP Metrological Laboratory, seismologically-stabilized from angular oscillations of the Earth surface;

The proposed new concept metrological devices, as it is supposed, will make the new generation basis of the future elemental robotic measuring system in experiments at the Large Hadron Collider.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальные проблемы современной теории физики высоких энергий и прогресс в ускорительной технике привели к созданию уникального исследовательского комплекса: коллайдера LHC со спектрометрическими системами ATLAS, CMS, ALICE. Диаметр сфокусированных пучков в зоне их соударения в этих экспериментах в настоящее время составляет 20 мкм. Эта величина определяет «масштаб точности» метрологических инструментов, применяемых в коллайдерных экспериментах. В условиях повышенной радиации на LHC проведение метрологических измерений, как представляется, будет возможным при наличии дистанционно управляемых роботизированных комплексов.

Учитывая размеры коллайдера (8.5 км) и спектрометров (габариты ATLAS – длина 46 м, диаметр 25 м), напряженные радиационные условия, то, вероятно, единственным «измерительным инструментом», который позволит достичь необходимую точность, будет лазерный луч.

На основе завершённых НИОКР и достигнутых экспериментальных результатов 2016-2018 гг. [1-8] в продлении (2019-2021 гг.) Проекта предложены три высокоточных новых метрологических инструмента: Прецизионный Лазерный Инклинометр (ПЛИ), Интерферометрический Измеритель Длины (ИИД), Лазерная Реперная Линия (ЛРЛ). Эти новые инструменты, как предполагается, составят элементную основу нового поколения для дистанционно управляемого Роботизированного Измерительного Комплекса (РИК).

Измерения пространственной стабильности положения стен и пола подземного измерительного зала ATLAS показали их высокую подвижность [9]: для пола – 150 мкм в год, для стен 500 мкм в год. Практически, в среднем меньше чем за месяц происходит столь значительное изменение геодезической сети эксперимента, которое требует её обновления. В краткие остановки коллайдерных экспериментов измерения невозможны или крайне затруднены; положение дел может поправить РИК, предлагаемый в Проекте.

Созданный в ЛЯП Прецизионный Лазерный Инклинометр – это *первый в мире угловой сейсмограф*, регистрирующий микросейсмические колебания поверхности Земли с точностью $2.4 \cdot 10^{-11}$ рад/Гц^{1/2} в диапазоне частот [10⁻⁶ Гц; 4 Гц], что обеспечивает регистрацию всех известных микросейсмических явлений. Два инклинометра уже введены в действие и на них стабильно измеряются угловые наклоны земной поверхности в тоннеле ТТ1 в ЦЕРН (Женева, Швейцария) и в Международной Геофизической Обсерватории (Гарни, Армения). В 2018 г. полностью завершится создание рабочих образцов шести ПЛИ, которые составят основу первой в мире Распределённой Сети детекторов угловых колебаний земной поверхности.

В работах с ИИД реализовано измерение смещений на коротких длинах 10 мкм и достигнута точность измерения 0.03 мкм. Эта методика нами внедрена в процедуру калибровки ПЛИ. На сегодняшний день в термоизолированной лаборатории создан прототип ИИД с базой 5 м, а полномасштабный цикл НИР будет завершён в создаваемой Метрологической Лаборатории ЛЯП.

Измерения по ЛРЛ показали полную возможность интегрировать применение этого метода в существующие теодолитные измерения. Завершённые эксперименты на длине 50 м в воздушной среде показали совпадение данных с теодолитной системой в пределах ошибки теодолитных измерений 30 мкм [10].

В ЛЯП завершается создание Метрологической Лаборатории, оборудованной прецизионной системой климатизации воздушной среды в объеме 23×6×3 м³.

Таким образом, продление на 2019-2021 гг. предусматривает:

- Создание сети из 6 ПЛИ для визуализации деформации поверхности Земли сейсмическими волнами.
- Завершение работ по созданию ИИД с длиной измерения 16 м.
- Завершение работ по созданию прототипа вакуумированной ЛРЛ длиной 150 м.
- На основе ПЛИ создание лабораторного прототипа сейсмостабилизированной от угловых колебаний поверхности Земли исследовательской платформы.

1. СЕТЬ ПЛИ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ СЕЙСМИЧЕСКИМИ ВОЛНАМИ

Одна из важнейших задач метрологии современных коллайдерных экспериментов в ТэВ-диапазоне – обеспечение их сейсмической стабилизации. Действительно, при прохождении рэлеевских (синусоидальная поверхностная сейсмическая волна) волн деформируется поверхность Земли, искажаются траектории пучков частиц, что может вызвать расхождение положения фокусов в зоне столкновения. Конкретно, на конференции RUPAK2017 приведены полученные нами с помощью ПЛИ данные по зависимости светимости от угловых колебаний поверхности Земли [11].

Для подготовки – в перспективе – решения полномасштабной проблемы контроля светимости мы, в качестве первого шага, предлагаем создание распределённой сети из шести ПЛИ в зоне размещения ЛНС. Получаемые при этом данные о деформации земной поверхности могут быть использованы системой обратной связи для онлайн-корректировки рабочих параметров коллайдера и стабилизации пространственного положения фокусов пучков в зоне столкновения.

1.1. Принцип регистрации Комплексом «ПЛИ-Network» деформации поверхности Земли сейсмическими волнами

Рассмотрим случай, когда необходимо визуализировать прохождение синусоидальной волны вдоль одной горизонтальной координаты X (ось X совпадает с направлением движения волны). Установим инклинометры вдоль одной линии с совпадающими направлениями регистрации угловых колебаний поверхности Земли в вертикальной и горизонтальных плоскостях. На рис. 1 показаны шесть инклинометров, расположенных вдоль оси X на примерно равных расстояниях L_i .

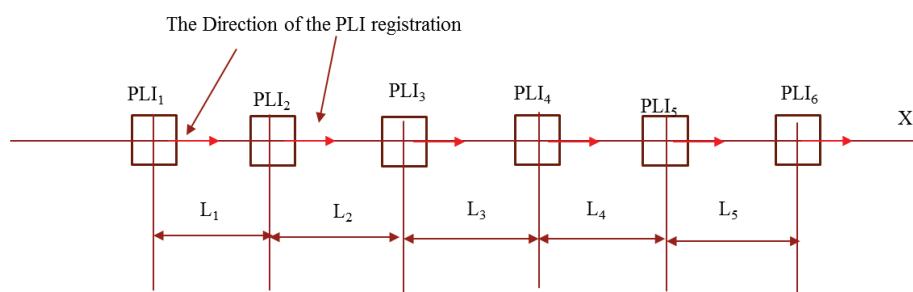


Рис. 1. Расположение Инклинометров ПЛИ_{*i*} друг относительно друга при регистрации угловой деформации поверхности Земли вдоль горизонтальной координаты X

Среднее расстояние между инклинометрами выбирается с учётом длины поверхностной волны. Для рэлеевских волн «Микросейсмического Пика» средняя частота регистрируемых колебаний $f=0.3$ Гц. При скорости рэлеевской волны $V=2$ км/сек длина волны $\lambda=V/f=6.7$ км. При регистрации таких волн шестью инклинометрами среднее расстояние между ними составит 2 км.

На рис. 2 показано положение инклинометров на поверхности Земли в вертикальной плоскости при прохождении рэлеевской волны в момент времени t_0 .

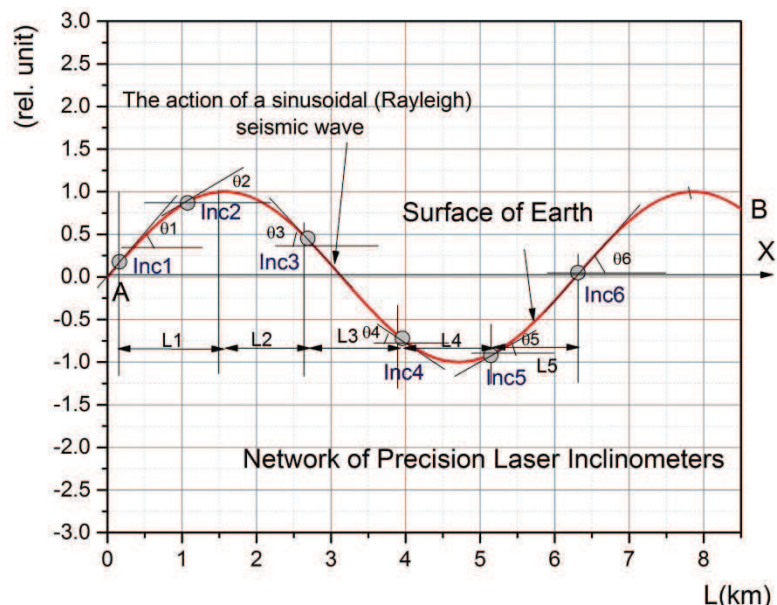


Рис. 2. Регистрация NETWORKКом сориентированных инклинометров профиля линии на поверхности Земли при прохождении рэлеевской волны

Инклинометры вдоль линии АВ в один момент времени t_0 регистрируют угол наклона поверхности Земли. Зная расстояние между инклинометрами L_1, \dots, L_5 и измеренные углы $\theta_1, \dots, \theta_6$ наклона поверхности Земли, определяем прирост высоты h_1, \dots, h_5 по формуле

$$h_i \approx \frac{tg(\theta_i) + tg(\theta_{i+1})}{2} L_i \quad \{1\}$$

Поскольку углы $\theta_1, \dots, \theta_6 \ll 1$, это выражение примет вид

$$h_i \approx \frac{\theta_i + \theta_{i+1}}{2} L_i \quad \{2\}$$

Затем мы последовательно определяем высоту расположения измеряемых точек вдоль линии АВ на поверхности Земли:

$$H = \{H_1=h_1; H_2=h_1+h_2; H_3=h_1+h_2+h_3; \dots\} \quad \{3\}$$

При помощи последовательности $\{3\}$ мы трансформируем измеряемый угол инклинометра в вертикальное смещение поверхности Земли.

В следующий момент времени t_1 рэлеевская волна сместится на расстояние

$$\Delta l = V * (t_1 - t_0)$$

и инклинометры зарегистрируют новые значения углов, которые будут пересчитаны в соответствии с алгоритмом $\{3\}$. В конечном итоге мы определим вертикальное смещение измеряемых точек на земной поверхности при прохождении поверхностной волны во времени. Другими словами, визуализируем изменение ландшафта земной поверхности при прохождении поверхностной сейсмической волны.

При регистрации NETWORKКом на плоскости (две ортогональные горизонтальные координаты X и Y) (см. рис. 3) инклинометры располагаются в точках пересечения взаимно перпендикулярных линий. Направления регистрации угловых колебаний в вертикальной и горизонтальной плоскостях всех ПЛИ совпадают и их направления параллельны осям X и Y .

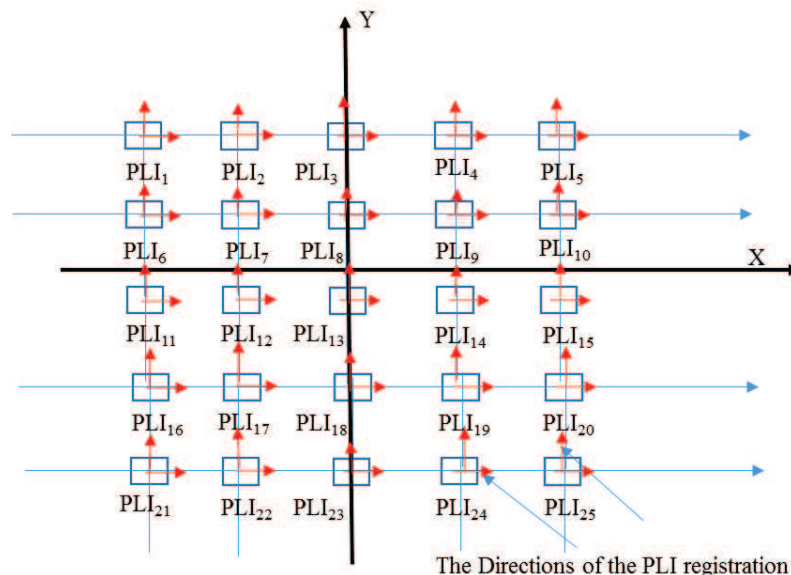


Рис. 3. Регистрация прохождения рэлеевской волны на плоскости NETWORKом ПЛИ

В этом случае производится регистрация изменения высоты вдоль линий при помощи последовательности $\{3\}$ и последующее восстановление высот поверхности при прохождении поверхностной волны.

При рассмотрении ситуации на плоскости следует учитывать, что в реальности, как правило, действуют несколько разнонаправленных волн «Микросейсмического пика» от разных источников с разной частотой. Поэтому реальная картина сейсмических волн потребует более сложной математической модели для их описания.

1.2. Технические характеристики и задачи NETWORKа из шести ПЛИ

Точность инклинометра при онлайн регистрации поверхностной волны достигает 10 нрад. Средняя амплитуда угла наклона поверхности Земли от рэлеевских волн Микросейсмического пика $\approx 2 \cdot 10^{-7}$ рад. Таким образом, точность регистрации деформации поверхности Земли рэлеевскими волнами «Микросейсмического Пика» составляет порядка 5 %.

Время регистрации, обработки и визуализации информации, поступающей из системы шести ПЛИ, нами оценивается 0.1 сек. Это позволит хорошо (20 точек на период) описывать колебания поверхности Земли на частоте «Микросейсмического Пика» 0.2 Гц.

Задачи NETWORK первого этапа:

- зарегистрировать и продемонстрировать сам факт пространственной деформации поверхности Земли при прохождении рэлеевской волны.
- определить необходимое количество инклинометров для эффективной визуализации деформаций земной поверхности рэлеевскими сейсмическими волнами.
- Отработать эффективные алгоритмы обработки поступающей с NETWORKа ПЛИ информации.

Для этого необходимо:

1. Изготовить шесть образцов ПЛИ
2. Разместить их в тоннеле LHC
3. Создать программное обеспечение для синхронной регистрации угловых колебаний поверхности Земли
4. Осуществить онлайн обработку поступающих данных

5. Онлайн визуализировать колебание поверхности Земли при прохождении сейсмических волн.

1.3. Сроки реализации проекта

Этап	Начало	Окончание
Обеспечение записи данных с ПЛИ в TIMBER – систему сбора данных CERN	март 2018	декабрь 2018
Изготовление в мастерских ЛЯП ОИЯИ 6 комплектов механических элементов ПЛИ в рамках соглашения ОИЯИ-ЦЕРН	февраль 2018	июнь 2018
Поставка в CERN и инсталляция 5 комплектов ПЛИ в заранее определённых местах и обеспечение накопления синхронной угловой микросейсмической информации в CERN –TIMBER	май 2018	февраль 2019
В период инсталляции 5 комплектов ПЛИ написание обслуживающей NETWORK из 6 ПЛИ программы с возможностью онлайн 3D визуализации угловой и линейной (изменение по высоте, длине и ширине) микросейсмической активности поверхности Земли	май 2018	сентябрь 2019
Проведение экспериментов с пробным NETWORKом с целью определения оптимального количества и расположения ПЛИ в системе тоннелей CERNa	сентябрь 2019	декабрь 2020

2. ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ РАССТОЯНИЙ С ДЛИНОЙ ИЗМЕРЕНИЯ 16 МЕТРОВ

Для связи координатных систем двух ускорителей LHC на эксперименте ATLAS необходим измеритель длины на 16 м с долговременной (в течение года) точностью измерения расстояния лучше 10 мкм.

Конкретно, измеритель длины связывает три геодезические сети: две – ускорители и одна – детектор. Измеритель длины должен периодически измерять (мониторировать) расстояние между струнными реперами, связанными с геодезическими координатными сетями ускорителей и детектора. Для трёх основных коллайдерных экспериментов на ускорителе LHC требуется 18 комплексов измерителей длины

Существующие методы имеют погрешность измерений (300 мкм за год), которая сильно зависит от параметров окружающей среды.

Предлагается построить измеритель длины на основе лазерного интерферометра, в котором влияние температуры, давления и влажности воздушной среды не столь существенно и не выходит за рамки необходимой точности измерения. В интерферометре с «подвижным плечом» производится непрерывная запись изменения интерферометрической картины с помощью АЦП и путём подсчёта интерференционных полос определяется измеряемая длина. Моменты начала и окончания счёта полос определяются пересечением вспомогательным лучом струнных реперов, которые связаны с координатными системами ускорителей и детектора.

Система Интерферометрический Измеритель Длины должна работать в роботизированном режиме и постоянно мониторировать изменения длины между струнными реперными линиями. При точности измерения положения струнной реперной линии 10 мкм возможно объединение геодезических сетей с точностью 15 мкм, которая практически совпадает с диаметрами сфокусированных пучков частиц (в эксперименте ATLAS диаметр пучков частиц составляет 17 мкм) – «базовой» неопределённостью пространственного положения сталкивающихся частиц.

Наши исследования выявили сильную чувствительность интерференционной картины от точности юстировки интерферирующих лучей. Как оказалось, на длине 16 м расхождение лучей от лазерного источника не должно превышать 0.1 мм. Таким образом, для совмещения интерферирующих лучей на всей длине измерения (16 м) необходимо достичь их коллинеарности лучше, чем $5 \cdot 10^{-6}$ рад (1 сек).

Угловая точность сборки компонент в Интерферометрическом Измерителе Длины лучше $5 \cdot 10^{-6}$ рад, и это будет реализовано в условиях Метрологической Лаборатории, которая будет введена в эксплуатацию к лету 2018 г.

Для уменьшения влияния разъюстировки лазерных лучей предлагается модификация интерферометрического измерителя длины. В основу интерферометра предлагается концепция «Амплитудного интерферометра», где используется амплитудная модуляция лазерного излучения на частотах от 1 ГГц до 10 ГГц. В этом случае длина волны амплитудной модуляции 0.3 м – 0.03 м значительно больше длины волны лазерного источника 0.63 мкм и, следовательно, при этом существенно снижаются ограничения на высокоточного позиционирования лазерных лучей для работы измерителя длины.

В «Амплитудном интерферометре» регистрируются два сигнала от лазерных лучей, отраженных от подвижного плеча интерферометра. Затем, после вычитания сигналов операционным усилителем, выделяется «интерферометрический сигнал», который регистрируется АЦП.

2.1. Схема ИИР на основе «Амплитудного интерферометра»

В Амплитудном Интерферометре используется амплитудная модуляция лазерного луча. На рис. 4 представлен аналог интерферометра Майкельсона-Морли.

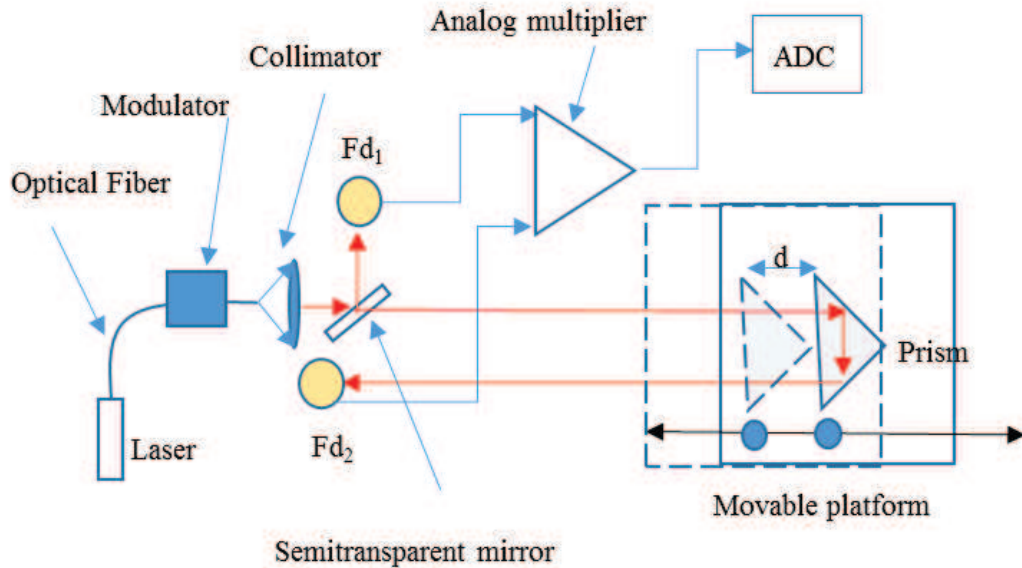


Рис. 4. «Амплитудный интерферометр» типа Майкельсона-Морли.

Луч от лазера модулируется амплитудным модулятором синусоидальной функцией с частотой ν . В результате мы получаем зависимость мощности лазерного луча от времени

$$P = P_0 \sin\left(2\pi\nu t - \frac{2\pi}{\lambda} x\right)$$

где x – расстояние распространения лазерного луча от точки модуляции лазерного луча до точки x его наблюдения, $\lambda=c/\nu$ (c – скорость света) – длина волны синусоидальной амплитудной модуляции. После модуляции часть лазерного луча при помощи делительной пластинки направляется на фотоприёмник Fd_1 , а основная часть луча после отражения подвижного плеча направляется на Fd_2 . Сигналы напряжения с Fd_1 и Fd_2 подаются на дифференциальный усилитель, где происходит их вычитание. В результате мы получаем сигнал переменного напряжения

$$S = U_0 (\sin(2\pi\nu t) * U_0 \sin\left(2\pi\nu t - \frac{2\pi}{\lambda} x\right)) = \frac{U_0^2}{2} (\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) - \cos\left(4\pi\nu t - \frac{2\pi}{\lambda} x\right))$$

Рассмотрим случай движения призмы с постоянной скоростью V . Это означает, что изменение расстояния, пройденного лазерным лучом, можно представить в виде расстояния $x=2Vt$ (учитывается, что свет отражается от призмы и оптический путь света увеличивается в два раза).

$$S = \frac{U_0^2}{2} (\cos\left(2\frac{2\pi}{\lambda} Vt\right) - \cos\left(4\pi\nu t - 2\frac{2\pi}{\lambda} Vt\right))$$

На выходе дифференциального усилителя появляется переменный сигнал с частотой $\Omega = 2 V/\lambda$, определяемой скоростью движения призмы $V = s/t$

$$S = \frac{U_0^2}{2} (\cos(2\pi \Omega t) - \cos(4\pi\nu t - 2\pi\Omega t))$$

Фактически, на выходе амплитудного усилителя мы имеем переменный сигнал модулятора на удвоенной частоте 2ν , промодулированный низкочастотным $\Omega = 2 V/\lambda$ сигналом, вызванным движением призмы. Выделяя частотным фильтром сигнал движения

призмы, посылаем его на регистрирующий АЦП. При изменении полезного сигнала от максимума к максимуму каретка с призмой переместится на расстояние $\lambda/2$.

Таким образом, при помощи дифференциального усилителя мы реализовали интерференционное выделение сигнала на базе амплитудной модуляции лазерного луча.

Достоинство этого метода – его относительная нечувствительность к возможной разюстировке интерферометра.

При смещении лазерного луча на ΔX в результате его углового поворота ошибка в определении расстояния Δx определяется из соотношения $\Delta x = \frac{\Delta X^2}{L}$ (рис. 5).

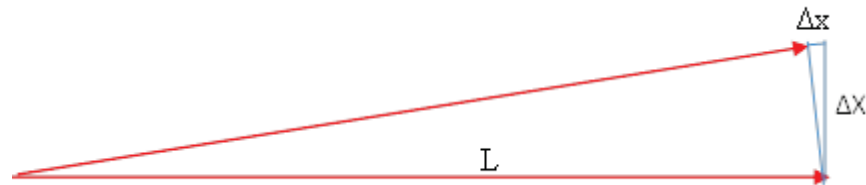


Рис.5. Определение ошибки в измерения расстояния при угловой разюстировке лазерного луча

При смещении лазерного луча на $\Delta X = 5$ мм в результате его наклона на длине $L = 16$ м получим систематическую ошибку измерения $\Delta x = 1.6$ мкм.

Принцип регистрации расстояния остаётся таким же, как и в интерферометрическом способе (рис. 6).

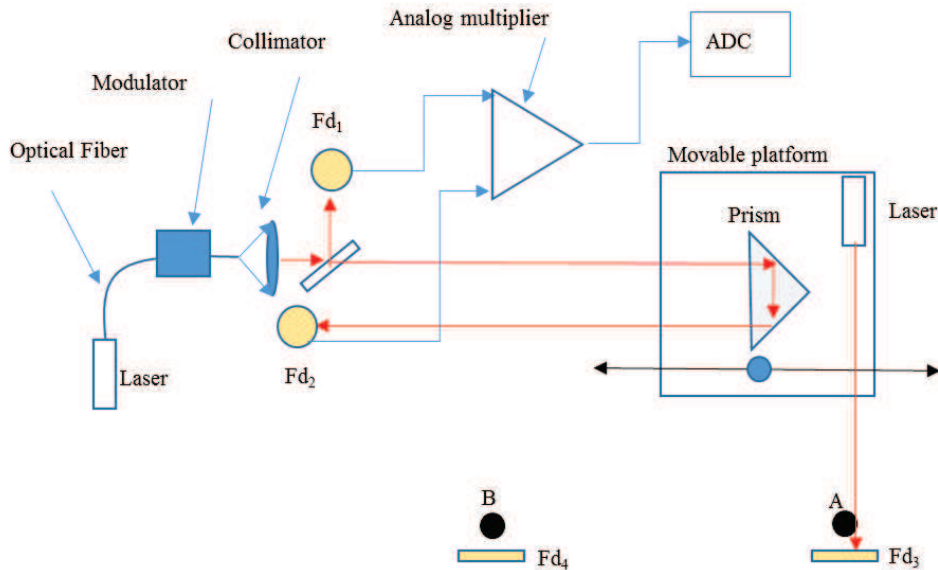


Рис. 6. Измерение расстояния ИИР между двумя струнами А и В

Дополнительный луч от второго лазера, установленного на подвижной платформе, пересекает натянутую струну в начальной точке измерения А. Неподвижный фотоприёмник Fd3, находящийся за струной, регистрирует это пересечение. В конечной точке измерения В регистрируется аналогичный сигнал фотоприёмником Fd4. Токовые сигналы с фотоприёмников Fd1 и Fd2 суммируются и трансформируется в напряжение, которое подаётся на вход синхронизированного двухканального АЦП. На второй канал АЦП подаётся сигнал с дифференциального усилителя.

Определение расстояний заключается в обработке зарегистрированной двухканальным АЦП информации. На Рис. 7 показано изменение сигналов с двух каналов АЦП.

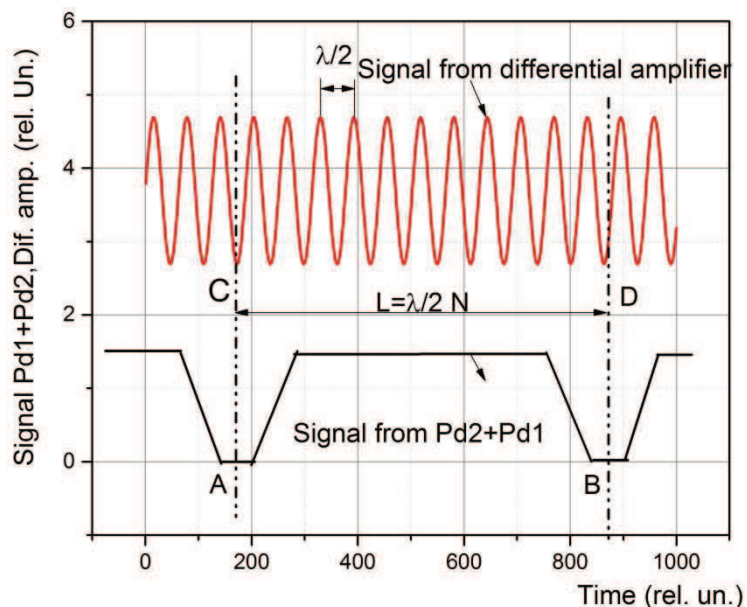


Рис. 7. Измерение расстояния между струнами

На первом канале – сигналы пересечения лазерным лучом струн, на втором канале – синусоидальный сигнал с интерферометра. Определив во времени точки пересечения лазерным лучом центра струн, мы определяем точки С и D на временной оси и соответствующие им значения интерферометрического сигнала. Между найденными точками С и D в интерференционном сигнале определяем количество максимумов интерферометрического сигнала. Определив их количество N , умножаем на расстояние $\lambda/2$ и получаем искомое расстояние.

2.2. Основные этапы создания ИИП:

- Создание программного обеспечения для регистрации сигналов, их обработку и определение расстояний
- Апробация методики применения амплитудного интерферометра.
- Создание рабочего прототипа для регистрации расстояния на длине 16 м с точностью 10 мкм.

2.3. Сроки реализации проекта «Интерферометрический Измеритель Расстояний»

Этап	Начало	Окончание
Сборка прототипа интерферометрического измерителя длины на измеряемое расстояние 0.5 м. Отработка методики подсчёта числа интерференционных полос для определения расстояния между двумя струнами.	июнь 2018	декабрь 2018
Переход на концепцию «Амплитудного интерферометра». Создание прототипа на длину 2 м	январь 2019	декабрь 2019
Создание прототипа на длину 16 м	январь 2019	декабрь 2020

3. ЛАЗЕРНАЯ РЕПЕРНАЯ ЛИНИЯ

Лазерная реперная линия служит для непрерывного измерения координат точек NETWORK вдоль линии распространения лазерного луча. В качестве начала координат используется начало лазерного луча («точечный» лазерный источник – торец оптического волокна) и конечная точка приёма лазерного луча – центр квадрантного фотоприёмника. Лазерная реперная линия сможет контролировать измеряемые точки NETWORK на единичной длине до 2 км.

ЛРЛ является эффективной заменой струнной реперной линии для контроля длинных, более 5 км, линейных ускорителей.

Стабильность положения лазерного луча зависит от воздушной среды (пыль, флуктуации показателя преломления), поэтому используется форвакуумная откачка трубы, в которой распространяется лазерный луч.

Для создания эффективно работающей лазерной реперной линии необходимо

- непрерывно стабилизировать лазерный луч от шумовых эффектов блуждания лазерного луча и углового сейсмического наклона земной поверхности.
- разработать неразрушающую систему регистрации положения измеряемой точки на конкретном объекте относительно стабильного положения лазерного луча.
- для эффективного неразрушающего контроля измеряемых точек необходимо изготовить высокопрецизионные оптические плоскопараллельные пластинки с уровнем неплоскостности поверхностей выше 10^{-8} рад. Подобная технология разработана нами и прошла испытания.
- при помощи сеймостабилизированной платформы снизить влияние угловых микросейсмических колебаний поверхности Земли на лазерный луч
- положение точек NETWORK должно контролироваться как при помощи ЛРЛ, так и внешней теодолитной системой для включения в глобальный NETWORK.

3.1. Схема эксперимента по созданию прототипа Лазерной Реперной Линии

В мае 2018 г. вводится в эксплуатацию Метрологическая Лаборатория ЛЯП, что сделает возможным проведение исследований по Лазерной Реперной Линии. В условиях Метрологической Лаборатории (длина 23 м) предполагается создание ЛРЛ в несколько этапов:

ЛРЛ длиной 20м:

На этой длине отрабатываются элементы вакуумной системы, системы позиционирования начальной и конечной точек ЛРЛ, системы регистрации колебания лазерного луча.

ЛРЛ длиной 60м:

- Отработка системы трёхкратного отражения лазерного луча для наращивания длины 60 м в вакуумных условиях.
- Отработка системы стабилизации блуждания лазерного луча.
- Отработка системы неразрушающего контроля положения в измеряемой точке

ЛРЛ длиной 130м:

- Сейсмоизоляция опор ЛРЛ – установка опор ЛРЛ на сеймостабилизированной платформе (рис. 8)
- Определение точности измерения ЛРЛ

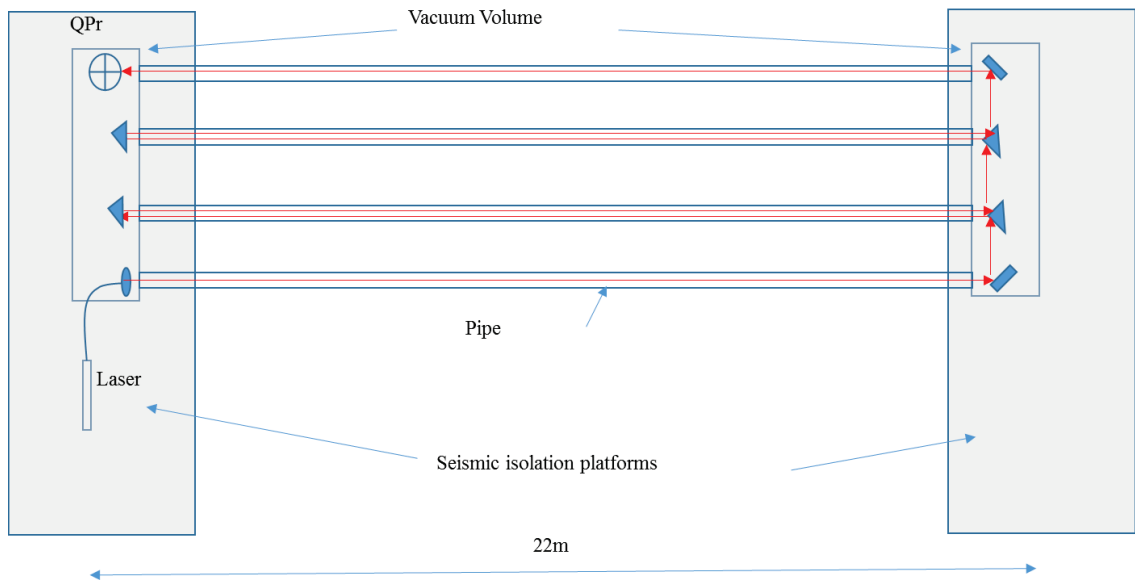


Рис. 8. Расположение 130м Лазерной Реперной Линии в Метрологической Лаборатории

3.2. Сроки реализации Лазерной Реперной Линии

На первом этапе планируется создание прототипа 130м варианта ЛРЛ в вакуумном исполнении.

Этап	Начало	Окончание
Создание прототипа вакуумированной ЛРЛ на длину 20 м	июнь 2018	декабрь 2018
Создание прототипа вакуумированной ЛРЛ на длину 60 м с системой шумоподавления блуждания лазерного луча	январь 2019	декабрь 2019
Создание прототипа вакуумированной ЛРЛ на длину 130 м с системой шумоподавления блуждания лазерного луча с использованием сейсмостабилизированной платформы. Определение шумовых характеристик ЛРЛ	январь 2020	декабрь 2020

4. СЕЙСМОЗАЩИЩЁННАЯ ОТ УГЛОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ПЛАТФОРМА (ПРОТОТИП, ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ АКТИВНОСТЬ)

Помимо использования ПЛИ для регистрации микросейсмической активности поверхности Земли, сейсмической стабилизации коллайдера для получения существенно новых физических данных крайне важно развитие направление – Сейсмостабилизированная от угловых колебаний поверхности Земли Исследовательская Платформа (СИП).

Эта задача представляет значительный интерес для спектрометрического комплекса ATLAS, где требуется высокоточное воспроизведение пространственного расположения подсистем и структур спектрометра.

Более того, существует немало значимых физических экспериментов, где требуется достижение долговременной угловой стабильности основания под физическим прибором:

- в гравитационных антеннах используется подвеска зеркал на кварцевых нитях. При наклоне земной поверхности возникает наклон зеркала, который влияет на стабильность интерференционной картины в детекторе гравитационных волн.

- При наклоне поверхности Земли в современных телескопах с диаметром зеркала более 5м происходит смещение регистрируемой картины в фокусе телескопа и соответственно размазывание регистрируемого изображения.

- В опытах по определению гравитационной постоянной G наклон платформы влияет на положение пробных масс, что вносит неконтролируемую систематическую ошибку при проведении эксперимента.

- На основе маятника Цёлльнера на сейсмостабилизированной по углу платформе возможно построение нового более чувствительного датчика неравномерности вращения Земли.

- изучение долговременного изменения ландшафта с целью выявления зон на поверхности Земли с накоплением энергии деформации для развития методов предсказания землетрясений

Основанная на Прецизионном Лазерном Инклинометре технология создания сейсмостабилизированной исследовательской платформы, как представляется, даст возможность достигнуть новых точностей измерения в физическом эксперименте и технике.

4.1. Схема сейсмостабилизации исследовательской платформы

Для эксперимента предлагается использовать имеющийся оптический стол длиной 2.4 м и шириной 1.6 м (рис. 9).

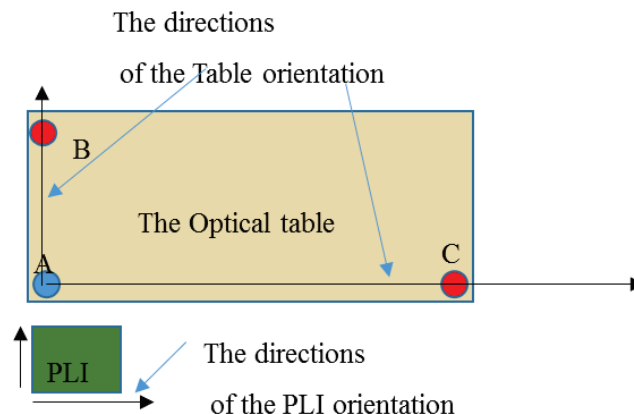


Рис. 9. Схема сейсмостабилизации платформы при помощи ПЛИ

Оптический стол устанавливается на три точки опоры: одна неподвижная А, и две В и С, изменяющие своё положение по высоте при помощи пьезоэлектрических актюаторов. Рядом с оптическим столом располагается Прецизионный Лазерный Инклинометр, который устанавливается на полу, имеющем непосредственный контакт с земной поверхностью. Направления регистрации ПЛИ угловых колебаний поверхности Земли коллинеарны направлениям, определяемым линиями АВ и АС на оптическом столе.

Сигналы угловых колебаний поверхности Земли в вертикальной и горизонтальной плоскостях обрабатываются компьютером в режиме онлайн. В результате обработки определяется и подаются корректирующие сигналы на пьезоактюаторы в точках В и С.

Проверка качества сейсмической стабилизации осуществляется при помощи вакуумированной системы подвесов (рис. 10).

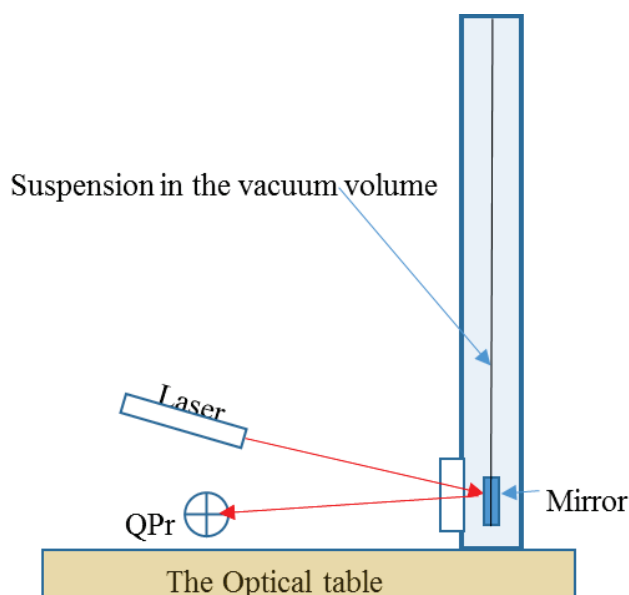


Рис. 10. Проверка качества сейсмостабилизации от угловых колебаний поверхности Земли вакуумированными маятниками

Особенность таких подвесов – разная длина. Это позволяет проводить исследования по качеству сейсмостабилизации на различных частотах в двух направлениях, по которым проводится стабилизация. Минимальная частота колебания определяется расстоянием поверхности оптического стола до потолка $l = 3$ м и составляет $f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}} = 0.29$ Гц. Для оценки сейсмостабилизации на максимальной частоте используется подвес с длиной $l = 5$ см, которой соответствует частота 2.2 Гц.

Амплитуда колебания подвеса измеряется при помощи лазерного луча и квадрантного фотоприёмника. При наклоне подвеса относительно поверхности стола отраженный лазерный луч также наклоняется, что приводит к смещению пятна лазерного луча на квадрантном фотоприёмнике QPr. Регистрируя сигналы с квадрантного фотоприёмника QPr, можно определить амплитуду колебаний подвеса. Отношение амплитуд колебаний подвеса до A_0 и после сейсмостабилизации A_{SI} определяет коэффициент сейсмостабилизации $K = \frac{A_0}{A_{SI}}$.

Таким образом можно получить объективные данные по качеству сейсмостабилизации, определив амплитуду колебаний подвесов до и после включения режима сейсмостабилизации.

4.2. Достижимая величина сейсмостабилизации от угловых колебаний поверхности Земли

Средний уровень угловых колебаний, обусловленных «Микросейсмическим пиком», в области частот [0.1 Гц; 1 Гц] оценивается $2 \cdot 10^{-7}$ рад. Точность измерения ПЛИ в режиме онлайн достигает 10 нрад. Следовательно, достижимый коэффициент подавления угловых колебаний «Микросейсмического пика» составит $K \approx 20$.

Задачи, которые ставятся в процессе создания СИП:

- Создание программы, вырабатывающей сигнал обратной связи по показаниям ПЛИ для СИП
- Создание широкополосной системы определения качества сейсмостабилизации.

4.3. Сроки реализации «Сейсмостабилизированная Исследовательская Платформа»

Этап	Начало	Окончание
Создание в Метрологической Лаборатории первого прототипа СИП на основе работающего серийного Прецизионного Лазерного Инклинометра	июнь 2018	июль 2019
Проведение экспериментов по оценке достижимой сейсмостабилизации в диапазоне частот 10^{-4} Гц – 4 Гц	август 2019	август 2020

ССВУ АНАЛИЗ

Сильные стороны проекта

Международная поддержка: На сегодняшний день уже выполнен полный комплекс НИОКР по созданию ПЛИ как профессионального прибора, адаптированного к серийному производству. Два ПЛИ уже введены в эксплуатацию и выполняют непрерывный мониторинг сейсмической активности: в ЦЕРН для количественного исследования вклада микросейсмических колебаний в нестабильность орбит пучков на ЛНС и в Международной Геофизической Обсерватории в г. Гарни для мониторинга сейсмической обстановки в сейсмоопасной зоне. Сейчас международное научное сообщество высказывает свою заинтересованность в дальнейшем развитии нашего проекта:

- Работа выполняется при поддержке фонда ВМБФ.
- Подписано Соглашение ОИЯИ-ЦЕРН о создании дополнительных пяти инклинометров для исследования эффекта применения сети ПЛИ в программе увеличения светимости Большого адронного коллайдера на спектрометре АТЛАС.
- Подписано Соглашение ОИЯИ-Армения для изучения возможности применения ПЛИ при оценке сейсмической опасности и прогнозировании землетрясений.

Финансирование: Проект выполняется при финансовой поддержке фонда ВМБФ, что в купе с финансированием из бюджета ЛЯП обеспечивает своевременную реализацию всех этапов проекта.

Кадры: Работы по Проекту выполняются высококвалифицированным коллективом учёных с существенной долей молодых сотрудников. Выполняемые исследования могут занять относительно много времени и крайне важно иметь сбалансированный возрастной состав в коллективе для обеспечения преемственности опыта и знаний при осуществлении проекта.

Материальная база: Практически завершено создание современной термостабилизированной Метрологической лаборатории, оснащённой современным оптическим, электронным и механическим оборудованием. Наличие такой лаборатории обеспечит эффективную реализацию всех направлений Проекта.

Собственное производство: Наличие в ЛЯП собственных мастерских для опытного производства создаваемых метрологических инструментов, что позволяет создание в короткие сроки необходимых высокотехнологичных конструктивов.

Слабые стороны проекта

Относительно малочисленный коллектив (5 чел. сейчас + 2-3 чел. в ближайшие 2 года). При возможном увеличении масштабов работы (создание 50 инклинометров для ЦЕРН и/или 20 для Гарни), расширение сотрудничества с другими научными центрами потребует увеличение численности коллектива.

Возможности

Создаваемые новые, не имеющие аналогов, метрологические технологии и устройства порождают условия для формирования ранее не существовавшего рынка уникальных приборов.

Создаваемые новые, метрологические технологии и устройства порождают условия для качественно нового уровня высокоточных физических экспериментов в широком круге научных задач. Это обеспечивает дополнительное сотрудничество, что привлечёт талантливых физиков и, соответственно, станет центром кристаллизации применения производимых устройств в последующих проектах.

Угрозы

Резкое сокращение финансирования со стороны фонда ВМБФ и/или со стороны ОИЯИ затормозят создания ПЛИ для ЦЕРНа и ГАРНИ. Ухудшение внешнеполитической обстановки не позволит закупать необходимое электронно-оптическое оборудования, что затормозит создание образцов метрологических устройств.

ВЫВОДЫ

В продлеваемом Проекте «Прецизионная лазерная метрология для ускорителей и детекторных комплексов» представлены предложения по разработке и исследованию новых методов лазерной метрологии. Все они направлены на получение фундаментально важных результатов, которые поднимут физический эксперимент на более высокий уровень точности.

Создание сети Прецизионных Лазерных Инклинометров впервые создаст возможность визуализировать изменение ландшафта поверхности Земли при прохождении поверхностных сейсмических волн. Такая возможность позволит перевести сейсмостабилизацию крупномасштабных физических установок (коллайдеры, линейные ускорители частиц) в практическую плоскость.

Интерферометрический измеритель расстояний решит задачу объединения координатных систем NETWORKов в экспериментах на Большом адронном коллайдере.

Лазерная Реперная Линия поможет решить задачу онлайн контроля за положением ускорительных блоков линейного коллайдера что станет эффективной заменой струнной реперной линии. Она может работать в радиационных условиях, что является принципиальным для линейных ускорителей.

Создание сейсмостабилизированной от угловых колебаний поверхности Земли исследовательской платформы на основе данных измерений ПЛИ улучшит условия проведения физического эксперимента и достижимую точность. СИП позволит создать сейсмоизолированные условия для целого ряда высокоточных производственных процессов (например, в производстве микросхем).

Создание перечисленных инструментов, помимо их важности по отдельности, является этапной работой в создании роботизированной измерительной системы, обеспечивающий непрерывный автоматический метрологический измерительный процесс в подземных экспериментальных залах коллайдерных экспериментов.

Таким образом, развитие лазерных метрологических технологий является актуальной задачей современной физики, которое позволит достичь нового уровня точностей в современном физическом эксперименте.

ЛИТЕРАТУРА

1. N.Azaryan, V.Batusov, J.Budagov, V.Glagolev, M.Lyablin, G.Trubnikov, G.Shirkov, J.Ch.Gayde, B.Di Girolamo, D.Mergelkuhl, M.Nessi, “The precision laser inclinometer long-term measurement in thermo-stabilized conditions (First Experimental Data)”, Physics of Particles and Nuclei Letters, Vol.12, Iss.4, p.532, 2015
2. V.Batusov, J.Budagov, M.Lyablin, G.Shirkov, J-Ch.Gayde, D.Mergelkuhl, “The sensitivity limitation by the recording ADC to Laser Fiducial Line and Precision Laser Inclinometer”, Physics of Particles and Nuclei Letters, Vol.12, Iss.7, p.813, 2015
3. V.Batusov, J.Budagov, M.Lyablin, G.Shirkov, J-Ch.Gayde, D.Mergelkuhl, “The calibration of the precision laser Inclinometer”, Physics of Particles and Nuclei Letters, Vol.12 1, Iss.7, p.819, 2015
4. N.Azaryan, J.Budagov, J-Ch.Gayde, B.Di Girolamo, V.Glagolev, M.Lyablin, D.Mergelkuhl, G.Shirkov, “The Innovative Method of High Accuracy Interferometric Calibration of the Precision Laser Inclinometer”, Physics of Particles and Nuclei Letters, Vol.14, Iss.1, p.112, 2017
5. N.Azaryan, V.Batusov, J.Budagov, V.Glagolev, M.Lyablin, G.Trubnikov, G.Shirkov, J.Ch.Gayde, B.Di Girolamo, A.Herty, H.Mainaud Durand, D.Mergelkuhl V.Rude, “Comparative Analysis of Earthquakes Data Recorded by the Innovative Precision Laser Inclinometer Instruments and the Classic Hydrostatic Level System”, Physics of Particles and Nuclei Letters, Vol.14, Iss.3, p. 480, 2017
6. N.Azaryan, J.Budagov, J-Ch.Gayde, B.Di Girolamo, M.Lyablin, D.Mergelkuhl, A.Pluzhnikov, “The temperature stability of 0.005°C for the concrete floor in the CERN Transfer Tunnel #1 hosting the Precision Laser Inclinometer”, Physics of Particles and Nuclei Letters, Vol.14, Iss.6, p.913, 2017
7. N.Azaryan, J.Budagov, J-Ch.Gayde, B.Di Girolamo, M.Lyablin, D.Mergelkuhl, A.Pluzhnikov, “Determination of the maximum recording frequency by the Precision Laser Inclinometer of an Earth surface angular oscillation”, Physics of Particles and Nuclei Letters, Vol.14, Iss.6, p.920, 2017
8. N.Azaryan, J.Budagov, J-Ch.Gayde, B.Di Girolamo, M.Lyablin, D.Mergelkuhl, A.Pluzhnikov, “The compensation of the noise due to angular oscillations of the laser beam in the Precision Laser Inclinometer”, Physics of Particles and Nuclei Letters, Vol.14, No.6, p.930, 2017
9. D.Mergelkuhl, J. Gayde, “Analysis of Survey Results for ATLAS Cavern Stability in the period 2003-2017”, ATLAS Open EB – 12.12.2017
10. J.Budagov, M.Lyablin et al., “The Laser Fiducial Line measurement precision in open air media determined in comparison with laser tracker AT-401” Physics of Particles and Nuclei Letters, 2015, Vol.12(2), pp.297-304
11. B. Di Girolamo et al., “The Monitoring of the Effects of Earth Surface Inclination With the Precision Laser Inclinometer for High Luminosity Colliders”, Proceedings of RuPAC2016, St. Petersburg, Russia, pp.210-212.