

КОМПАКТНЫЙ ПРЕЦИЗИОННЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ИНКЛИНОМЕТР: ИЗМЕРЕНИЕ СИГНАЛОВ И ШУМОВ

*Н. В. Атанов¹, И. В. Бедняков¹, Ю. А. Будагов¹,
В. В. Глаголев¹, Ю. В. Клемешов¹, А. В. Краснощёров¹,
А. М. Кузькин¹, М. В. Ляблин^{1,*}, Р. В. Ни¹,
А. А. Плужников¹, К. Д. Поляков¹, А. А. Селецкий²,
Г. В. Трубников¹, Б. Ди Джироламо²*

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

² Европейский центр ядерных исследований, Женева

Представлены результаты работы по созданию малогабаритного прецизионного лазерного инклинометра (МПЛИ). Достигнуто уменьшение габаритных размеров устройства до $20 \times 20 \times 20$ см и веса до 10 кг.

Получены экспериментальные данные по регистрации угловых колебаний поверхности Земли на территории ОИЯИ. Достигнута величина чувствительности $6 \cdot 10^{-11}$ рад/Гц^{1/2} в диапазоне частот $1,4 \cdot 10^{-3}$ –12 Гц.

МПЛИ может быть использован в современном физическом эксперименте для сейсмоизоляции крупномасштабных установок. Уменьшение воздействия микросейсмических угловых колебаний поверхности Земли на чувствительные элементы интерференционной гравитационной антенны VIGRO, Большого адронного коллайдера, NICA повысит точность проведения экспериментов.

The results of developing a compact version of the Precision Laser Inclinometer (CPLI) with the reduced overall dimensions of $20 \times 20 \times 20$ cm and weight of 10 kg are presented.

Experimental data on detected angular oscillations of the Earth's surface at the JINR site are obtained. The achieved sensitivity is $6 \cdot 10^{-11}$ rad/Hz^{1/2} in the frequency range $1.4 \cdot 10^{-3}$ –12 Hz.

The CPLI can be used in modern physical experiments for seismic isolation of large-scale installations. Reduction of the impact of microseismic angular oscillations of the Earth's surface on the sensitive elements of the VIRGO Interference Gravitational Antenna, the Large Hadron Collider, and NICA will increase the accuracy of the experiments.

PACS: 06.60.Sx; 42.62.-b

* E-mail: lyablin@jinr.ru

ВВЕДЕНИЕ

Для повышения точности измерения в современном крупномасштабном физическом эксперименте требуется уменьшить влияние угловых наклонов земной поверхности, вызванных поверхностными сейсмическими волнами [1–4]. В коллайдерах это явление приводит к смещению фокусов пучков частиц, в интерферометрических гравитационных антеннах — к шумовым колебаниям подвешенных зеркал.

Для решения этих задач в ОИЯИ был изобретен новый прецизионный метод измерения изменения углов наклона поверхности Земли — прецизионный лазерный инклинометр (ПЛИ) [5]. Достигнута точность измерения ПЛИ $2,4 \cdot 10^{-11}$ рад/Гц^{1/2} в диапазоне частот 10^{-3} –10 Гц [6–10].

Первые поколения ПЛИ имели большие габариты ($50 \times 40 \times 30$ см) и вес более 60 кг. Также необходимо было учитывать объем электроники для его обслуживания. Зачастую найти место для размещения ПЛИ в физическом эксперименте с указанными габаритами и весом затруднительно. Поэтому возникла необходимость существенно уменьшить габаритные и весовые характеристики инклинометра.

Для создания малогабаритного ПЛИ (МПЛИ) необходимо было изменить оптическую схему ПЛИ, использовать температурно-резистивные элементы в конструкции МПЛИ и др. [11, 12].

В данной работе рассматриваются основные характеристики нового типа инклинометра — МПЛИ.

МЕТОДОЛОГИЯ ПРЕЦИЗИОННОГО ЛАЗЕРНОГО ИНКЛИНОМЕТРА

ПЛИ основан на свойстве поверхности жидкости горизонтироваться при наклоне земной поверхности. При этом поверхность горизонтизированной жидкости перпендикулярна вектору силы тяжести Земли.

Вектор силы тяжести испытывает угловые наклоны, вызванные сторонними силами, Луной и Солнцем, окружающими массивными объектами (горами, водоемами). Для регистрации изменения наклона земной поверхности они не представляют особого значения в силу крайне низких частот их воздействия. При регистрации

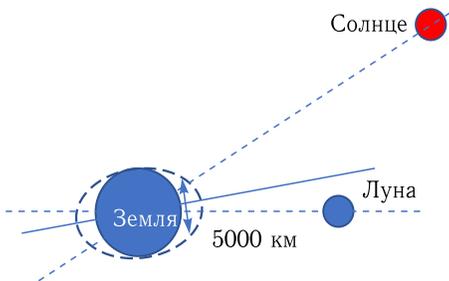


Рис. 1. Изменение угловых наклонов поверхности Земли Луной и Солнцем

изменения наклонов земной поверхности в диапазоне частоты 10^{-3} –20 Гц эти явления условно постоянны и не меняют величины

наклонов земной поверхности. Влияние Луны и Солнца происходит с периодом ~ 12 ч и покрывает территорию диаметром более 5000 км (рис. 1) [13, 14]. Использование ПЛИ на относительно небольшой площади (10×10 км) вызывает одинаковый для всех инклинометров наклон. Это позволяет учесть наклоны земной поверхности от Луны и Солнца в показаниях всех работающих на этой территории инклинометров.

Вторая особенность ПЛИ — использование тонкого слоя d жидкости в кювете инклинометра (рис. 2) [5, 15, 16]. При условии $d \ll \lambda_w$, где λ_w — длина поверхностной волны, из-за большого трения поверхностных волн о дно кюветы их распространение подавляется. Опыт показывает, что это условие работает во всем диапазоне частот ПЛИ.

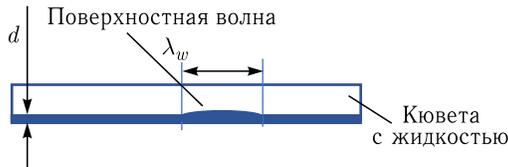


Рис. 2. Подавление поверхностных волн в тонком слое жидкости

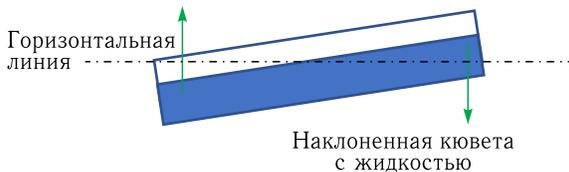


Рис. 3. Горизонтализация жидкости

Горизонтализация инклинометра происходит за счет эффекта сообщающихся сосудов [17, 18]. При резком наклоне кюветы происходит инерционное изменение положения поверхности жидкости, которое в дальнейшем возвращает ее в горизонтальное положение. При этом жидкость в кювете перемещается в вертикальном направлении. Эта особенность делает горизонтализацию достаточно быстрым процессом (рис. 3).

Из формулы собственной частоты ν колебаний в сообщающихся сосудах

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{d}}, \quad (1)$$

где g — ускорение свободного падения, d — толщина слоя жидкости, определим предельную частоту ν колебаний поверхности жидкости. Для слоя жидкости $d = 1$ мм частота ν равна 16 Гц.

Время горизонтализации составляет половину периода колебаний жидкости в сообщающихся сосудах

$$T_{\text{гор}} = \frac{1}{2\nu} \quad (2)$$

и равно $T_{\text{гор}} = 0,031$ с. По сути $T_{\text{гор}}$ определяет «мертвое время», в течение которого поверхность жидкости нестабильна. Это говорит о потенциально высокой предельно регистрируемой частоте (~ 20 Гц) колебаний поверхности Земли в ПЛИ.

Таким образом, мы имеем стабильную реперную поверхность, перпендикулярную вектору силы тяжести, относительно которой можно измерять наклоны земной поверхности.

Физическим ограничением для чувствительности ПЛИ является статистическое изменение объема жидкости, которое локально меняет наклоны поверхности жидкости. Оценки, полученные в работе [19], позволяют ограничить чувствительность инклинометра для воды величиной $4 \cdot 10^{-11}$ рад.

Для регистрации наклонов земной поверхности мы используем отражение лазерного луча от поверхности жидкости (рис. 4).

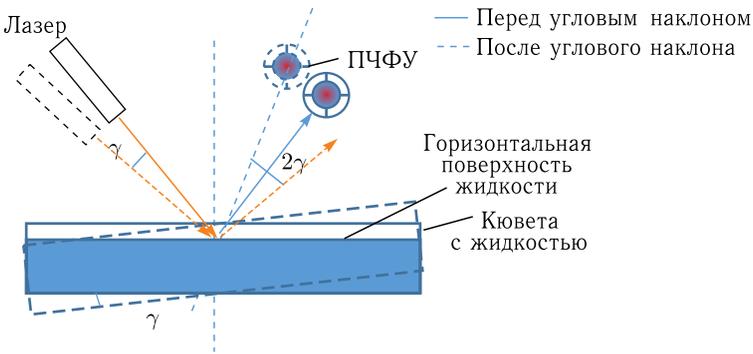


Рис. 4. Регистрация наклонов земной поверхности методом ПЛИ

Лазер, кювета с жидкостью и позиционно-чувствительное фотоприемное устройство (ПЧФУ) закреплены на поверхности Земли. При наклоне земной поверхности на угол γ отраженный лазерный луч смещается относительно ПЧФУ на удвоенный угол 2γ (см. рис. 4). Это позволяет одновременно измерять угловые изменения наклона поверхности Земли в двух ортогональных направлениях. Такие угловые изменения фиксируются с определенным временным интервалом и являются сигналами в прецизионном лазерном инклинометре.

Записанные сигналы ПЛИ определяют угловую эволюцию наклонов земной поверхности во времени. Именно эта особенность ПЛИ позволяет

использовать его для уменьшения влияния угловых наклонов земной поверхности в физическом эксперименте, а также определить временную эволюцию изменения ландшафта поверхности Земли.

ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ ПЛИ

Первое поколение ПЛИ. На первом этапе (2010 г.) определялись физические условия, при которых поверхность жидкости в кювете ПЛИ остается стабильной. На установке (рис. 5) были обнаружены первые микросейсмические сигналы удаленных землетрясений [20]. В 2012 г. был получен патент на изобретение [5], в котором зафиксирована идея использования тонкого слоя жидкости для стабилизации поверхности жидкости при регистрации наклонов земной поверхности.

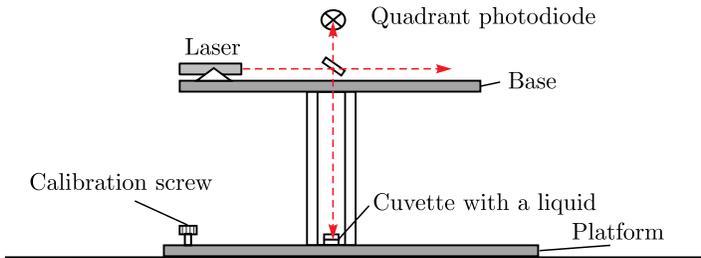


Рис. 5. Схема ПЛИ первого поколения

Второе поколение ПЛИ. Вторым важным этапом явилось использование эффекта снижения флуктуаций в сечении лазерного луча, вызванного турбулентным изменением воздушной среды. Ранее нами был обнаружен эффект стабилизации направления лазерного луча при его распространении в трубе [21]. Был получен патент [22], в котором закреплен приоритет в использовании этого эффекта. Был построен первый



Рис. 6. ПЛИ второго поколения

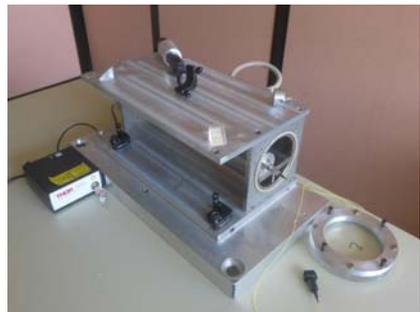


Рис. 7. ПЛИ третьего поколения

инклинометр (рис. 6), на котором впервые была получена эффективная онлайн-регистрация угловых колебаний поверхности Земли при прохождении поверхностных микросейсмических волн типа «микросейсмический пик».

Третье поколение ПЛИ. Следующим важным этапом явилось использование вакуума (2015 г.) для стабилизации положения лазерного луча. Вакуум позволил убрать пыль в воздушной среде и значительно уменьшил влияние флуктуации показателя преломления воздушной среды на точность измерения ПЛИ. Вакуумирование чувствительного элемента ПЛИ значительно улучшило чувствительность устройства. Также была введена отдельным каналом регистрация углового блуждания лазерного луча (рис. 7). Получены убедительные доказательства регистрации наклонов земной поверхности Луной и Солнцем в течение 3 сут (рис. 8) [23].

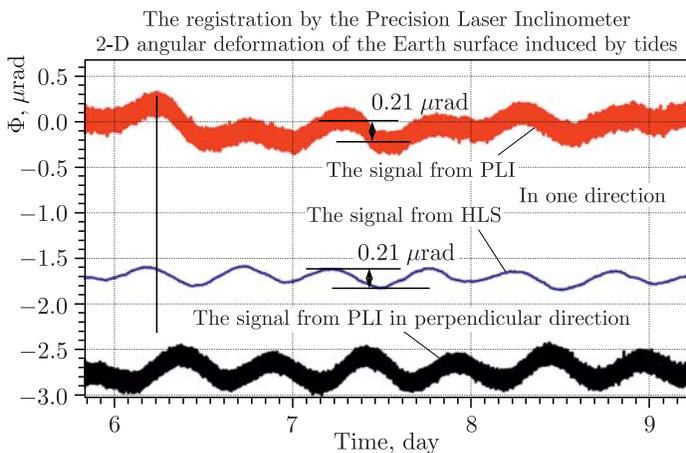


Рис. 8. Долговременная регистрация наклонов земной поверхности от Луны и Солнца

На рис. 8 показаны зарегистрированные с помощью ПЛИ (см. рис. 7) угловые колебания поверхности Земли от Луны и Солнца в двух ортогональных плоскостях в сравнении с измеренными на гидростатической уровневой системе (ГУС) длиной 150 м [24]. Одно из направлений регистрации ПЛИ совпадало с ГУС. Впервые получена запись одновременной регистрации угловых наклонов поверхности Земли от Луны и Солнца в двух ортогональных плоскостях компактным инклинометром.

Четвертое и пятое поколение ПЛИ. В следующих двух поколениях ПЛИ (рис. 9, 10) развивались методы дистанционного управления инклинометром и регистрации сигналов. Это позволило осуществить удаленный мониторинг микросейсмической активности Земли и приступить к реализации сети одновременно регистрирующих ПЛИ.



Рис. 9. ПЛИ четвертого поколения

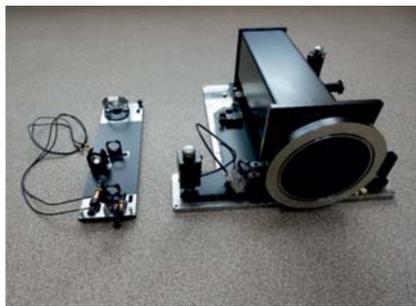


Рис. 10. ПЛИ пятого поколения

За период 2010–2020 гг. эволюция ПЛИ составила 5 поколений. Два последних поколения ПЛИ работают в международном геофизическом центре Гарни (Армения) (1 шт.), ЦЕРН (5 шт.) и на гравитационной антенне VIRGO (2 шт.).

Шестое поколение ПЛИ. Шестое поколение ПЛИ — малогабаритный прецизионный лазерный инклинометр.

На рис.11 представлен внешний вид чувствительного элемента МПЛИ. Мы надеемся, что МПЛИ существенно изменит как возможности применения прибора, так и точность полученных данных.

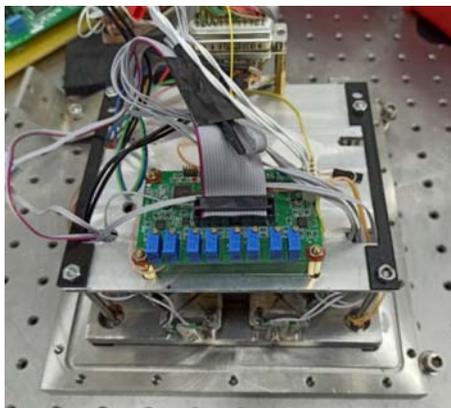


Рис. 11. Малогабаритный прецизионный лазерный инклинометр

Малогабаритный прецизионный лазерный инклинометр. Предыдущие поколения прецизионного лазерного инклинометра обладали габаритами, которые не позволяли его использовать в условиях интерферометрической гравитационной антенны VIRGO и туннеля LHC. Это обстоятельство вводило ограничения на дальнейшую работу с ПЛИ.

Требовалось резко уменьшить габариты инклинометра и его весовые характеристики.

Для размещения ПЛИ на чувствительных элементах гравитационной антенны и внутри тоннеля ЛНС его габариты должны быть меньше $20 \times 20 \times 20$ см и вес порядка 10 кг.

Способы, обеспечивающие малогабаритность ПЛИ. Основная проблема уменьшения габаритов ПЛИ связана с применением квадрантного фотоприемника для регистрации смещения лазерного луча. В ПЛИ используется сфокусированный лазерный луч диаметром фокусного пятна меньше 100 мкм. В квадрантном фотоприемнике имеется диэлектрический промежуток между фотоприемниками, который имеет минимальные размеры — 30 мкм [25]. Именно это не позволяет уменьшить диаметр лазерного луча (менее 100 мкм) и, соответственно, длину фокусного расстояния лазерного луча.

Большая длина фокусного расстояния (1 м) ограничивает габариты ПЛИ $50 \times 40 \times 30$ см. При таких габаритах вакуумный объем, чувствительный элемент и другие конструктивные детали, изготовленные из нержавеющей стали, имеют достаточно большой вес (~ 60 кг).

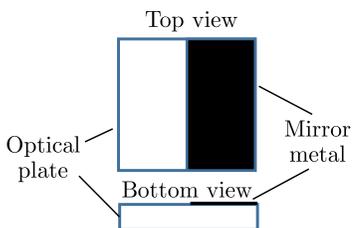


Рис. 12. Делительная пластинка

Требовалось резко уменьшить габариты и вес ПЛИ. Для этого мы использовали новый позиционно-чувствительный фотометрический метод регистрации смещения пятна одномодового лазерного луча — метод делительной пластинки.

Положение лазерного луча в рамках метода делительной пластинки определяется с помощью специально изготовленной делительной пластинки. Она представляет собой оптическую пластинку с напыленным слоем металла (Ag). Линия контакта поверхности оптической пластинки и металла (линия деления) — прямая (рис. 12).

При фокусировке лазерного луча на линию деления делительной пластинки одна часть лазерного луча отражается от металлической пленки, а другая его часть проходит через прозрачную часть оптической пластинки. В дальнейшем они направляются на фотоприемники PhD_1 и PhD_2 (рис. 13).

Поперечное смещение лазерного луча, пропорциональное углу наклона поверхности Земли, приводит к изменению сигналов с фотоприемников PhD_1 и PhD_2 . Как видно из рис. 13, этот метод свободен от диалектического промежутка, который есть в квадрантном фотоприемнике, и, соответственно, в нем возможно уменьшение диаметра сфокусированного лазерного луча до нескольких микрон.

В экспериментах с использованием изготовленных нами делительных пластинок показано, что сигналы фотоприемников не имеют особен-

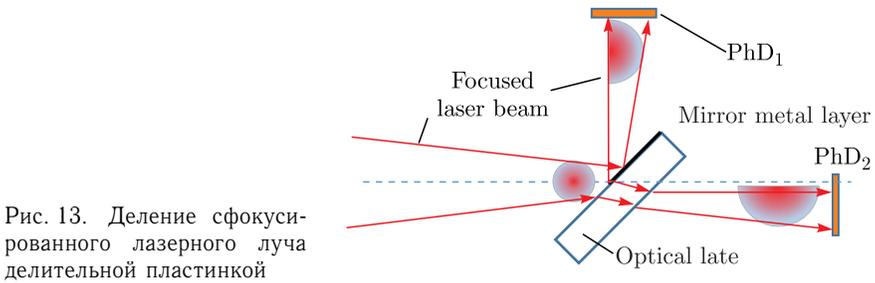


Рис. 13. Деление сфокусированного лазерного луча делительной пластинкой

ностей в зоне линейных смещений. При диаметре коллимированного лазерного луча 6,8 мм удалось сфокусировать лазерный луч до пятна диаметром 10 мкм при фокусном расстоянии 7,5 см. Таким образом, удалось уменьшить длину фокуса лазерного луча более чем в 13 раз и тем самым осуществить компактную реализацию ПЛИ.

Схема МПЛИ. Нам удалось сконструировать все оптические элементы инклинометра в конструкцию размерами $20 \times 20 \times 20$ см.

На рис. 14 приведена оптическая схема инклинометра.

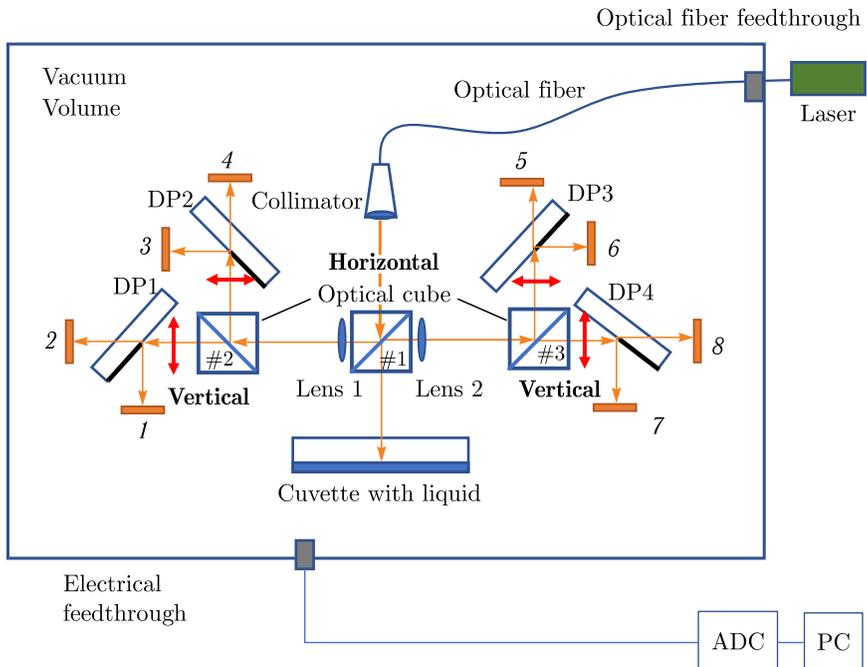


Рис. 14. Схема МПЛИ

В МПЛИ использовался лазер S4FC637 (Thorlabs) с оптоволоконным выходом излучения. Длина волны излучения $\lambda = 0,637$ мкм, мощность излучения 7 мВт.

Лазерное излучение через оптоволоконный ввод подавалось в вакуумный объем МПЛИ. Затем с помощью коллиматора оно направлялось на оптический куб № 1. Половина лазерного луча использовалась для формирования реперных лучей, вторая половина — для создания сигнального луча. После отражения от поверхности жидкости лазерный луч направлялся обратно на ОК1, где половина его мощности попадала в блок формирования сигнальных лучей. С помощью ОК2 и ОК3 и зеркала 31 и 32 формировались реперные и сигнальные лазерные лучи. Они подавались на позиционно-чувствительные фотоприемные устройства — делительные пластинки ДП1, ДП2, ДП3, ДП4 — для анализа их смещения в двух ортогональных направлениях (горизонтальном и вертикальном относительно вектора силы тяжести). В каждом ПЧФУ делительная пластинка использовались два фотоприемника. Таким образом, в системе регистрации углового положения сигнальных и реперных лазерных лучей имелись восемь информационных каналов (1–8). Сигналы с фотоприемников регистрировались двумя четырехканальными АЦП Data Translation DT9824 и записывались в компьютер.

В работе над МПЛИ мы отказались от юстировки лазерных лучей, как это было в предыдущих поколениях ПЛИ. Основная причина отказа в том, что юстировочные устройства являются источником низкочастотных шумов. В МПЛИ использовалось монолитное крепление всех оптических элементов — лазерного коллиматора, оптических делительных кубов, зеркал линзы — на специальной платформе (СП). СП монолитно крепится за неподвижную платформу МПЛИ, в которой размещена кювета с жидкостью.

Особенностью МПЛИ является перенос всех юстировочных операций в инклинометре на юстировку ПЧФУ делительная пластинка. Юстировка ПЧФУ делительная пластинка относительно пятна фокуса лазерного луча осуществлялась с помощью пьезоэлектрических линейных позиционеров (NEWPORT AG-LS25). Линия деления делительной пластинки устанавливалась на центр сфокусированного лазерного луча с помощью пьезоэлектрического позиционера с точностью минимального шага позиционера до 100 нм. При диаметре пятна лазерного луча 18 мкм такой шаг позволил точно находить центр лазерного луча и добиваться равной мощности на фотоприемниках ПЧФУ делительная пластинка PhD₁ и PhD₂.

Все оптические элементы крепились за металлические элементы конструкции с помощью клея.

Металлическая конструкция МПЛИ выполнена из нержавеющей стали. Это связано с тем, что МПЛИ крепится на бетонное основание. Коэффициент линейного расширения стали примерно равен коэффици-

енту линейного расширения бетона, что позволяет избежать деформации конструкции МПЛИ при изменении температуры.

Для обеспечения монолитности конструкции калибровочный узел в МПЛИ выполнен в виде внешнего самостоятельного устройства. Перед использованием инклинометра проводилась калибровка МПЛИ. Отъюстированный и вакуумированный МПЛИ устанавливался на калибровочное устройство, на котором с помощью методики интерферометрической калибровки определялись калибровочные коэффициенты. Точность калибровочного устройства позволяет определять калибровочные коэффициенты с точностью до 1 %.

В метрологической лаборатории ЛЯП в 2021 г. был собран первый прототип МПЛИ. После прохождения целого ряда модификаций мы получили тот вариант МПЛИ, который может быть использован как для низкочастотной области спектра (менее 10^{-3} Гц) угловых сейсмических изменений поверхности, так и для высокочастотной области (10^{-3} –12 Гц), в которой сосредоточены микросейсмические колебания земной и индустриальной природы.

Схема регистрации сигналов в МПЛИ. В МПЛИ используются два типа сигналов.

Первый тип связан с хаотическим угловым движением лазерного луча, возникающим из-за температурной нестабильности лазерного резонатора и оптического волокна. Эти сигналы регистрировались ДП1 с фотоприемниками ФП1, ФП2 и ДП2 с фотоприемниками ФП3, ФП4.

Второй тип сигналов связан с регистрацией наклонов земной поверхности — определением смещений отраженного от поверхности жидкости лазерного луча. Эти сигналы регистрируются с помощью ДП3 с фотоприемниками ФП5, ФП6 и ДП6 с фотоприемниками ФП7, ФП8.

Таким образом, имеем следующие наборы сигналов с фотоприемников (1–8):

– U_1, U_2 для вертикального направления движения пятна реперного лазерного луча;

– U_3, U_4 для горизонтального направления движения пятна реперного лазерного луча;

– U_5, U_6 для горизонтального направления движения пятна сигнального лазерного луча;

– U_7, U_8 для вертикального направления движения пятна сигнального лазерного луча.

Основная идея методики регистрации углового шумового движения лазерного луча заключается в последующем его вычитании из смещений лазерного луча, отраженного от жидкости. Эта процедура позволяет очистить сигналы от шума углового движения лазерного луча.

Таким образом, обработка сигнала проводится с помощью следующих формул:

1) сначала мы определим разности сигналов с фотоприемников для реперного и сигнального лучей. Эта процедура позволяет уменьшать

влияние нестабильности мощности лазерного луча и удваивать величину полезного сигнала.

Для реперного луча

$$\Delta U_{12} = \frac{(U_1 - U_2)}{(U_1 + U_3)}, \quad \Delta U_{34} = \frac{(U_3 - U_4)}{(U_3 + U_4)}, \quad (3)$$

для сигнального луча

$$\Delta U_{56} = \frac{(U_5 - U_6)}{(U_5 + U_6)}, \quad \Delta U_{78} = \frac{(U_7 - U_8)}{(U_7 + U_8)}; \quad (4)$$

2) для уменьшения влияния шумового блуждания лазерного луча вычтем последовательно сигналы реперного луча ΔU_{12} и ΔU_{34} из сигналов сигнального луча ΔU_{56} и ΔU_{78} :

$$U_{s_1} = \Delta U_{78} - \Delta U_{12}, \quad U_{s_2} = \Delta U_{56} - \Delta U_{34}; \quad (5)$$

3) зная калибровочные коэффициенты K_{s_1} и K_{s_2} , определим окончательно углы наклона поверхности Земли в двух ортогональных направлениях:

$$\Phi_{s_1} = K_{s_1} U_{s_1}, \quad \Phi_{s_2} = K_{s_2} U_{s_2}. \quad (6)$$

ЭКСПЕРИМЕНТЫ С МПЛИ

МПЛИ в процессе экспериментов был закреплен за бетонный пол метеорологической лаборатории. После нескольких суток стабилизации положения инклинометра в течение 24 ч были зарегистрированы восемь сигналов МПЛИ. Эксперименты проводились в отсутствие персонала, поскольку нахождение людей непосредственно в лаборатории деформирует пол лаборатории и вызывает паразитные сигналы. Длительность одного измерения составила 1/30 с.

Обработка экспериментальных сигналов в МПЛИ. На рис. 15 и 16 показан вид сигналов МПЛИ.

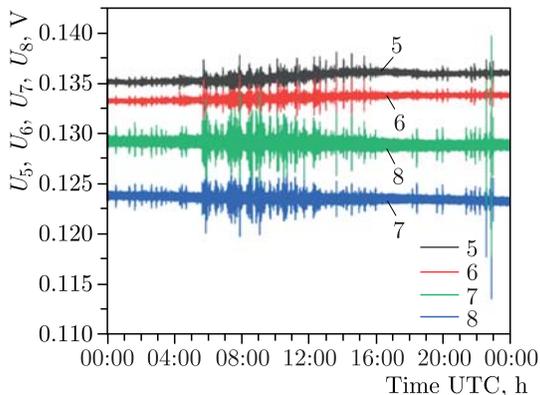


Рис. 15. Суточная запись четырех сигналов с сигнальных фотоприемников

Как видно из рис. 16, регистрация первичных сигналов показала их достаточную стабильность и отсутствие существенных долговременных дрейфов.

По формулам (3), (4) определены сигналы разности ΔU_{12} , ΔU_{34} и ΔU_{56} , ΔU_{78} . На рис. 17 показаны эти сигналы.

Как видно из рис. 17, обработанные четыре сигнала имеют меньшую зависимость от изменения мощности лазерного источника.

Затем мы вычли реперные сигналы из сигналов наклона и результат умножили на калибровочные коэффициенты K_{s_1} и K_{s_2} и окончательно определили два сигнала Φ_{s_1} и Φ_{s_2} , которые соответствуют колебаниям поверхности Земли в двух ортогональных плоскостях.

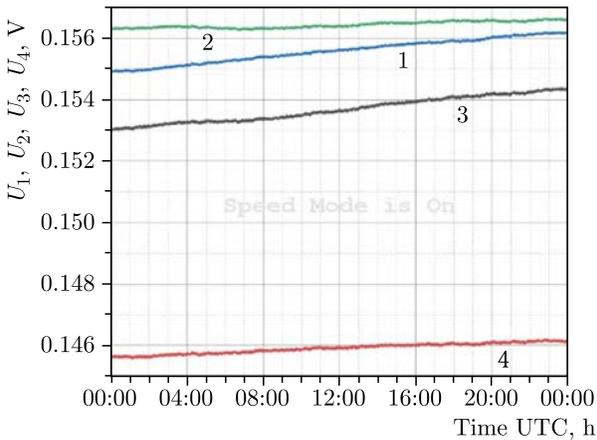


Рис. 16. Суточная запись четырех сигналов с реперных фотоприемников

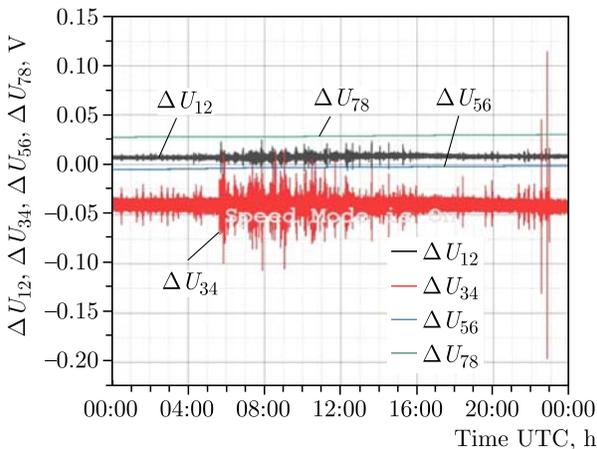


Рис. 17. Сигналы разности ΔU_{12} , ΔU_{34} и ΔU_{56} , ΔU_{78}

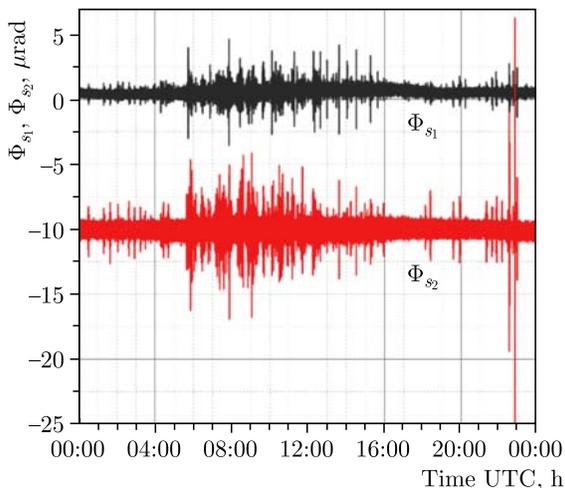


Рис. 18. Обработанные сигналы угловых наклонов Φ_{s1} и Φ_{s2} поверхности Земли за период 24 ч

На рис. 18 показаны вычисленные сигналы Φ_{s1} и Φ_{s2} , в которых учтены влияние нестабильности мощности лазерного излучения и угловое шумовое движение лазерного луча.

Измерение наклонов земной поверхности Φ_{s1} и Φ_{s2} проводилось в направлениях восток–запад и север–юг.

Калибровка МПЛИ. Калибровка проводилась внешним калибровочным устройством.

В работе [7] нами разработана процедура калибровки инклинометра с помощью интерферометра. Суть калибровки заключается в одновременном изменении линейно растущих углов наклона с помощью интерферометра и инклинометра при линейном изменении их с помощью пьезостакера. На рис. 19 приведена схема интерферометрического калибровочного блока.

На подвижной платформе калибровочного устройства устанавливаются МПЛИ и интерферометр. Подвижная платформа может менять угловое положение относительно неподвижной платформы на калибровочный угол с помощью пьезостакера. При подаче растущего напряжения на пьезостакер подвижная платформа наклоняется относительно шаровой опоры, что приводит к изменению расстояния между зеркалами интерферометра, смещению полос в интерференционной картине и, соответственно, изменению сигнала на фотодиоде. Сигналы с интерферометра и МПЛИ подаются на АЦП. При непрерывном наклоне подвижной платформы одновременно измеряются сигналы с МПЛИ и интерферометра.

На рис. 20 показаны данные записи сигналов с МПЛИ и интерферометра. Как видно из этого рисунка, изменение интерференционной картины (ИК) приводит к синусоидальному изменению калибровочного

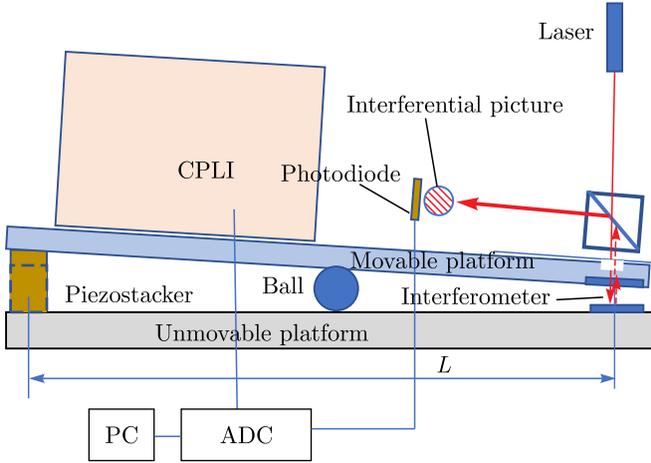


Рис. 19. Схема интерференционной калибровки МПЛИ

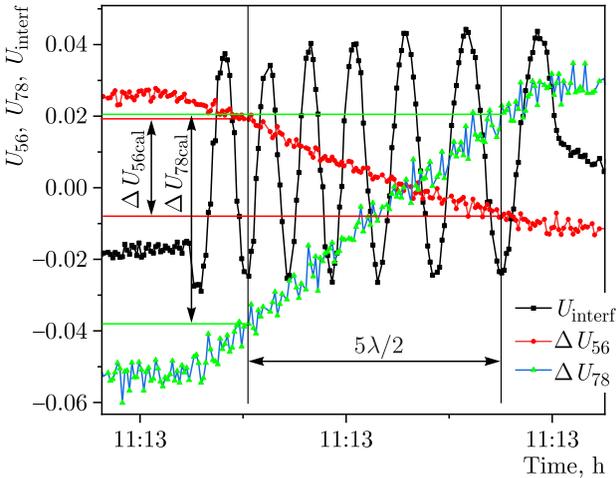


Рис. 20. Определение калибровочных коэффициентов по данным измерений

сигнала. Изменения углов наклона, измеренных с помощью ПЛИ, имеют линейный вид. Зная, что расстояние между максимумами ИК соответствует смещению

$$\frac{\lambda}{2}, \tag{7}$$

можно определить калибровочный угол:

$$\Phi_k = \frac{N\lambda}{2L}, \tag{8}$$

где L — расстояние между интерференционным блоком и пьезостакером (см. рис. 19); N — количество максимумов интерференционной картины.

Поскольку изменение угла Φ_k и сигналов ΔU_{k_1} и ΔU_{k_2} происходит одновременно, можно определить, какому изменению сигнала с МПЛИ (ΔU_{k_1} и ΔU_{k_2}) соответствует изменение угла наклона на калибровочный угол Φ_k .

Из формулы (8) определяем калибровочные коэффициенты:

$$K_{s_1} = \frac{\Phi_k}{\Delta U_{k_1}}, \quad K_{s_2} = \frac{\Phi_k}{\Delta U_{k_2}}. \quad (9)$$

Калибровочные коэффициенты K_{s_1} , K_{s_2} были определены на базе десяти независимых калибровочных измерений. В каждом измерении регистрировались свои калибровочные коэффициенты, затем вычислялись среднее значение калибровочных коэффициентов и их среднеквадратичные отклонения.

Значения калибровочных коэффициентов во время измерений (см. рис. 18) равны

$$K_{s_1} = (225 \pm 3) \text{ мкрад}$$

— для направления, в котором сигнальный лазерный луч перемещается горизонтально (север–юг);

$$K_{s_2} = (105 \pm 2) \text{ мкрад}$$

— для вертикальных смещений (запад–восток).

Регистрация микросейсмических сигналов МПЛИ. Из данных измерений, приведенных на рис. 18, видно, что основная составляющая сигналов соответствует индустриальным шумам. Причем индустриальный шум значительно увеличивается в дневной период. На рис. 21 представ-

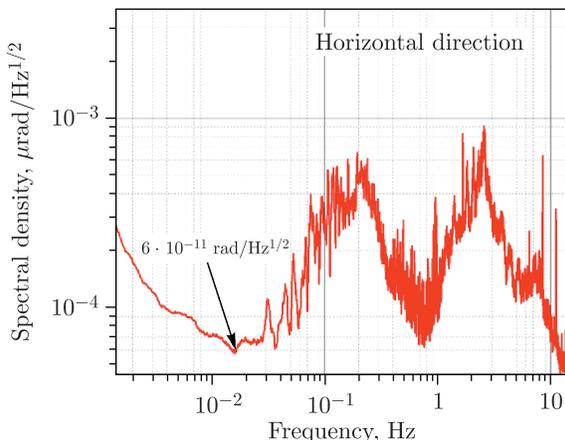


Рис. 21. Фурье-анализ колебаний поверхности Земли в направлении восток–запад (по данным из рис. 18)

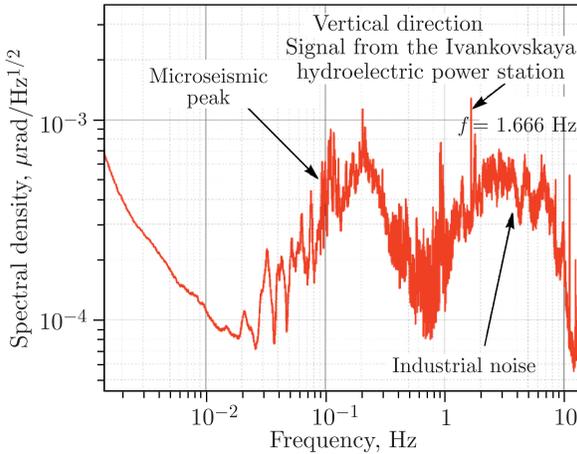


Рис. 22. Фурье-анализ колебаний поверхности Земли в направлении север-юг (по данным из рис. 18)

лен спектр колебаний движения пола в области частот $1,4 \cdot 10^{-3} - 12$ Гц за время измерения 24 ч в направлении восток-запад.

На рис. 22 показан спектр колебаний движения пола в области частот $1,4 \cdot 10^{-3} - 12$ Гц за время измерения 24 ч в направлении север-юг.

Как видно из рис. 21 и 22, наблюдаются сигналы микросейсмического пика в области частот $1,4 \cdot 10^{-3} - 12$ Гц, промышленные шумы, связанные с движением автотранспорта и электричек, сигнал от вращения гидротурбин на Ивановской ГЭС.

На рис. 23-25 показаны внешний вид сигналов прохождения электричек, удаленного землетрясения и микросейсмического пика соответственно.

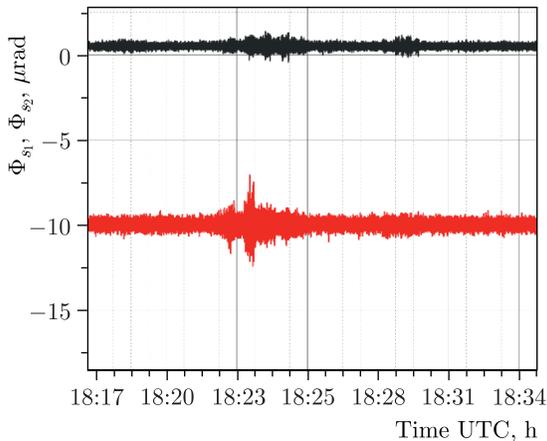


Рис. 23. Сигнал прохождения электрички

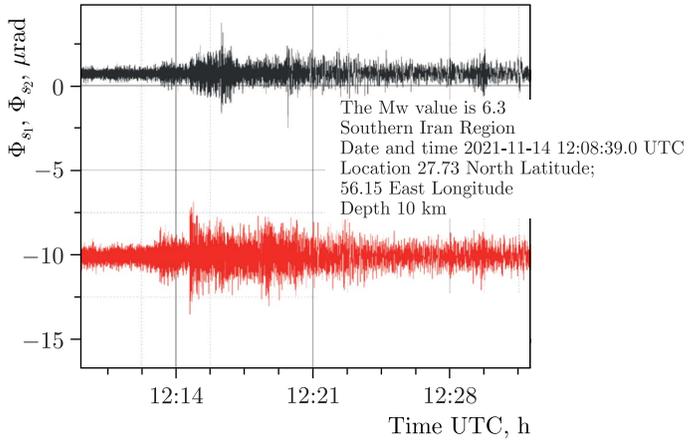


Рис. 24. Сигнал удаленного землетрясения

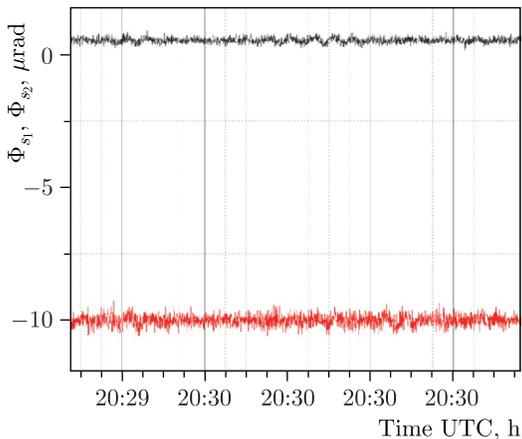


Рис. 25. Сигналы микросейсмического пика

Точность измерения и шумы в МПЛИ. Точность измерения ПЛИ определяется величиной минимального зарегистрированного микросейсмического сигнала. Как правило, величина шума определяется минимальным значением спектральной плотности микросейсмических сигналов, зарегистрированных в течение определенного промежутка времени. В нашем случае мы традиционно используем сутки (24 ч).

Величина минимальной спектральной плотности определяется в диапазоне частот, в котором присутствует большинство микросейсмических сигналов (10^{-3} –12 Гц). Проблема шумов связана с тем, что в спектре микросейсмических сигналов присутствуют как узкополосные сигналы (микросейсмический пик, землетрясения, промышленные шумы и др.),

так и широкополосные (движение материков, магмы, деформация поверхности Земли под действием ветровой нагрузки и температуры и др.). Поэтому в сейсмометрии этот уровень устанавливается как базовый, а чувствительность сейсмического прибора определяется по аппаратным шумам [26, 27].

Минимальная величина угловых колебаний зарегистрирована нами с помощью ПЛИ в Гарни (Армения). Она составила $1,8 \cdot 10^{-11}$ рад/Гц^{1/2}.

В результате анализа данных, представленных на рис. 21, величина минимального сигнала, который был зарегистрирован, в нашем случае составила $6 \cdot 10^{-11}$ рад/Гц^{1/2}.

Для определения величины инструментальных шумов мы использовали перемещение делительной пластинки на минимально возможное расстояние. На рис. 26 приведена схема эксперимента.

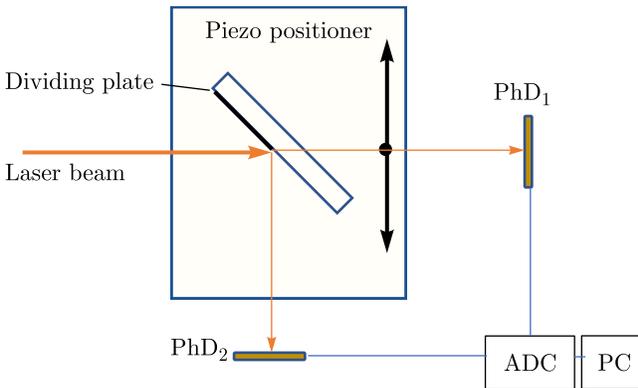


Рис. 26. Схема эксперимента по определению инструментальной точности МПЛИ

Лазерный луч подавался на линию деления делительной пластинки. Смещение лазерного луча на линии деления имитировалось поперечным смещением делительной пластинки с помощью пьезоэлектрического позиционера. Сигналы с фотоприемников регистрировались PhD₁ и PhD₂, АЦП и обрабатывались на компьютере.

Минимально возможное смещение лазерного луча составило $(0,342 \pm \pm 0,002)$ мкм. Оно было измерено при смещении пьезопозиционера на базе 10 000 шагов. Величина смещения каретки пьезопозиционера определялась с помощью цифрового штангенциркуля. По данным многократных измерений вычислялись средняя величина минимального смещения и его точность.

На рис. 27 приведены результаты смещения пятна лазерного луча на делительной пластинке при смещении пятна лазерного луча на 0,342 мкм.

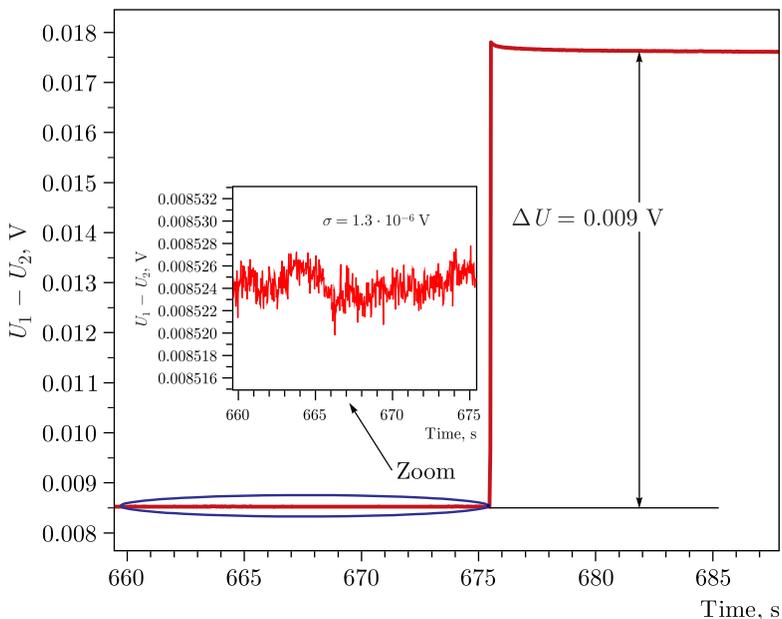


Рис. 27. Определение величины инструментального шума в МПЛИ

Определив среднеквадратичную величину шума реперного луча σ [В] за время наблюдения 15 с и измерив величину изменения разности сигналов ΔU с фотоприемников, можно вычислить величину смещения в размерных величинах.

Из соотношения

$$\frac{\Delta U}{\sigma[\text{В}]} = \frac{0,342 \text{ мкм}}{\sigma[\text{м}]} \quad (10)$$

определим величину шума σ [мкм] пятна лазерного луча (в метрах):

$$\sigma[\text{м}] = \frac{0,342 \text{ мкм}}{\Delta U} \sigma[\text{В}].$$

Величина среднеквадратичной точности измерения составила $\sigma = 40$ пм.

При расстоянии L от оптического волокна до линии деления делительной пластинки ($L = 10$ см) (см. рис. 14), определенном по формуле $\sigma[\text{рад}] = \sigma[\text{мкм}]/L$, инструментальная погрешность $\sigma_{\text{мпли}}$ онлайн-измерения МПЛИ составляет $\sigma[\text{рад}] = 5 \cdot 10^{-10}$ рад.

Используя формулу (1), определим также калибровочный коэффициент для реперного луча:

$$K_{\text{реп}} = \frac{\Phi}{\Delta U} = \frac{0,342 \text{ мкм}}{L \Delta U}. \quad (11)$$

Для $L = 10$ см, $\Delta U = 0,009$ В

$$K_{\text{реп}} = 50 \text{ мкрад/В.}$$

Переведя с помощью калибровочного коэффициента $K_{\text{реп}}$ данные изменения реперного луча из вольт в микрорадианы, получим в радианах величину суточной нестабильности реперного луча (рис. 28).

По данным, представленным на рис. 16, определим спектральную плотность колебаний реперного луча.

На рис. 29 приведены результаты фурье-анализа изменений углового направления реперного лазерного луча в частотном диапазоне $1,4 \times 10^{-3} - 12$ Гц, полученных на основе данных рис. 28.

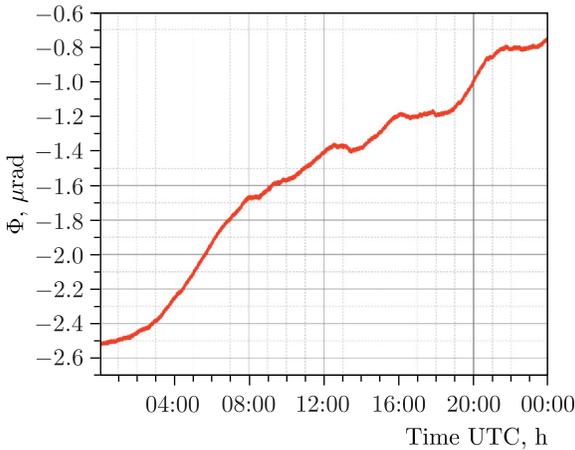


Рис. 28. Угловая нестабильность углового положения реперного лазерного луча

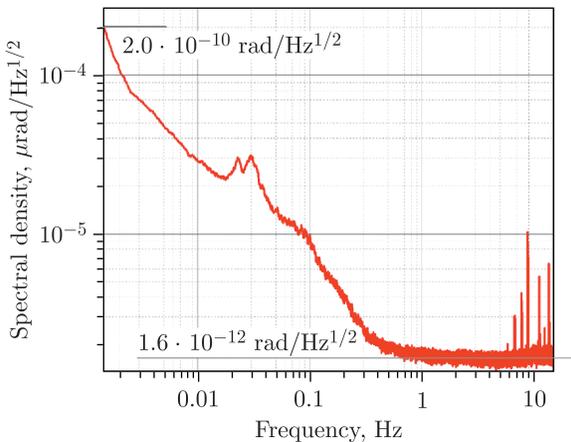


Рис. 29. Спектральная плотность инструментальных шумов МПЛИ в диапазоне частот $1,4 \cdot 10^{-3} - 12$ Гц

Как видно из рис. 29, величина спектральной плотности в диапазоне частот $1,4 \cdot 10^{-3} - 12$ Гц варьируется от $2,0 \cdot 10^{-10}$ до $1,6 \cdot 10^{-12}$ рад/Гц^{1/2}.

ОБСУЖДЕНИЕ

Достигнутые габариты и чувствительность МПЛИ вполне достаточны для его применения в ИГА второго поколения VIRGO, в туннеле ЛНС, а также для прогноза землетрясений.

Для ИГА третьего поколения требуется создание МПЛИ, который бы мог работать в криогенных температурах. Основная проблема при столь низких температурах — подача криогенной жидкости в рабочую зону МПЛИ. Для этой цели предлагается использовать замкнутый объем, в котором при атмосферном давлении находится сжижаемый газ рис. 30).

При достижении криогенных температур газ сжижается, конденсируется и собирается в кювете. При этом лазерный луч начинает отражаться от поверхности криогенной жидкости и использоваться в обычной схеме МПЛИ. Юстировка лазерного луча на ПЧФУ осуществляется с помощью внешних пьезостакеров. Они наклоняют замкнутую кювету и таким образом юстируют отраженный от поверхности криогенной жидкости лазерный луч на ПЧФУ. Поскольку для частотного диапазона $10^{-3} - 20$ Гц не требуется стабилизация направления исходного лазерного луча (см. рис. 14), то без реперных лучей конструкция МПЛИ резко упрощается.

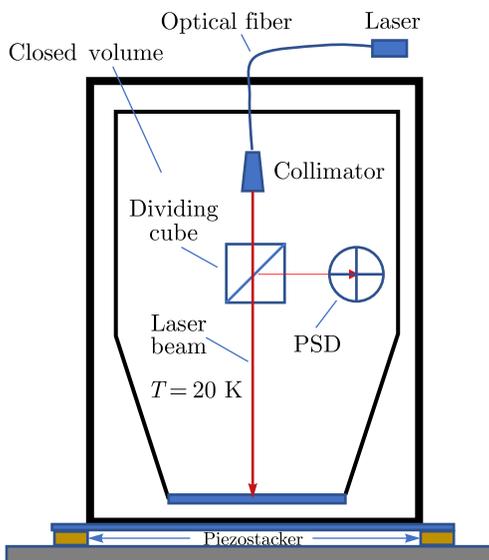


Рис. 30. Схема криогенного МПЛИ

Такая компоновка оптического оборудования позволяет создать МПЛИ, работающий в криогенных условиях, стабилизировать положение зеркал и делительных пластинок интерференционно-гравитационной антенны третьего поколения «Телескоп Эйнштейна».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты работы нового поколения ПЛИ — малогабаритного прецизионного лазерного инклинометра.

В МПЛИ достигнуты габаритные размеры $20 \times 20 \times 20$ см и вес ~ 10 кг, которые позволяют использовать МПЛИ в стабилизации чувствительных элементов интерференционной гравитационной антенны второго поколения VIRGO для создания сети инклинометров, предназначенных для стабилизации пространственного положения коллайдера ЛНС и его долговременных деформаций. Новый тип ПЛИ также позволяет создать сеть по прогнозу землетрясений.

Измерения МПЛИ были проведены в метрологической лаборатории ЛЯП (ОИЯИ). Получена суточная запись угловых колебаний поверхности Земли в двух ортогональных плоскостях. Достигнута чувствительность $6 \cdot 10^{-11}$ рад/Гц^{1/2} при регистрации микросейсмов в диапазоне частот 10^{-3} –12 Гц. Зарегистрированы микросейсмические колебания типа микросейсмический пик, сигналы удаленных землетрясений, промышленных шумов.

Определена инструментальная угловая точность измерения МПЛИ. Для онлайн-измерений она составила 0,5 нрад. Спектральная плотность колебаний в диапазоне частот $1,4 \cdot 10^{-3}$ –12 Гц варьируется от $2,0 \cdot 10^{-10}$ до $1,6 \cdot 10^{-12}$ рад/Гц^{1/2}.

Предложен вариант криогенного МПЛИ для гравитационной антенны третьего поколения «Телескоп Эйнштейна».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Westphal T., Hepach H., Pfaff J., Aspelmeyer M. Measurement of Gravitational Coupling between Millimetre-Sized Masses // Nature. 2021. V. 591. P. 225–228.
2. Azaryan N. S., Budagov J. A., Lyablin M. V., Pluzhnikov A. A., Trubnikov G., Shirkov G., Bruning O., Di Girolamo B., Gayde J.-Ch., Mergelkuhl D., Rossi L. Colliding Beams Focus Displacement Caused by Seismic Events // Phys. Part. Nucl. Lett. 2019. V. 16. P. 377–396.
3. Trozzo L., Badaracco F. Seismic and Newtonian Noise in the GW Detectors // Galaxies. 2022. V. 10. P. 20.
4. Matichard F., Lantz B., Mittleman R., Mason K., Kissel J., Abbott B., Biscans S., McIver J., Abbott R., Abbott S. et al. Seismic Isolation of Advanced LIGO: Review of Strategy, Instrumentation and Performance // Class. Quantum Gravity. 2015. V. 32. P. 185003.
5. RF Patent No. 2510488. Device for Measuring the Angle of Inclination / J. Budagov, M. Lyablin 30.05.2012.

6. *Di Girolamo B., Gayde J.-Ch., Mergelkuhl D., Schaumann M., Wenninger J., Azaryan N., Budagov J., Glagolev V., Lyablin M., Shirkov G., Trubnikov G.* The Monitoring of the Effects of Earth Surface Inclination with the Precision Laser Inclinator for High Luminosity Colliders // Proc. of the 25th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC'2016), St. Petersburg, Russia, Nov. 21–25, 2016. P. 210–212.
7. *Azaryan N., Budagov J., Gayde J.-Ch., Di Girolamo B., Glagolev V., Lyablin M., Mergelkuhl D., Shirkov G.* The Innovative Method of High Accuracy Interferometric Calibration of the Precision Laser Inclinator // Phys. Part. Nucl. Lett. 2017. V. 14, No. 1. P. 112–122.
8. *Azaryan N., Budagov J., Lyablin M., Pluzhnikov A., Di Girolamo B., Gayde J.-Ch., Mergelkuhl D.* The Compensation of the Noise Due to Angular Oscillations of the Laser Beam in the Precision Laser Inclinator // Ibid. No. 6. P. 930–938.
9. *Azaryan N., Budagov J., Glagolev V., Lyablin M., Pluzhnikov A., Seletsky A., Trubnikov G., Di Girolamo B., Gayde J.-C., Mergelkuhl D.* Professional Precision Laser Inclinator: The Noises Origin and Signal Processing // Phys. Part. Nucl. Lett. 2019. V. 16, No. 3. P. 264–276.
10. *Azaryan N., Budagov J., Glagolev V., Lyablin M., Pluzhnikov A., Seletsky A., Trubnikov G., Di Girolamo B., Gayde J.-C., Mergelkuhl D.* The Seismic Angular Noise of an Industrial Origin Measured by the Precision Laser Inclinator in the LHC Location Area // Ibid. No. 4. P. 343–353.
11. *Budagov J., Di Girolamo B., Lyablin M.* The Compact Nanoradian Precision Laser Inclinator – an Innovative Instrument for the Angular Microseismic Isolation of the Interferometric Gravitational Antennas // Phys. Part. Nucl. Lett. 2020. V. 17, No. 7. P. 916–930.
12. Invention to patent RU 2740489. Laser Inclinator for Long-Term Registration of the Angular Inclinations of the Earth's Surface / J. A. Budagov, M. V. Lyablin.
13. *Мельхиор П.* Земные приливы. М.: Мир, 1968. 482 с.
14. *Butikov E. I.* Oceanic Tides: A Physical Explanation and Modeling // Comput. Tools in Education. 2017. No. 5. P. 12–34.
15. *Le Mkhauty B.* An Introduction to Hydrodynamic and Water Waves. Pacific Oceanogr. Lab. Miami. 1969.
16. *Kovtunen P. V.* Propagation of Perturbations in a Thin Layer of a Fluid Stratified by Viscosity // Bull. Novosibirsk State Univ. Ser.: Mathematics, Mechanics, Informatics. 2015. V. 12, No. 2. P. 38–50.
17. *Tipler P. A.* Physics. New York: Worth Publ. Inc., 1980. Ch. 14.
18. *De Luca R., Faella O.* Communicating Vessels: A Non-linear Dynamical System // Revista Brasileira de Ensino de Física. 2017. V. 39, No. 3. P. e3309.
19. *Budagov J., Di Girolamo B., Lyablin M.* The Method of Temperature Resistivity Creation of the Compact Precision Laser Inclinator // Phys. Part. Nucl. Lett. 2020. V. 17, No. 7. P. 931–937.
20. *Batusov V., Budagov J., Lyablin M.* A Laser Sensor of a Seismic Slope of the Earth Surface // Phys. Part. Nucl. Lett. 2013. V. 10, No. 1. P. 43–48.
21. *Batusov V., Budagov Yu., Lyablin M., Sissakyan A.* On Some New Effect of Laser Ray Propagation in Atmospheric Air // Phys. Part. Nucl. Lett. 2010. V. 7. P. 359–363.

22. RF Patent No. 2510488. Device for Forming a Laser Beam / V. Yu. Batusov, Yu. A. Budagov, M. V. Lyablin, A. N. Sisakyan 05.30.2012.
23. *Lyablin M.* Observation of the 2-D Earth Surface Angular Deformations by the Moon and Sun by the Precision Laser Inclinator // CLIC Workshop 2017, CERN, Geneva, March 6–10, 2017.
24. *Coosemans W., Mainaud Durand H., Marin A., Quesnel J.-P.* The Alignment of the LHC Low Beta Triplets: Review of Instrumentation and Methods // Proc. of the 7th Intern. Workshop on Accel. Alignment “SPRING-8”, Japan, Nov. 11–14, 2002.
25. <https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/optical-sensors/photodiodes/si-photodiode-array/segmented-type-si-photodiode/S5980.html>
26. *Brune J. N., Oliver J.* The Seismic Noise of the Earth's Surface // Bull. Seism. Soc. Am. 1959. V. 49. P. 349–353.
27. *McNamara D. E., Buland R. P.* Ambient Noise Levels in the Continental United States // Bull. Seism. Soc. Am. 2004. V. 94, No. 4. P. 1517–1527.