

КОМПЕНСАЦИЯ УГЛОВОГО ШУМОВОГО КОЛЕБАНИЯ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА В ПРЕЦИЗИОННОМ ЛАЗЕРНОМ ИНКЛИНОМЕТРЕ

Н. С. Азарян^а, Ю. А. Будагов^а, М. В. Ляблин^а, А. А. Плужников^а,

Б. Ди Джироламо^б, Ж.-Кр. Гайде^б, Д. Мергелькуль^б

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Европейская организация ядерных исследований, Женева

Предложена и экспериментально реализована методика компенсации углового шумового колебания лазерного луча в прецизионном лазерном инклинометре (ПЛИ). Достигнуто более чем 30-кратное уменьшение спектральной плотности шумов ПЛИ до уровня 10^{-8} рад/Гц^{1/2} на частоте $5 \cdot 10^{-5}$ Гц. Измерен шум углового движения лазерного луча, выходящего из одномодового оптического волокна в вакуумных и термостабильных условиях. Амплитуда суточных колебаний достигает 0,4 мкрад.

An experimental method for the compensation of the noise originated by the laser ray angular oscillations was proposed and experimentally proved for the Precision Laser Inclinometer (PLI). The PLI noise spectral density was reduced by a factor of 30 and reached 10^{-8} rad/Hz^{1/2} level at the frequency of $5 \cdot 10^{-5}$ Hz. The angular noise of a laser ray leaving the one-mode optical fiber in the vacuum and in stabilized temperature conditions has been measured. The amplitude of the oscillations for one-day observation reached 0.4 μ rad.

PACS: 91.10.Nj; 07.60.-j

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1–4] предложена новая методика детектирования углового движения поверхности Земли — применение прецизионного лазерного инклинометра (ПЛИ). Экспериментально достигнута при регистрации углового наклона поверхности Земли чувствительность 10^{-10} рад/Гц^{1/2} в области частот 10^{-2} –1 Гц.

В первых измерениях с ПЛИ продолжительностью более нескольких часов были обнаружены шумовые сигналы на уровне нескольких микроград. Дальнейшее исследование показало: основная причина подобных изменений — шумовое угловое колебание оси лазерного луча.

Проблема стабилизации углового движения лазерного луча крайне важна в таких областях, как атомно-силовая микроскопия, лазерная литография, лазерная реперная линия и другие [5–8]. Обычно стабилизация углового положения лазерного луча достигается при помощи детектирования положения лазерного луча позиционно-чувствительным

фотоприемником и последующей коррекцией углового положения лазерного луча прецизионным угловым позиционером [9–11]. Этот способ позволил улучшить стабильность направления излучения лазерного луча до 10^{-7} рад.

Для прецизионного лазерного инклинометра необходима более полная компенсация шума углового колебания лазерного луча в низкочастотном (10^{-6} – 10^{-4} Гц) диапазоне, соответствующем продолжительности измерения от 3 ч до нескольких суток. Система компенсации требует для своей реализации достаточно большого пространства, что проблематично в компактном дизайне чувствительного элемента ПЛИ.

В работе предлагается и исследуется способ эффективного уменьшения шума углового движения лазерного луча в прецизионном лазерном инклинометре.

ШУМОВОЕ УГЛОВОЕ КОЛЕБАНИЕ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА

Угловое блуждание оси лазерного луча связано с тепловыми процессами в активной зоне лазерного источника и представляет собой хаотический процесс, в основном связанный с деформацией резонатора лазера вследствие флуктуаций температуры активной зоны лазера. В работах [12–19] исследовались долговременные (до 5 ч) угловые колебания лазерного луча от гелий-неонового лазера, полупроводникового одномодового лазера, лазера с оптоволоконным выходом. Средняя величина колебаний достигает десятков микроградусов. Производители лазерных источников указывают величину угловой стабильности направления излучения лазерного луча (Pointing stability (PS)). В лучших образцах твердотельных лазеров величина $PS < 10$ мкрад.

В работах [9–11] угловое положение лазерного луча стабилизировано с использованием системы обратной связи. На рис. 1 показана схема онлайн-стабилизации углового положения лазерного луча при помощи системы обратной связи.

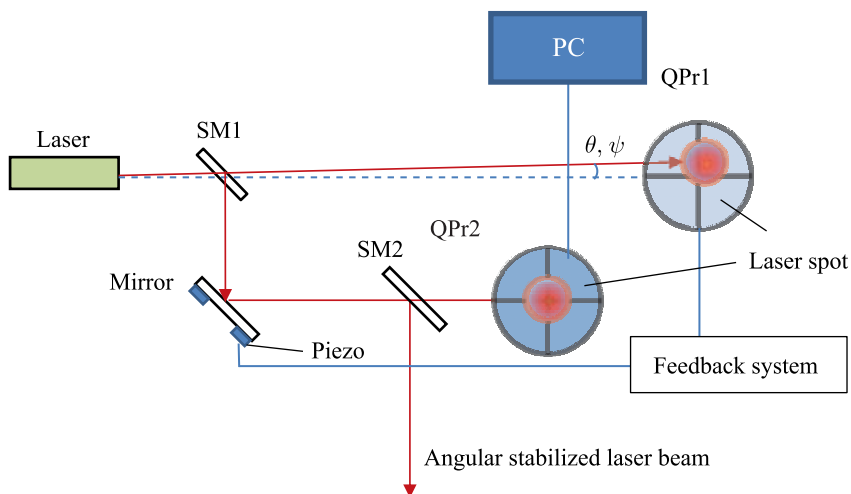


Рис. 1. Схема онлайн-стабилизации углового положения лазерного луча при помощи системы обратной связи

Луч лазера направляется на квадрантный фотоприемник QPr1. На QPr1 определяется положение центра лазерного пятна во времени и по этим данным вычисляется смещение по двум ортогональным направлениям. Зная расстояние от лазера до QPr1 для величины смещений пятна лазерного луча, определяем полярный и азимутальный углы θ , ψ .

Часть лазерного луча отклоняется полупрозрачным зеркалом SM1 и направляется на зеркало с пьезоэлектрическим угловым приводом. Углы θ , ψ при помощи системы обратной связи в режиме онлайн «трансформируются» в стабилизирующие перемещения пьезоэлементов, которые наклоняют зеркало на противоположные углы $-\theta$, $-\psi$, что стабилизирует угловое положение лазерного луча. Оно детектируется вторым квадрантным фотоприемником QPr2 и анализируется РС. При помощи полупрозрачного зеркала SM2 стабилизированный лазерный луч используется по назначению.

Ограничением в точности стабилизации подобной системы является минимальность шага угла наклона $5 \cdot 10^{-8}$ рад в пьезоэлектрическом угловом позиционере зеркала [12]. Использование пьезоэлектрических позиционеров в качестве «двигателя» углового наклона зеркала также ограничено нелинейным гистерезисом в их смещениях, достигающим 15% от величины общего смещения [13]. Вторым ограничением является минимальная величина регистрируемого смещения пятна лазерного луча на квадрантном фотоприемнике. В работе [14] определена точность Δx регистрации положения лазерного луча на квадрантном фотоприемнике,

$$\Delta x = \frac{\pi}{8} D \frac{\Delta U}{U}, \quad (1)$$

где D — диаметр пятна лазерного луча на квадрантном фотоприемнике; ΔU — шум регистрирующего 24-битного АЦП; U — суммарный сигнал с квадрантного фотоприемника. При $D = 5$ мм, $\Delta U = 2$ мкВ, $U = 0,5$ В получаем $\Delta x = 8 \cdot 10^{-8}$ м. При расстоянии 0,5 м между лазером и QPr ограничение на минимально регистрируемый наклон лазерного луча составит $1,6 \cdot 10^{-7}$ рад.

Как видно из рассмотрения, активные методы стабилизации углового положения лазерного луча недостаточны для их применения в ПЛИ.

СИСТЕМА КОМПЕНСАЦИИ УГЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА В ПРЕЦИЗИОННОМ ЛАЗЕРНОМ ИНКЛИНОМЕТРЕ

Для регистрации медленно изменяющихся наклонов земной поверхности в частотном диапазоне 10^{-6} – 10^{-4} Гц необходимо достижение точностей стабилизации углового положения лазерного луча лучше 10^{-8} рад. Например, к такого рода явлениям относится угловой наклон поверхности Земли Луной и Солнцем. Зарегистрированный гидростатической уровневой системой HLS угол наклона земной поверхности Луной и Солнцем составил $2 \cdot 10^{-7}$ рад [20]. Соответственно, для надежной регистрации этого явления необходимо стабилизировать шумовое угловое колебание лазерного луча с точностью не хуже 10^{-8} рад за период наблюдения сутки и более.

При регистрации углового наклона поверхности Земли в ПЛИ в качестве реперной (сохраняющей горизонтальное положение) используется поверхность жидкости (рис. 2).

Лазерный луч, отражаясь от горизонтальной поверхности жидкости, отклоняется на двойной угол $\vartheta = 2\beta$ наклона β земной поверхности. Угловое положение лазерного луча измеряется квадрантным фотоприемником.

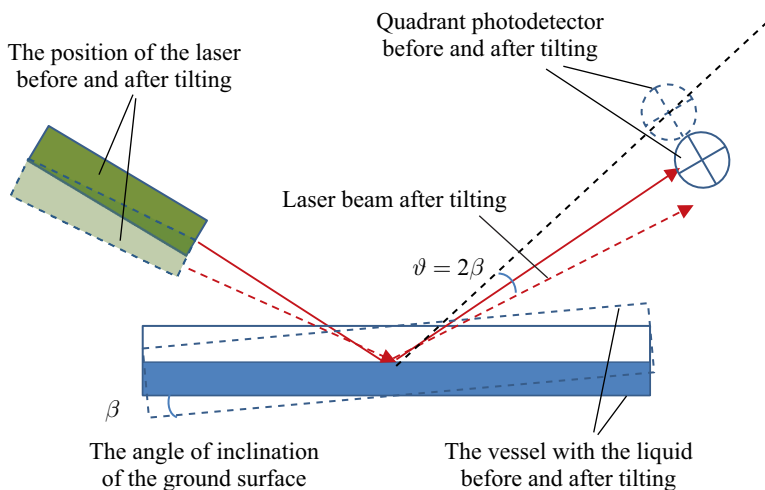


Рис. 2. Принцип работы прецизионного лазерного инклинометра

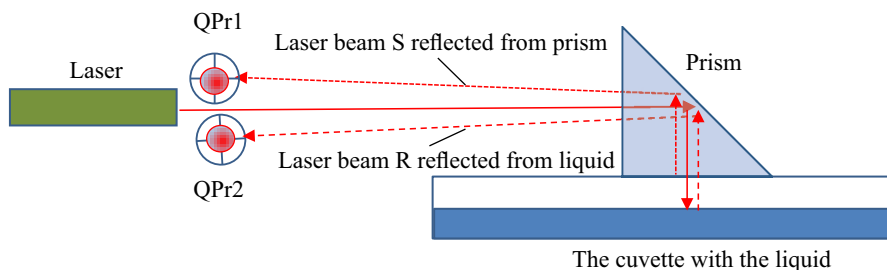


Рис. 3. Регистрация шума углового колебания лазерного луча в ПЛИ

В этих измерениях шум углового движения лазерного луча смешивается с сигналом наклона земной поверхности, что ограничивает чувствительность ПЛИ.

Для определения шума углового движения лазерного луча нами предложен новый способ его регистрации. На рис. 3 показана схема регистрации сигнала и шума PS в ПЛИ.

Для этого в ПЛИ используется дополнительный (реперный) лазерный луч R, отраженный от нижней грани поворотной призмы (Prism). Этот луч имеет примерно одинаковую с сигнальным лучом S траекторию распространения, и его положение регистрируется дополнительным квадрантным фотоприемником QPr2. Таким образом, QPr1 регистрирует наклон сигнального лазерного луча с шумом Pointing stability, а QPr2 регистрирует только шум Pointing stability реперного луча R. Используя примерно одинаковую геометрию расположения сигнального и реперного лучей, вычтем сигнал с квадрантного фотоприемника QPr1 из сигнала с QPr2. В результате мы получим сигнал наклона земной поверхности без шума Pointing stability.

Точность регистрации сигналов в QPr1 и QPr2 определяется из формулы (1). Используя фокусировку лазерного луча на квадрантный фотоприемник, можно уменьшить диаметр пятна лазерного луча до 100 мкм и увеличить точность измерения углового положения лазерного луча до $4 \cdot 10^{-9}$ рад.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На рис. 4 показана принципиальная схема действующего ПЛИ с возможностью регистрации шумового углового движения лазерного луча.

В экспериментах использовался одномодовый лазерный источник фирмы Thorlabs S1FC635 с выводом излучения через одномодовое волокно. Лазерный луч при помощи оптического волокна подавался в вакуумную камеру ПЛИ. С помощью коллиматора он расширялся до диаметра 1 см и фокусировался линзой на поверхность квадрантных фотоприемников QPr1 и QPr2 с пятном диаметром 100 мкм. Фокусное расстояние линзы 750 мм. При своем движении от коллиматора лазерный луч при помощи призмы направлялся на поверхность жидкости и отражался от нее. Также имелось дополнительное отражение луча от двух граней призмы. Отраженные лучи имели небольшое (0,01 рад) угловое расхождение и подавались на квадрантные фотоприемники QPr1 и QPr2. Луч, отраженный от дальней от поверхности жидкости грани призмы, не использовался и блокировался непрозрачным экраном.

Величина мощности в отраженных лучах S и R отличается в 1,12 раза. Сигнальный луч, отраженный от поверхности жидкости, имеет меньшую мощность, чем реперный луч, отраженный от грани призмы. Разница в мощности лучей компенсировалась плоскопараллельной пластинкой, установленной под необходимым углом на траектории движения лазерного луча, отраженного от призмы непосредственно перед квадрантным фотоприемником QPr2. Выравнивание мощностей сигналов S и R позволяет вычитать R из S без существенной систематической ошибки в разностном сигнале.

Сигналы с квадрантных фотоприемников подавались через электрический вакуумный разъем на регистрирующий 24-битный АЦП DT9824 и затем на компьютер.

Сигнальный луч юстировался на центр квадрантного фотоприемника QPr1 при помощи позиционеров инклинометра, расположенных на основании инклинометра вне ва-

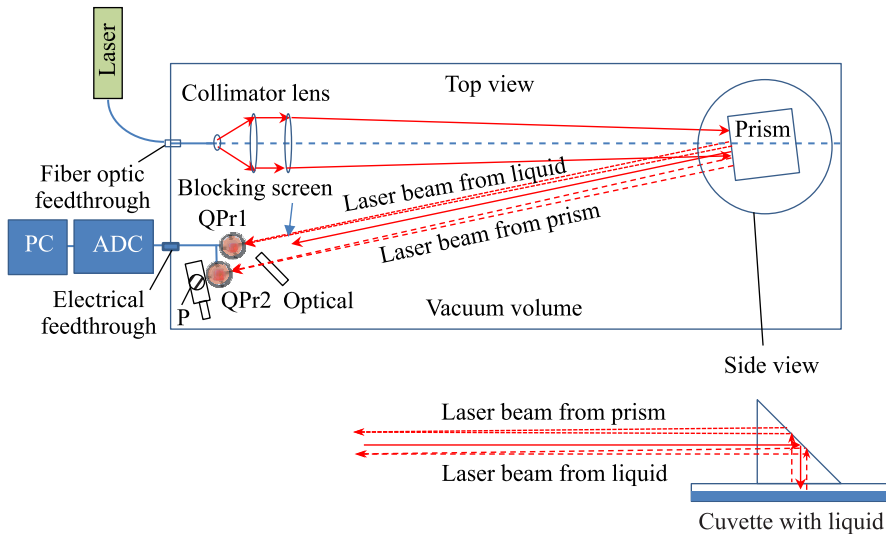


Рис. 4. Прецизионный лазерный инклинометр с возможностью компенсации шумового углового движения лазерного луча

кумного объема. Пятно реперного луча устанавливалось на центр квадрантного фотоприемника, позиционируемого при помощи двухкоординатного линейного позиционера Р.

В эксперименте длительность одного измерения была 0,1 с, продолжительность наблюдения — 6 ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 5 показаны угловые смещения пятна лазерного луча на сигнальном QPr1 и реперном QPr2 квадрантных фотоприемниках в одном направлении.

Как видно, наблюдается корреляция угловых смещений сигнального лазерного луча с угловыми смещениями референсного лазерного луча.

На рис. 6 показаны колебания земной поверхности, полученные при вычитании сигналов QPr1 из сигналов QPr2.

Как видно из рис. 6, угловой шум движения лазерного луча значительно подавлен в используемой процедуре. Данные, полученные после вычитания, далее умножались на калибровочный коэффициент $K = 336$ мкрад/В и анализировались в радианной мере.

На рис. 7 показан результат фурье-анализа данных по колебанию сигнального лазерного луча, отраженного от жидкости до и после вычитания шума углового движения лазерного луча.

Как видно из рис. 7, достигнуто значительное — до 30 раз — уменьшение шума углового движения лазерного луча в широком диапазоне частот $5 \cdot 10^{-5}$ – 10^{-1} Гц. Спектральные компоненты шума в частотном диапазоне $5 \cdot 10^{-5}$ – 10^{-4} Гц уменьшились до 10^{-8} рад/Гц^{1/2}.

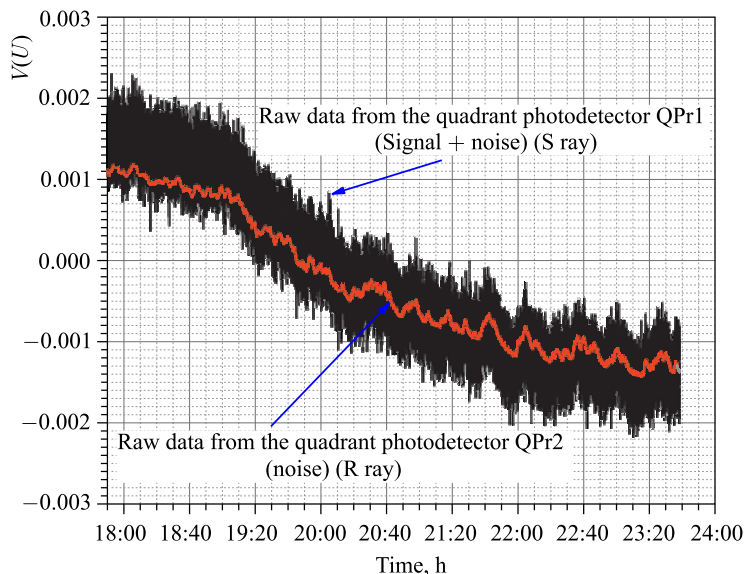


Рис. 5. Угловые смещения пятен лазерных лучей на квадрантных фотоприемниках QPr1, QPr2 (смещения производились в одном направлении)

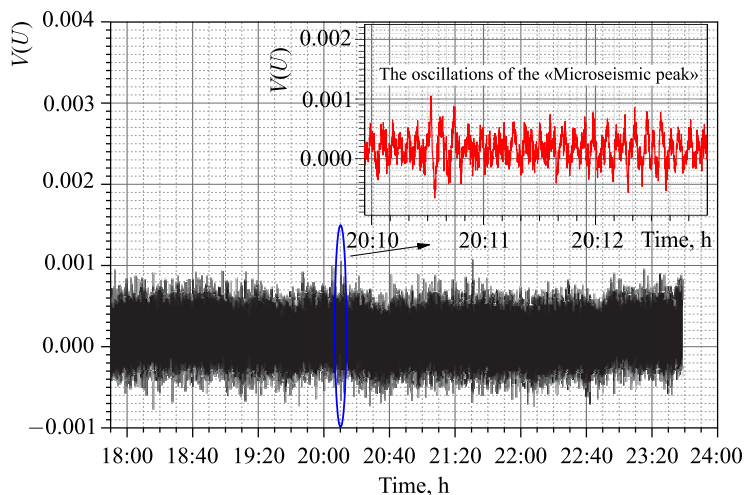


Рис. 6. Результат вычитания угловых колебаний реперного луча из таковых сигнального

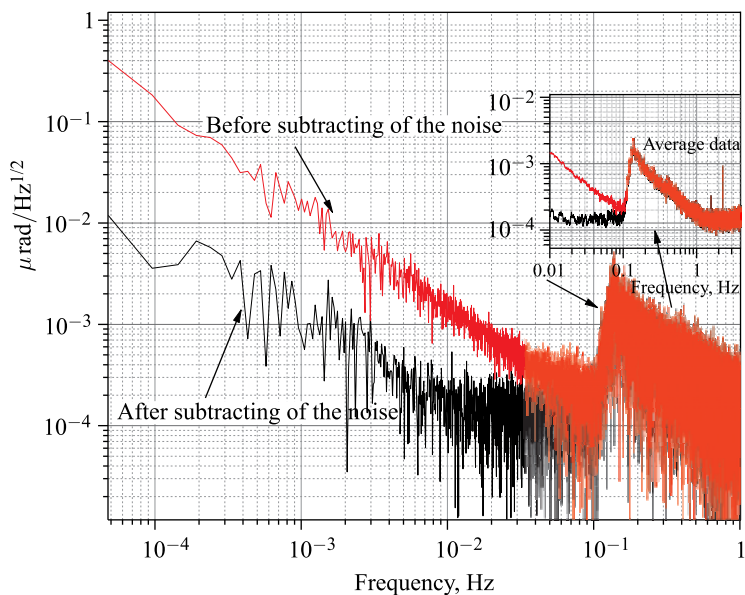


Рис. 7. Спектральная плотность угловых колебаний поверхности Земли для сигнального луча до и после вычитания реперного луча

ШУМОВОЕ УГЛОВОЕ ДВИЖЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА

В эксперименте квадрантным фотоприемником QPr2 измерялось движение пятна лазерного луча, отраженного от призмы. В силу высокой температурной стабильности бетонного пола 10^{-2} °C за сутки [21] линейные смещения лазерного луча из-за температурной нестабильности незначительны и не превышают 10^{-9} м. Существенно, что

использование вакуума практически исключило колебания лазерного луча из-за вариаций температуры воздушной среды. Следовательно, полученные нами данные (см. рис. 5)

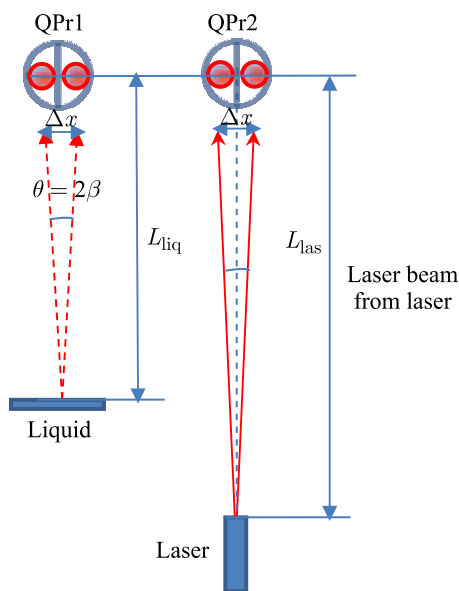


Рис. 8. Определение величины шумового углового движения лазерного луча по величине калиброванного углового наклона инклинометра

при условии равенства смещений Δx пятен лазерных лучей на QPr1 и QPr2 сигналы с фотоприемников будут равны: $\Delta U_{\text{las}} = \Delta U_{\text{liq}}$.

Следовательно, угол наклона лазерного луча ψ и угол наклона поверхности Земли β связаны соотношением

$$\psi = \beta \frac{2L_{\text{liq}}}{L_{\text{las}}}. \quad (3)$$

Используя (1), (2) и условие $\Delta U_{\text{las}} = \Delta U_{\text{liq}}$, определим зависимость калибровочного коэффициента лазерного луча $K_{\text{las}} = \psi \Delta U_{\text{las}}$ от калибровочного коэффициента инклинометра $K_{\text{inc}} = \beta \Delta U_{\text{liq}}$:

$$K_{\text{las}} = \frac{2L_{\text{liq}}}{L_{\text{las}}} K_{\text{inc}}. \quad (4)$$

Таким образом, при расстояниях $L_{\text{liq}} = 0,4$ м, $L_{\text{las}} = 0,75$ м

$$K_{\text{las}} = 1,07 K_{\text{inc}}. \quad (5)$$

Применяя соотношение (5), можно данные с QPr2 выразить в радианной мере и определить угловое шумовое движение лазерного луча, используя калибровочный коэффициент инклинометра.

по угловому движению реперного лазерного луча описывают именно угловое шумовое смещение лазерного луча.

Для калибровки измерений шумового углового движения лазерного луча мы должны сместить квадрантный фотоприемник, регистрирующий лазерный луч R, отраженный от призмы, на известное калибровочное расстояние Δx . Зная расстояние L_{las} от лазерного источника до квадрантного фотоприемника QPr2, определяем калибровочный угол $\psi = \Delta x / L_{\text{las}}$. Зарегистрированный при калибровочном смещении сигнал ΔU_{las} с QPr2 в вольтах соотносим с найденным калибровочным углом и из выражения

$$K_{\text{las}} = \frac{\psi}{\Delta U_{\text{las}}} = \frac{L_{\text{las}}}{\Delta x} \Delta U_{\text{las}} \quad (2)$$

определяем калибровочный коэффициент K_{las} .

Используя тот факт, что в квадрантных фотоприемниках QPr1 и QPr2 чувствительность одинакова и лазерные лучи сфокусированы на их поверхности, можно применить калибровку инклинометра для определения калибровочного коэффициента K_{las} . На рис. 8 схематично показано угловое движение лазерного луча, отраженного от поверхности жидкости, и луча от

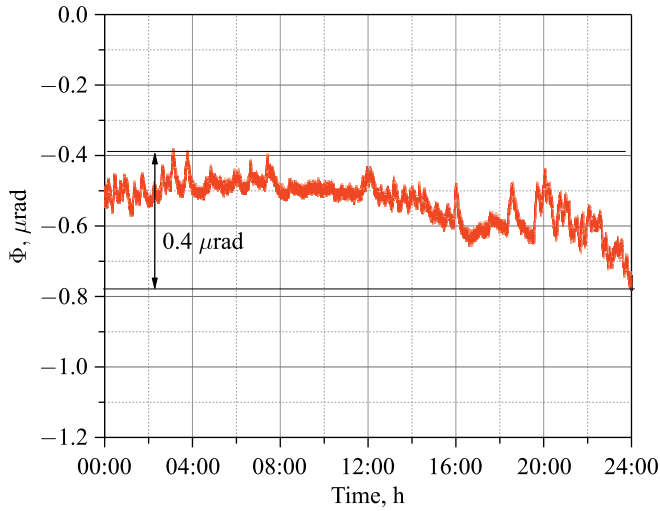


Рис. 9. Угловые шумовые движения лазерного луча в вертикальном направлении на поверхности квадрантного фотоприемника QPr2

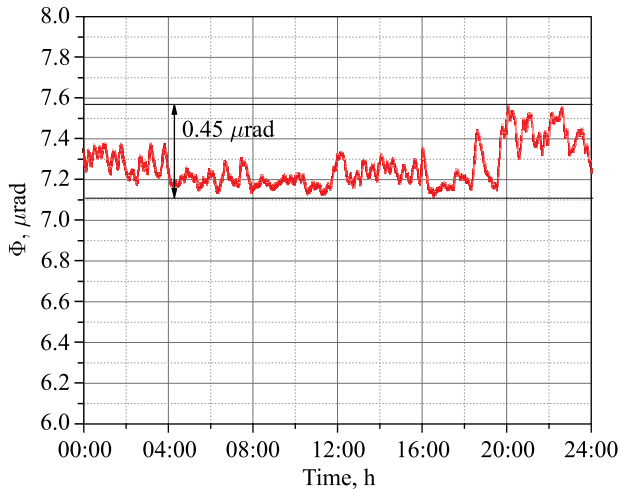


Рис. 10. Угловые шумовые движения лазерного луча в горизонтальном направлении на поверхности квадрантного фотоприемника QPr2

На рис. 9, 10 показаны шумовые угловые движения лазерного луча за период 24 ч в вертикальных и горизонтальных направлениях на поверхности квадрантного фотоприемника QPr2.

Диапазон изменения амплитуды угловых колебаний за сутки составил 0,4 мкрад в вертикальном и 0,33 мкрад в горизонтальном направлениях.

На рис. 11 и 12 представлен результат фурье-анализа данных на рис. 9 и 10.

Как видно из рис. 11 и 12, начиная с частоты 0,01 Гц и выше регистрируется шум угловых движений лазерного луча со спектральной плотностью 10^{-10} рад/Гц^{1/2} и менее.

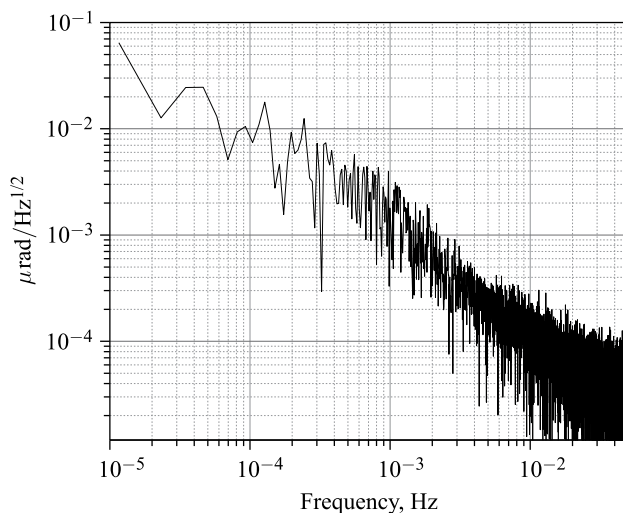


Рис. 11. Спектральная плотность шумовых угловых колебаний лазерного луча в вертикальном направлении

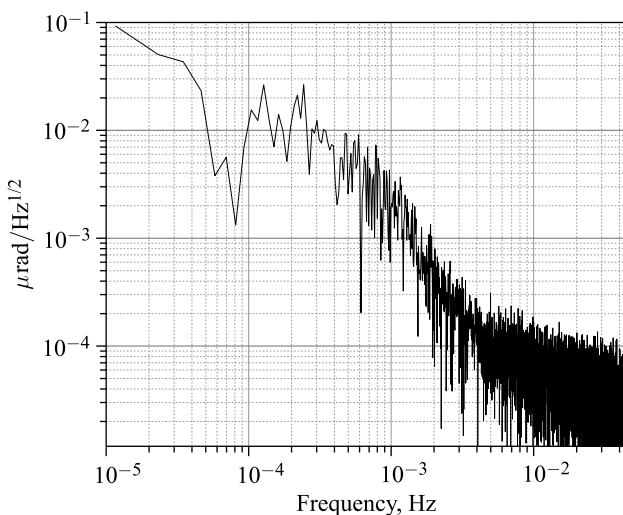


Рис. 12. Спектральная плотность шумовых угловых колебаний лазерного луча в горизонтальном направлении

Эта величина меньше минимальной спектральной плотности отфильтрованного сигнала (см. рис. 7). Таким образом, для частот выше 0,01 Гц не требуется учета шума углового движения лазерного луча.

ОБСУЖДЕНИЕ

Учет шумовых угловых колебаний лазерного луча расширил высокочувствительное применение ПЛИ в области низких частот. Это позволит наблюдать микросейсмические

явления в диапазоне частот 10^{-6} – 4 Гц с чувствительностью 10^{-8} рад и выше. Но вместе с тем для многих физических экспериментов наблюдаемые микросейсмические колебания являются шумом, не позволяющим достичь предельных по чувствительности параметров.

К такого рода установкам относятся крупномасштабные ускорители коллаидеры, интерферометрические детекторы гравитационных волн, большие оптические телескопы, технологические установки по производству микросхем и др.

Таким образом, компенсация влияния микросейсмических колебаний является актуальной задачей.

Практически, задача стабилизации положения крупномасштабных физических установок сводится к созданию исследовательской платформы, сейсмоизолированной от угловых колебаний поверхности Земли. Ее возможно создать, используя данные, получаемые с ПЛИ. При достигнутой калибровочной точности 0,5 % [22] вполне возможно уменьшить влияние колебаний микросейсмического пика до уровня 10^{-9} рад. На основе концепции сейсмоизолированной платформы в отношении коллаидеров можно стабилизировать угловое положение чувствительных элементов (ускорительных блоков фокусирующих устройств и др.) с указанной точностью. При достижении угловой стабилизации коллаидера ожидается увеличение светимости (станет возможным уменьшить диаметр фокусов частиц).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально в прецизионном лазерном инклинометре осуществлена компенсация шума углового движения лазерного луча в вакуумных и термостабильных условиях с использованием дополнительного реперного луча лазера.

Шум прецизионного лазерного инклинометра был понижен более чем в 30 раз до уровня 10^{-8} рад/Гц^{1/2} на частоте $5 \cdot 10^{-5}$ Гц. Компенсация существенна в области частот $5 \cdot 10^{-5}$ – $0,1$ Гц. Достигнутый уровень шумов позволит наблюдать такое микросейсмическое явление, как угловой наклон поверхности Земли Луной и Солнцем.

Экспериментально измерены параметры шума углового движения лазерного луча за сутки. Диапазон изменения амплитуды колебания в вертикальном направлении составил 0,4 мкрад и в горизонтальном 0,33 мкрад. Фурье-анализ шума показал, что учет шума существен от частот 10^{-5} Гц до 0,01 Гц. В высокочастотной области от 0,01 Гц и выше величина шума углового движения лазерного луча становится существенно меньше наблюдаемых микросейсмических колебаний поверхности Земли.

Благодарности. Авторы благодарят Г. В. Трубникова, Г. Д. Ширкова, В. А. Беднякова и В. В. Глаголева за неизменный интерес и поддержку исследований с ПЛИ.

Дубненская группа благодарит ВМВФ (Германия) за финансовую поддержку, обеспечивающую эксперименты с ПЛИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Batusov V. et al.* A Laser Sensor of a Seismic Slope of the Earth Surface // Phys. Part. Nucl. Lett. 2013. V. 10, No. 1. P. 43–48.
2. *Budagov J. et al.* The Search for and Registration of Superweak Angular Ground Motions. JINR Commun. E18-2013-107. Dubna, 2013.

3. Azaryan N. et al. The Precision Laser Inclinator Long-Term Sensitivity in Thermo-Stabilized Conditions. Presented by M. Lyablin at “CLIC Workshop 2015”, CERN, Jan. 26–30, 2015. JINR, E13-2015-35. Dubna, 2015.
4. Azaryan N. et al. The Precision Laser Inclinator Long-Term Measurement in Thermo-Stabilized Conditions (First Experimental Data) // Phys. Part. Nucl. Lett. 2015. V. 12, No. 4. P. 532–535.
5. Iwasińska-Kowalska O. A System for Precise Laser Beam Angular Steering // Meas. Syst. 2014. V. XXI, No. 1. P. 27–36.
6. Buske I. et al. A Real-Time Sub- μ rad Laser Beam Tracking System // Proc. of SPIE. 2007. V. 6738. 67380. P. 1–9.
7. Zhu Y. et al. A Piezoelectric Unimorph Actuator Based Tip-Tilt-Piston Micromirror with High Fill Factor and Small Tilt and Lateral Shift // Sensors and Actuators. 2011. V. A167. P. 495–501.
8. Yin Y. et al. Preparation and Characterization of Unimorph Actuators Based on Piezoelectric $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ Materials // Ibid. V. A171. P. 332–339.
9. Germann L., Braccio J. Fine-Steering Mirror Technology Supports 10 Nanoradian System // Opt. Engin. 1990. V. 29, No. 11. P. 1351–1359.
10. Rijneveld N. et al. A Tip/Tilt Mirror with Large Dynamic Range for the ESO VLT Four Laser Guide Star Facility // Proc. of SPIE. 2011. V. 8125. 812503. P. 1.
11. Qingkun Zhou et al. Goldenberg Design of Fast Steering Mirror Systems for Precision Laser Beams Steering // ROSE 2008 — IEEE Intern. Workshop on Robotic and Sensors Environments, Ottawa, Oct. 17–18, 2008.
12. Cochran R. W., Vassar R. H. Fast Steering Mirrors in Optical Control Systems // SPIE Proc. Advances in Optical Structure Systems. 1990. V. 1303.
13. <https://www.physikinstrumente.com/en/products/z-tip-tilt-platforms/piezo-platforms/s-325-piezo-z-tip-tilt-platform-300650/#c16797>
14. Damjanovic D. Hysteresis in Piezoelectric and Ferroelectric Materials // The Science of Hysteresis / Eds.: I. Mayergoyz and G. Bertotti. Elsevier, 2005. V. 3, Ch. 4.
15. Batusov V. et al. Photodetector Noise Limitations of the Laser Ray Space Localization Precision. JINR, E13-2008-90. Dubna, 2008.
16. Hedding R., Lewis R. A. Fast Steering Mirror Design and Performance for Stabilization and Single Axis Scanning // Proc. of SPIE. 2005. V. 1304. P. 14–24.
17. Patrick Kwee et al. Laser Beam Quality and Pointing Measurement with an Optical Resonator // Rev. Sci. Instr. 2007. V. 78. P. 073103.
18. Stern G. et al. Experiments of Laser Pointing Stability in Air and in Vacuum to Validate Micrometric Positioning Sensor // Proc. of IPAC 2014. Dresden, 2014. P. 1793–1795.
19. Gray J. Laser Pointing Stability Measured by an Oblique-Incidence Optical Transmittance Difference Technique // Rev. Sci. Instr. 2001. V. 72, No. 9.
20. Azaryan N. et al. Comparative Analysis of Earthquakes Data Recorded by the Innovative Precision Laser Inclinator Instruments and the Classic Hydrostatic Level System // Phys. Part. Nucl. Lett. 2017. V. 14, No. 3. P. 480–492.
21. Budagov J. et al. Air Temperature Stabilization in the Thermally Isolated Optical Laboratory // Phys. Part. Nucl. Lett. 2014. V. 11, No. 3. P. 469–475.
22. Azaryan N. et al. 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.