

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ УГЛОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ ПРЕЦИЗИОННЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИНКЛИНОМЕТРОМ

*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

Для прецизионного лазерного инклинометра (ПЛИ) с использованием масла И-20А определена высокочастотная граница 4 Гц надежного детектирования угловых колебаний поверхности Земли. Разработанная методика обработки микросейсмических сигналов расширила рабочий диапазон приема ПЛИ и позволила зарегистрировать узкополосные сигналы угловых колебаний поверхности Земли индустриального происхождения.

For the Precision Laser Inclinometer (PLI) using the I-20A oil, a high-frequency 4-Hz boundary was determined for reliable detection of the Earth surface angular vibrations. The proposed method makes use of the microseismic signal and its processing to expand the PLI working interval for signal reception and allows one to record the narrow frequency-band signals originated by the Earth surface angular oscillations caused by industrial sources.

PACS: 91.10.Nj; 07.60.-j

ВВЕДЕНИЕ

Для регистрации угловых колебаний поверхности Земли сейсмического происхождения предложен и разрабатывается метод прецизионного лазерного инклинометра (ПЛИ) [1–4]. Достигнутые результаты позволяют использовать его в качестве основы для стабилизации от микросейсмических явлений протяженных физических установок: ускорителей, коллайдеров, больших телескопов, гравитационных антенн и др.

ПЛИ регистрирует угол наклона поверхности. Зная скорость распространения поверхностных волн, можно определить из данных ПЛИ амплитуды вертикальных колебаний в измеряемой точке. Используя систему распределенных ПЛИ с известными координатами их расположения, возможно мониторировать изменение «ландшафта» местности во времени. Для решения этой задачи необходимо определить эффективность ПЛИ в зависимости от частоты регистрируемых угловых колебаний поверхности Земли.

При регистрации угловых колебаний поверхности Земли сейсмического происхождения наблюдается периодическая сейсмическая активность — так называемый микросейсмический пик [5–9]. Он расположен в частотном диапазоне 0,1–0,5 Гц и является одним из самых высокочастотных квазипериодических микросейсмических явлений. Более высокочастотные периодические угловые колебания поверхности Земли имеют, как правило, индустриальную природу (работа вакуумных насосов, движение транспорта и др.).

В статье определяются частотная зависимость эффективности регистрации и максимально возможная для регистрации прецизионным лазерным инклинометром частота угловых колебаний поверхности Земли.

МАКСИМАЛЬНО ВОЗМОЖНАЯ ЧАСТОТА РЕГИСТРАЦИИ УГЛОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ИНКЛИНОМЕТРОМ

В ПЛИ в качестве реперной поверхности используется поверхность жидкости. Особенность ПЛИ — слой жидкости тонкий. В тонком слое жидкости (длина волны поверхностного слоя волны значительно меньше толщины слоя) трение жидкости о дно сосуда уменьшает амплитуду поверхностных волн. Это качество значительно уменьшает амплитуду «паразитных волн», отраженных от стенок сосуда, в котором находится жидкость.

Теоретическая скорость поверхностных волн в тонком слое жидкости есть $V = \sqrt{gd}$, где g — ускорение падения в поле Земли; d — толщина слоя жидкости [10]. Причем теоретически эта скорость не зависит от частоты. Для слоя жидкости 4 мм получаем оценку скорости 19 см/с. При диаметре сосуда 5 см следует ожидать ограничения (несколько Гц) на регистрацию максимальной частоты из-за появления интерференции с отраженной волной.

Добавим также, что при наклоне сосуда с тонким слоем жидкости может и не возникать поверхностных волн и процесс образования новой горизонтальной поверхности состоит в основном в стекании жидкости по дну сосуда. В этом случае, выбрав жидкость с минимальной кинематической вязкостью [11], необходимо экспериментально определить время «восстановления горизонта» поверхностью жидкости.

ЭКСПЕРИМЕНТ

В экспериментах использовался вакуумный вариант ПЛИ (рис. 1).

Чувствительный элемент — кювета с жидкостью — располагался в вакуумном объеме. В качестве жидкости использовалось масло, имеющее минимальное испарение в вакууме. Тип масла выбирался также с условием минимальной динамической вязкости. В эксперименте использовалось масло И-20А с кинематической вязкостью 30 мм²/с при 40 °С. Для сравнения, кинематическая вязкость воды при той же температуре составляет 0,6 мм²/с [12,13].

Для исследования процесса «горизонтализации» поверхности жидкости основание быстро наклонялось пьезоэлектрическим элементом (Piezo staker (PS)), используемым при калибровке ПЛИ [9]. На PS подавалось напряжение 50 В, и за время механической деформации пьезоэлектрического элемента (10^{-3} с) [14] основание ПЛИ наклонялось на 8,4 мкрад, ось вращения проходила через центры шаровых опор. Этот наклон измерялся

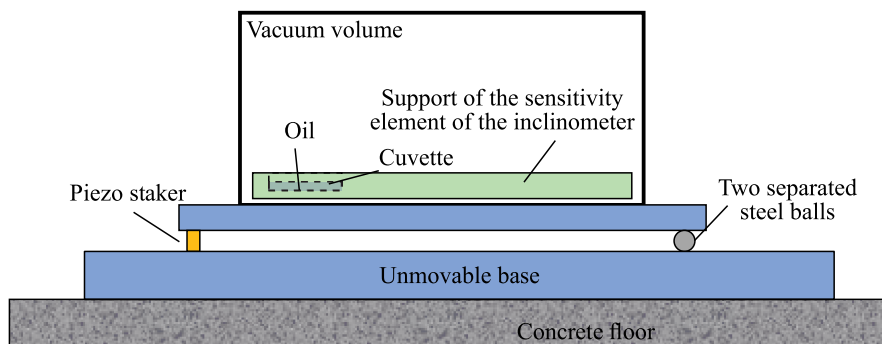


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по определению высокочастотной границы диапазона чувствительности ПЛИ

инклинометром. Стальные шарики и PS крепились на неподвижном основании, которое в свою очередь закреплялось на бетонном полу транспортного тоннеля № 1 (ТТ1) (ЦЕРН).

Поскольку время реакции PS на поданное напряжение заведомо меньше времени реакции выравнивания горизонтальной поверхности, то при продолжительности измерения 0,04–0,01 с можно экспериментально определить зависимость процесса «горизонтализации» поверхности жидкости от времени.

На рис. 2 представлен сигнал с прецизионного лазерного инклинометра в зависимости от времени при быстром ($\cong 10^{-3}$ с) наклоне его основания на угол $D = 8,4$ мкрад. Длительность одного измерения 0,04 с.

Из рис. 2 видно, что отклик инклинометра на наклон его основания имеет несколько фаз:

- 1) инерционное движение жидкости в направлении наклона в течение 0,08 с (между точками 1 и 2);
- 2) восстановление «горизонтальности» поверхности жидкости: «быстрая» часть, 0,24 с, между точками 2 и 3 и «медленная» часть, 20 с, между точками 3 и 4.

Видно, что быстрая часть процесса установления горизонтального положения жидкости составляет 77%¹ от длительности полного наклона D , достигаемого в медленной части (3–4). Будем считать это время 0,25 с минимальным (dead time), по истечении которого возможна регистрация инклинометром следующего наклона.

Этот вывод справедлив для масла И-20А. Граничная частота определяется из продолжительности быстрой части в реакции ПЛИ на быстрый наклон и составляет ≈ 4 Гц.

Медленная часть обусловлена наличием мениска, возникающего при контакте масла со стенкой сосуда. При резком наклоне основания прежде всего происходит движение центральной части жидкости и затем стекание части жидкости из зоны мениска.

Следует отметить отсутствие сигнала отраженной волны в точке 3. Это говорит о доминировании процесса стекания жидкости над поверхностными волновыми движениями. Это — достоинство инклинометра (регистрация наклона основания в диапазоне частот от 4 Гц и меньше), и оно является весьма значительным преимуществом по сравнению

¹Расстояние между точками 2 и 3, деленное на D .

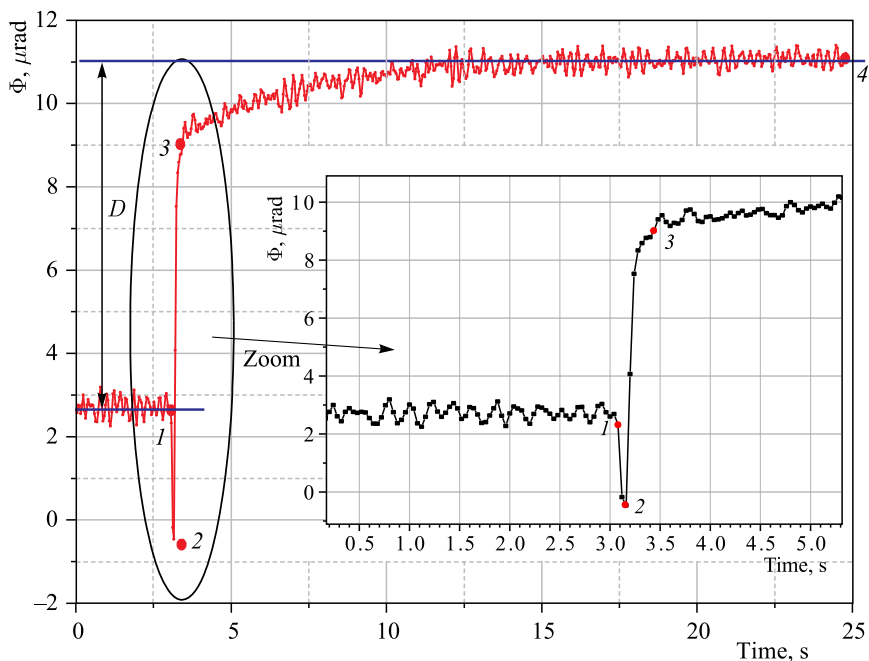


Рис. 2. Реакция ПЛИ на быстрый (10^{-3} с) наклон основания

с классическими инерциальными сейсмографами, поскольку регистрируемые колебания не искажаются резонансными явлениями.

Вполне очевидно, что все колебания, продолжительность которых меньше продолжительности окончательного выравнивания горизонта поверхности жидкости, будут регистрироваться с уменьшенной амплитудой. Поэтому необходимо определить поправочный коэффициент для восстановления действительной амплитуды колебаний поверхности Земли.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПРАВОЧНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПРИ РЕГИСТРАЦИИ КОЛЕБАНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПЛИ В ДИАПАЗОНЕ 0,07–8 Гц

Обратим внимание, что в «медленной части» (между точками 3 и 4, рис. 2) наряду с процессом восстановления горизонтального положения жидкости наблюдаются периодические сигналы индустриального происхождения.

Как видно из рис. 2, 3, частотные компоненты с периодами от 0,24 до 20 с (частотный интервал 0,05–4 Гц) регистрируются с меньшей эффективностью, чем после 20 с.

Вычислим величину поправочного коэффициента для определения действительной амплитуды угловых колебаний.

Для этого определим (рис. 3) расстояние между горизонтальной линией, соответствующей установившемуся горизонтальному уровню поверхности жидкости, и точками из-

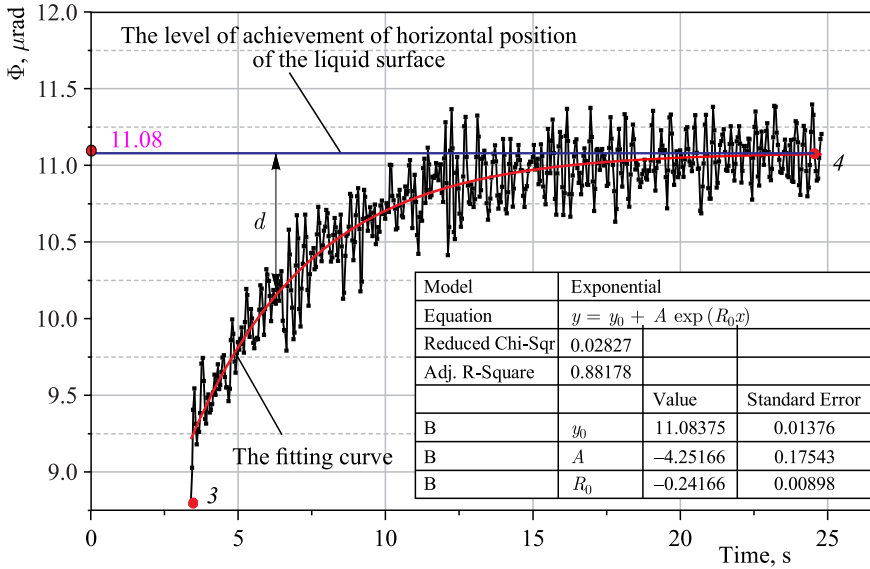


Рис. 3. Аппроксимация медленной части рис. 2 экспоненциальной зависимостью $\Phi(t) = a + b e^{ct}$

мерения углов Φ . Сигнал 3–4 аппроксимирован функцией $\Phi(t) = a + b e^{ct}$, что дает

$$\Phi = 11,08 - 4,252 \exp(-0,242t). \tag{1}$$

Из формулы (1) определим расстояния $d(t)$ между аппроксимированной кривой и горизонтальной линией в зависимости от времени измерения (см. рис. 3):

$$d = 4,252 \exp(-0,242t). \tag{2}$$

Зная расстояние $D = 8,4$ мкрад между горизонтальными линиями на рис. 2, соответствующими положениям ПЛИ до и после наклона, определим отношение $K(t) = d(t)/D$ в зависимости от времени. Безразмерный параметр $K(t)$ определяет «горизонтализацию» поверхности жидкости во времени:

$$K(t) = \frac{d(t)}{D} = 0,062 \exp(-0,242t). \tag{3}$$

Длительность регистрации сигналов от точки 3 до 4 соответствует частотной компоненте сигнала как $t = 1/f$. Так, например, при времени наблюдения 20 с происходит полное выравнивание горизонта поверхности жидкости; следовательно, для частоты углового колебания $1/20$ Гц и ниже не будет наблюдаться уменьшения действительной амплитуды этого колебания.

Поэтому

$$K(f) = 0,5062 \exp\left(-0,242 \frac{1}{f}\right). \tag{4}$$

На рис. 4 показана зависимость $K(f)$ от частоты f в диапазоне 0,05–4 Гц.

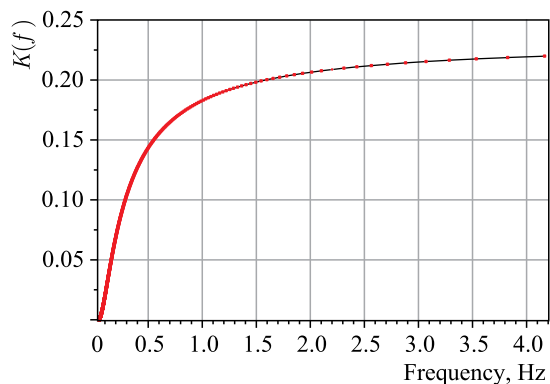


Рис. 4. Зависимость поправочного коэффициента $K(f)$ от частоты регистрации сигнала f в диапазоне 0,05–4 Гц

По сути, поправочный коэффициент $K(f)$ (4) определяет величину относительной добавки, которую необходимо прибавить к величине зарегистрированного углового наклона на медленной части (3–4) реакции инклинометра на быстрый наклон. Например, при регистрации синусоидального сигнала A_{mes} на частоте 1 Гц с амплитудой, скорректированной при помощи коэффициента K , величина действительной амплитуды A_{cor} есть

$$A_{\text{cor}}(1 \text{ Гц}) = A_{\text{mes}}(1 \text{ Гц})(1 + K(1 \text{ Гц})) = A_{\text{mes}}(f) \cdot 1,18. \quad (5)$$

Зависимость (4) необходимо использовать как поправочный коэффициент при фурье-анализе амплитудных спектров.

Скорректированный частотный спектр фурье-анализа регистрируемых амплитуд определяется по формуле

$$\Phi_{\text{cor}}(f) = \Phi_{\text{mes}}(f)(1 + K(f)). \quad (6)$$

Формула (4) для поправочного коэффициента получена для масла И-20А при температуре 16,2 °С, в вакуумных условиях, при диаметре сосуда 50 мм и глубине слоя масла 4 мм. При изменении этих условий необходимы уточняющие измерения.

ИЗМЕРЕНИЕ НАКЛОНА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, ОБУСЛОВЛЕННОГО ИСТОЧНИКАМИ ИНДУСТРИАЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Для экспериментального определения максимально достижимой частоты регистрации были измерены угловые наклоны поверхности Земли рядом с работающим вакуумным насосом. Эксперимент проводился в транспортном тоннеле № 1 (ТТ1) (ЦЕРН) в течение суток. Работающий вакуумный насос располагался в 3 м от ПЛИ (рис. 5). К тому же в рабочее время в непосредственной близости к ТТ1 действовало вибрационное оборудование (индустриальный шум в широкой полосе частот). Азимут ТТ1 соответствовал 18°. Измерения производились в направлении, перпендикулярном оси ТТ1 с азимутом 108° относительно направления на север. Длительность одного измерения ПЛИ была 0,04 с. На рис. 6 показана сейсмограмма колебаний поверхности Земли. На рис. 7 дана часть

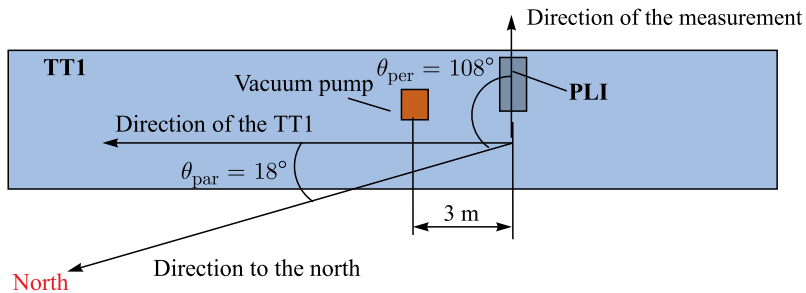


Рис. 5. Расположение ПЛИ во время измерений в ТТ1

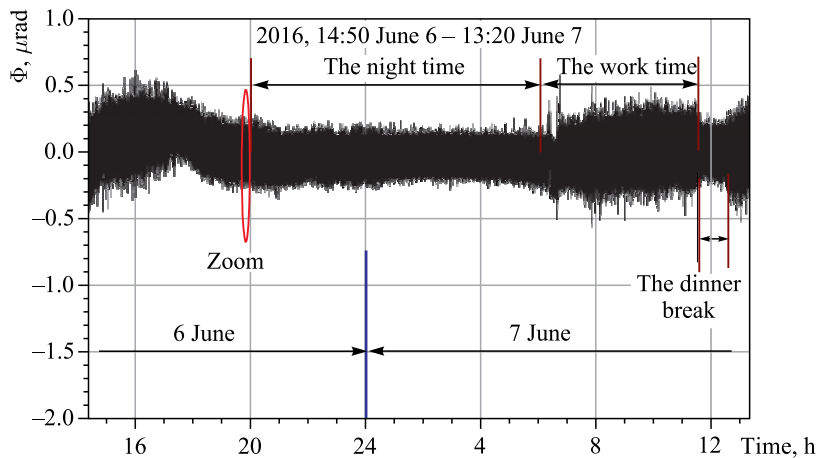


Рис. 6. Сейсмограмма промышленных шумов, зарегистрированных ПЛИ в течение суток

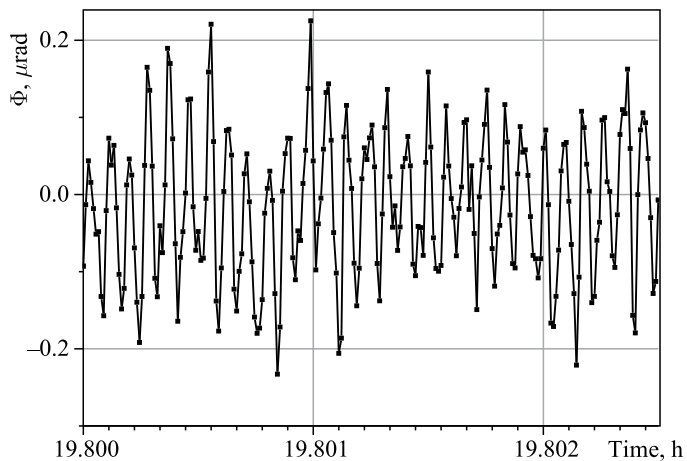


Рис. 7. Зарегистрированные синусоподобные сигналы промышленного происхождения за время 7 с (на основании графика рис. 6)

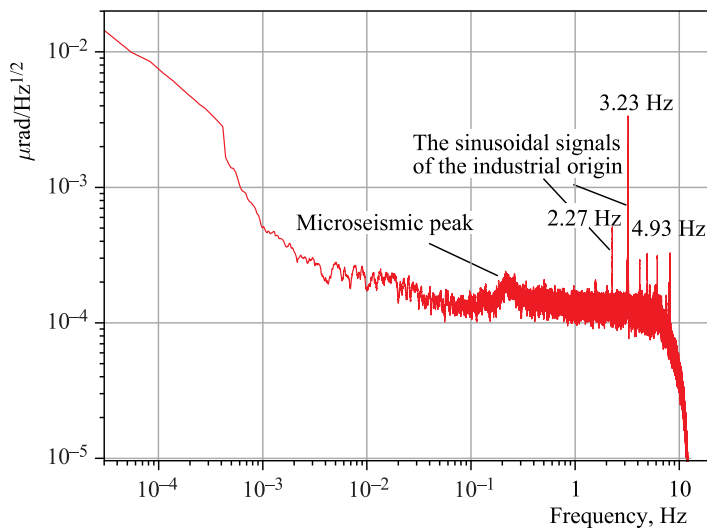


Рис. 8. Спектральная плотность колебаний (рис. 6), зарегистрированных в ночное время

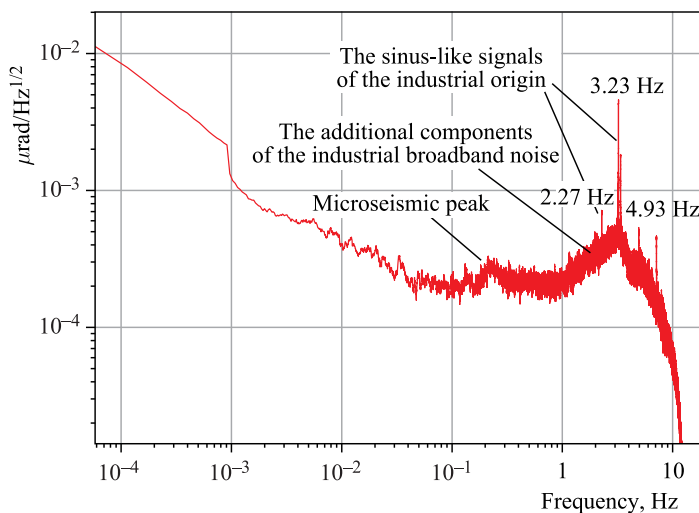


Рис. 9. Спектральная плотность колебаний (рис. 6), зарегистрированных в дневное время

предыдущей сейсмограммы за короткий (7 с) период, фрагмент данных (Zoom), представленных на рис. 6. На рис. 8 и 9 представлен фурье-анализ (спектральный состав) зарегистрированных в ночное и рабочее время колебаний (рис. 6).

Как видно из рис. 7, наблюдаются синусоподобные сигналы на различных частотах, что подтверждается фурье-анализом колебаний данных на рис. 8, 9. Доминирующая частота угловых колебаний поверхности Земли от вакуумного насоса составляет 3,23 Гц, также наблюдаются частоты 2,27 и 4,93 Гц.

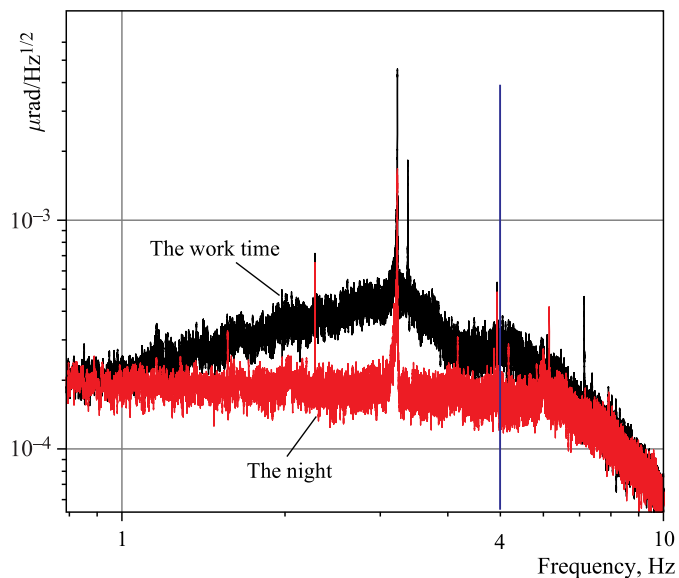


Рис. 10. Спектральная плотность промышленных шумов в области частот 1–10 Гц

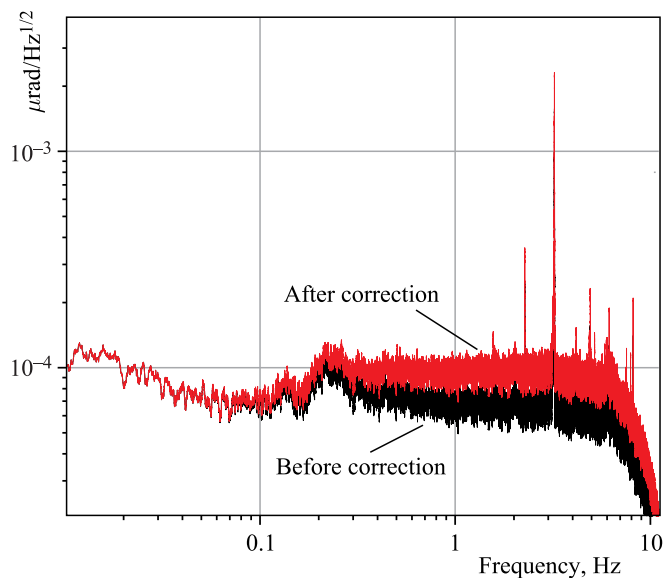


Рис. 11. Спектральная плотность угловых колебаний поверхности Земли, зарегистрированных ПЛИ в ночной период

Начиная с частоты 4 Гц (рис. 10), наблюдается резкое снижение спектральной плотности фурье-компонент угловых колебаний поверхности Земли, которое определяется приведенной выше границей высокочастотного детектирования ПЛИ.

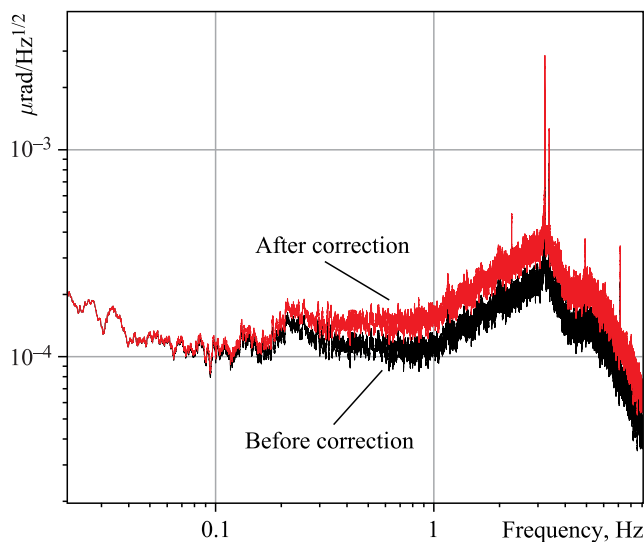


Рис. 12. Спектральная плотность угловых колебаний поверхности Земли, зарегистрированных ПЛИ в рабочее время

ФУРЬЕ-АНАЛИЗ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КОМПОНЕНТ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ С УЧЕТОМ ПОПРАВОЧНОГО КОЭФФИЦИЕНТА

Используя формулу (5), скорректируем данные фурье-анализа результатов, зарегистрированных в ночное и рабочее время.

На рис. 11, 12 показан фурье-анализ скорректированных и первичных данных, зарегистрированных ПЛИ в ночное и рабочее время.

Как видно из рис. 11, 12, корректировка позволила определить фактические интенсивности высокочастотных компонент в спектральном составе фурье-данных (см. рис. 6). Это подтверждает применимость ПЛИ для регистрации высокочастотных колебаний поверхности Земли в том числе и промышленного происхождения.

ОБСУЖДЕНИЕ

Относительно продолжительное выравнивание горизонта поверхности жидкости (10–20 с) показывает, что применение ПЛИ для высокоточной угловой стабилизации измерительной платформы в частотном диапазоне 0,05–4 Гц требует использования поправочного коэффициента. Предложенная методика (поправочного коэффициента) позволила получить фактическую интенсивность в спектральном составе при фурье-анализе. Восстановление фурье-компонент вышеизложенной методикой дает удовлетворительную точность.

Регистрируемый угловой сейсмический сигнал содержит разные частоты, и в этом случае корректировать наблюдаемый сигнал затруднительно. При помощи частотного фильтра можно было бы вырезать отдельные частотные составляющие, умножить их на

соответствующий поправочный коэффициент и затем восстановить действительную амплитуду приходящего сигнала. Подобная методика требует дополнительной проработки.

В качестве иллюстрации рассмотрим коррекцию амплитуды микросейсмического сигнала типа «микросейсмический пик», детектируемого онлайн. Частотный диапазон «микросейсмического пика» составляет 0,1–0,5 Гц. Из формул (4), (5) определим скорректированную амплитуду регистрируемых угловых колебаний на крайних частотах «микросейсмического пика» 0,1 и 0,5 Гц:

$$A_{\text{cor}}(0,1 \text{ Гц}) = A_{\text{mes}}(0,1 \text{ Гц})(1 + K(0,1 \text{ Гц})) = A_{\text{mes}}(0,1 \text{ Гц}) \cdot 1,02;$$

$$A_{\text{cor}}(0,5 \text{ Гц}) = A_{\text{mes}}(0,5 \text{ Гц})(1 + K(0,5 \text{ Гц})) = A_{\text{mes}}(0,5 \text{ Гц}) \cdot 1,14.$$

Для уменьшения ошибки в величине корректирующего коэффициента $1 + K$ при определении амплитуды регистрируемых угловых колебаний во всем частотном диапазоне «микросейсмического пика» используем средний корректирующий коэффициент $\overline{1 + K} = 1,08$. Разница в корректирующих коэффициентах на «крайних» (0,1; 0,5 Гц) частотах «микросейсмического пика» относительно средней величины составляет $\Delta = \overline{1 + K} - (1 + K(0,1 \text{ Гц})) = 1 + K(0,5 \text{ Гц}) - \overline{1 + K} = 0,06$. Соответственно, относительная ошибка в величине среднего значения корректирующего коэффициента $\frac{\Delta}{\overline{1 + K}} = 0,055$ для всего диапазона частот «микросейсмического пика» определит точность восстановления действительной амплитуды регистрируемых угловых колебаний «микросейсмического пика» в 5,5 %. Таким образом, для онлайн-корректируемых систем (сейсмоизолированная платформа) возможно снижение амплитуды угловых колебаний «микросейсмического пика» в 18 раз.

Второй способ увеличения точности — это использование масел с более низкой кинематической вязкостью. Например, масло И-5А имеет вязкость в 4–5 раз ниже, чем используемое масло И-20А. Это позволит уменьшить время восстановления горизонтальной поверхности и, соответственно, уменьшит поправочный коэффициент в области частот «микросейсмического пика». В итоге, как ожидается, это увеличит точность восстановления амплитуды микросейсмических колебаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для определения верхней границы частотного диапазона регистрации угловых колебаний поверхности Земли прецизионным лазерным инклинометром проведен эксперимент с быстрым ($\approx 10^{-3}$ с) наклоном основания инклинометра. В эксперименте использовалось индустриальное масло И-20А при температуре 16,2 °С, в вакуумных условиях, при диаметре сосуда 50 мм и глубине слоя масла 4 мм. Определена верхняя граница 4 Гц частотного диапазона регистрации угловых колебаний поверхности Земли.

Экспериментально доказано отсутствие отраженной волны на поверхности жидкости в ПЛИ при быстром наклоне основания, что говорит об отсутствии резонансных явлений в работе прибора.

Зарегистрированы узкополосные сигналы углового колебания поверхности Земли от работающего вакуумного насоса и широкополосный индустриальный шум в ночное и рабочее время.

Обнаружено явление постепенного восстановления горизонтальности поверхности, связанное со стеканием масла из зоны мениска на стенке сосуда.

Создана методика определения поправочного коэффициента для фурье-спектра регистрируемых колебаний и восстановлен первоначальный фурье-спектр регистрируемых промышленных шумов.

Определена точность (5,5 %) онлайн-восстановления амплитуды микросейсмического пика при использовании масла И-20А. Для повышения точности предложено использование масел И-5А с более низким коэффициентом кинематической вязкости.

Благодарности. Авторы благодарят С. Н. Студенова за высококачественное изготовление важных узлов вакуумированного прецизионного лазерного инклинометра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Batusov V. et al.* Recent Advances and Perspectives of the High Precision Laser Metrology. Presented at the Workshop "CLIC 2014", CERN, Geneva, Feb. 3–7, 2014.
2. *Batusov V. et al.* Recent Advances and Perspectives of the High Precision Laser Metrology. JINR, E13-2014-21. Dubna, 2014.
3. *Batusov V. et al.* The Sensitivity Limitation by the Recording ADC to Laser Fiducial Line and Precision Laser Inclinator // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2015. V. 12, No. 7. P. 813–818.
4. *Azaryan N. et al.* The Precision Laser Inclinator Long-Term Measurement in Thermo-Stabilized Conditions (First Experimental Data) // *Ibid.* No. 4. P. 532–535.
5. *Batusov V. et al.* The Calibration of the Precision Laser Inclinator // *Ibid.* No. 7. P. 819–823.
6. *Oliver J.* A Worldwide Storm of Microseisms with Periods of about 27 Seconds // *Bull. Seism. Soc. Am.* 1962. V. 52. P. 507–517.
7. *Oliver J., Page R.* Concurrent Storms of Long and Ultra-Long Period Microseisms // *Bull. Seism. Soc. Am.* 1963. V. 53. P. 15–26.
8. *Hasselmann K.* A Statistical Analysis of the Generation of Microseisms // *Rev. Geophys. Space Phys.* 1963. V. 1. P. 177–210.
9. *Haubrich R. A., McCamy K.* Microseisms: Coastal and Pelagic Sources // *Rev. Geophys. Space Phys.* 1969. V. 7. P. 539–571.
10. *Darbyshire J., Okeke E. O.* A Study of Primary and Secondary Microseisms Recorded in Anglesey // *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.* 1969. V. 17. P. 63–92.
11. Guide to Wave Analysis and Forecasting. 2nd Ed. Geneva: World Meteorol. Organization, 1998.
12. *Streeter V. L., Wylie E. B., Bedford K. W.* Fluid Mechanics // Sources of Primary and Secondary Microseisms. Cessaro: McGraw-Hill, 1998; *Bull. Seism. Soc. Am.* 1994. V. 84, No. 1. P. 142–148.
13. http://tavot-spb.ru/industrialnye_masla
14. *Putilov K.* Physics Course. V. I. Mechanics. Acoustics. Molecular Physics. Thermodynamics. M.: Fizmatlit, 1963.
15. *Uchino K.* Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors. Kluwer Acad. Publ., MA, 1996.

Получено 30 июня 2017 г.