

Разработка и исследование системы контроля состояния приборов лазерно-интерференционного геофизического комплекса

Вячеслав Александрович Шве́ц^{1✉}, Григорий Иванович Долгих²,
Александр Александрович Плотников³, Сергей Владимирович Яковенко⁴

^{1, 2, 3, 4} Тихоокеанский Океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН, Владивосток, Россия

¹vshv@rambler.ru ✉, <http://orcid.org/0000-0002-4752-6865>

²dolgikh@poi.dvo.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2806-3834>

³lotos@poi.dvo.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9970-5411>

⁴ser_mail@poi.dvo.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3784-9449>

Аннотация. Приведены результаты разработки, создания и применения системы контроля длиннотазовых лазерных деформографов, предназначенных для изучения геодинамических процессов в широком диапазоне частот. В систему контроля включены: длиннотазовый лазерный деформограф с использованием пробных квадратурных сигналов, созданный на основе неравноплечего интерферометра Майкельсона; регистрирующая аппаратура; устройство сборки и хранения данных. Описан геофизический лазерно-интерференционный комплекс, представляющий собой основу для построения межрегиональных пространственно-разнесённых измерительных систем. Показана эффективность лазерно-интерференционных измерителей на основе интерферометра Майкельсона для учёта влияния внешних факторов при проведении геофизических измерений с использованием лазерных деформографов. Описана регистрирующая система деформографа на основе интерферометра Майкельсона, которая позволяет получать высокую чувствительность и регистрировать колебания высокой частоты (до 2 кГц). Отмечены преимущества применения данной системы контроля перед предыдущими вариантами: оптическая схема предложенного интерферометра содержит меньше деталей, а регистрирующая система надежнее и имеет меньшее энергопотребление.

Ключевые слова: лазер, интерферометр, лазерный деформограф, регистратор, измерительный комплекс, длиннотазовый лазерный деформограф

Для цитирования: Шве́ц В. А., Долгих Г. И., Плотников А. А., Яковенко С. В. Разработка и исследование системы контроля состояния приборов лазерно-интерференционного геофизического комплекса // Измерительная техника. 2021. № 3. С. 22–28. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-3-22-28>

Development and research of a system for monitoring the state of instruments of a laser-interference geophysical complex

Viacheslav A. Shvets^{1✉}, Grigory I. Dolgikh², Aleksandr A. Plotnikov³, Sergey V. Yakovenko⁴

^{1, 2, 3, 4} V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

¹vshv@rambler.ru ✉, <http://orcid.org/0000-0002-4752-6865>

²dolgikh@poi.dvo.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2806-3834>

³lotos@poi.dvo.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9970-5411>

⁴ser_mail@poi.dvo.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3784-9449>

Abstract. This article gives an overview of results achieved in process of design, developing and using of data acquisition and control systems for LSM (long-base strainmeters) and other devices based on Michelson laser interferometer. Such control systems are also used in other types of laser-interference instruments that provide the study of geodynamic processes in a broad frequency range. It's shown that the effective means for control of external factors in geophysical measurements using LSMs are the same-type laser-interference instruments. The geophysical laser-interference complex is described in this paper as the basis for the construction of interregional space-separated measuring systems. The efficiency of laser-interference meters based on the Michelson interferometer is shown for taking into account the influence of external factors during geophysical measurements using laser strainmeters. A recording system of a strainmeter based on a Michelson interferometer is described, which makes it possible to obtain high sensitivity and record high-frequency oscillations (up to 2 kHz). The advantages of using this control system over the previous versions are noted: the optical scheme of the proposed interferometer contains fewer parts, and the recording system is more reliable and has less power consumption.

Keywords: laser, interferometer, laser strainmeter, recording systems, measuring complex, long base strainmeter (LSM)

Введение. Длиннобазовые лазерные деформографы используются для изучения природных процессов в литосфере. Несмотря на сложность конструкции, данные измерители отличаются широким динамическим диапазоном. Их порог чувствительности при измерении относительных изменений длины измерительного плеча на несколько порядков выше, чем у других деформографов. Основой данных измерителей является несимметричный (неравноплечий) интерферометр Майкельсона, либо его комбинация с интерферометром Фабри-Перо. Помимо геофизических исследований комбинированные интерферометры в настоящее время используются в гравитационных телескопах (антеннах), таких как LIGO (США), Virgo (Италия), KAGRA (Япония) [1, 2] и др. Предназначенные для геофизических исследований длиннобазовые деформографы применяются в пространственно-разнесённых комплексах для построения сетевых измерительных систем.

Ввиду высокой чувствительности длиннобазовых деформографов, неизбежно решается задача либо отделения полезного сигнала от шума путем учёта влияния внешних факторов, либо эффективного шумоподавления. Подавление шумов в длиннобазовых деформографах горизонтального типа и гравитационных антеннах в основном осуществляется с помощью сейсмических демпферов. Общей рекомендацией для всех типов деформографов является их размещение по возможности глубоко под землёй или в глубине горных массивов, например в бывших шахтах. Тем не менее эти приборы часто размещаются на земной поверхности. И в этом случае в состав оборудования деформографа для последующего учёта влияния шумов обязательно включаются группы различных датчиков температуры и атмосферного давления, а также геофонов; наклономеров; сейсмографов и др. Подобные группы датчиков практически всегда присутствуют и в подземных установках [3, 4].

Помимо перечисленного, для мониторинга и контроля длиннобазового деформографа в качестве своеобразного датчика часто применяется другой длиннобазовый деформограф, сопоставимый с первым по размерам. В зависимости от решаемых задач характеристики второго деформографа могут быть идентичны характеристикам обслуживаемого деформографа или он может быть менее точным и чувствительным.

Например, деформограф, фиксирующий сейсмические возмущения в измерительном плече гравитационного телескопа, идентичен телескопу по характеристикам и служит звеном обратной связи [5]. В поверхностных деформографах на концах измерительных плеч устанавливаются дополнительные интерферометры Майкельсона, предназначенные для учёта вертикального дрейфа земной поверхности, вызываемого изменениями температуры и влажности почвы. Такие дополнительные интерферометры конструктивно заметно проще, с меньшей длиной измерительного плеча [6].

В настоящей работе рассматриваются конструкция и принцип работы системы контроля на базе лазерного интерферометра Майкельсона. Такая система предназначена для мониторинга и контроля работы длиннобазовых лазерных деформографов, входящих в состав лазерно-интерференционного

геофизического измерительного комплекса. Под системой контроля понимается совокупность неравноплечего интерферометра Майкельсона с частотно-стабилизированным лазером в качестве источника света, регистрирующая аппаратура (фотоприёмники, усилители и пр.) и устройство сборки и хранения данных.

Геофизический лазерно-интерференционный измерительный комплекс. Геофизический лазерно-интерференционный измерительный комплекс, созданный в Тихоокеанском океанологическом институте (ТОИ ДВО РАН), расположен на морской экспериментальной станции «м. Шульца». Этот сложный программно-аппаратный комплекс предназначен для изучения амплитудных и фазовых вариаций колебаний и волн гидросферы, вариаций деформаций земной коры, вариаций атмосферного давления и выявления закономерностей взаимодействия геосфер [7]. Основу комплекса составляют приборы, работающие на основе лазерно-интерференционных методов: три горизонтальных деформографа поверхностного типа, собранные

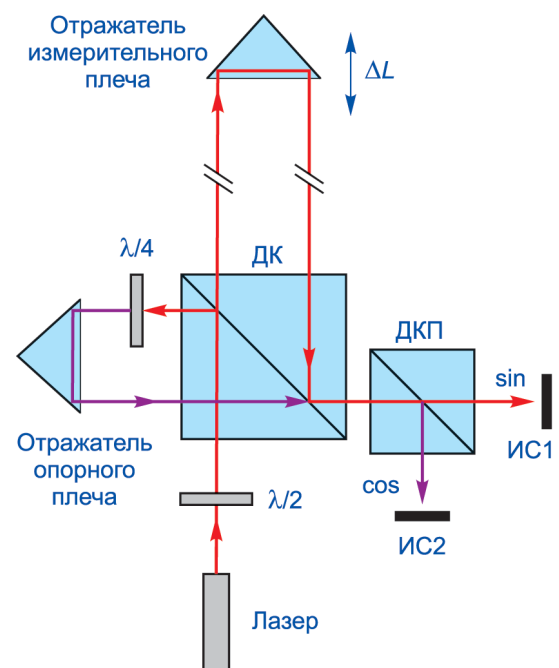


Рис. 1. Схема интерферометра-деформографа Майкельсона для получения интерференционного сигнала в квадратурном режиме: $\lambda/2$, $\lambda/4$ – фазовые пластины; ДК – делительный куб 400–700 нм без поляризации; ДКП – поляризирующий делительный куб 400–700 нм; ИС1, ИС2 – фотоприёмники интерферирующих ортогонально поляризованных лучей; sin, cos – квадратурные сигналы; ΔL – смещение отражателя относительно исходного положения

Fig. 1. Schematic layout of Michelson's interferometer-strainmeter for obtaining an interference signal in a quadrature mode:

$\lambda/2$, $\lambda/4$ – phase plates, NPBS – non-polarizing beam splitter cube 400–700 nm, PBS – polarizing beam splitter cube 400–700 nm, IS1 and IS2 – orthogonally polarized beams, SIN, COS – quadrature signals, ΔL – measurement reflector offset relative to the initial position

по схеме неравноплечего интерферометра Майкельсона, а также лазерные измерители вариаций давления гидросферы и атмосферы [8]. Основная функция лазерных приборов комплекса – вычисление оптической разности хода между лучами опорного и измерительного плеч интерферометра с дальнейшим расчётом изменения длины измерительного плеча.

Опыт эксплуатации геофизического комплекса показал потребность в разработке, создании и включении в состав комплекса дополнительных контрольных деформографов разных габаритов, способных работать как самостоятельные устройства и выступать в роли системы контроля для других лазерных приборов.

Цель исследования – разработать систему контроля для регистрации оптической разности хода, вызванной температурой, давлением и (или) иными причинами и являющейся шумом для лазерного деформографа. Система должна быть конструктивно простой, компактной и адаптированной для работы со всеми типами приборов лазерно-интерференционного геофизического измерительного комплекса.

Метод измерения. Рассмотрим базовую схему лазерного деформографа и метод измерения оптической разности хода. Деформограф представляет собой интерферометр Майкельсона, в котором с помощью дополнительных элементов (светоделителей и фазовых пластин) создаются квадратурные сигналы [9]. Квадратурные сигналы регистрируются двумя фотодетекторами, а принимаемые ими сигналы отличаются по фазе друг от друга на угол $\pi/2$ (рис. 1).

Источником когерентного излучения служит частотно-стабилизированный лазер с длиной волны $\lambda=633$ нм. Лазерный луч направляют через фазовую пластину $\lambda/2$ на светоделительный куб без поляризации ДК. В опорном плече, образованном отражённым лучом, устанавливают фазовую пластину $\lambda/4$ создающую между прямым и отражённым лучом фазовый сдвиг $\pi/2$. Интерферирующие лучи далее проходят через поляризующий светоделительный куб ДКП, распадаясь на два ортогонально поляризованных луча, принимаемых фотодетекторами ИС1 и ИС2. Выходные напряжения фотодетекторов u_{1d} , u_{2d} описывают выражениями

$$u_{1d}(t) = u_1(t) + p; \quad (1)$$

$$u_{2d}(t) = [u_2(t)\cos\alpha - u_1(t)\sin\alpha]/r + q, \quad (2)$$

где r – отношение коэффициентов усиления фотодетекторов; p , q – смещения синусоидального и косинусоидального каналов $\sin$ и $\cos$; α – угол квадратурной ошибки; $u_1(t)$ и $u_2(t)$ – выходные напряжения фотодетекторов ИС1 и ИС2 для случая, когда интенсивность поляризованных лучей одинакова и $r=1$; $p=0$; $q=0$.

Сигналы u_{1d} , u_{2d} формируют в общем случае фигуру Лиссажу в виде эллипса. Значения r , p , q , α определяют различными методами [10, 11]. После нахождения значений r , p , q , α выражения (1) и (2) преобразуют к виду

$$u_1(t) = u_{1d}(t) - p;$$

$$u_2(t) = \{[u_{1d}(t) - p]\sin\alpha + r[u_{2d}(t) - q]\}/\cos\alpha.$$

Вычисляя $u_1(t)$, $u_2(t)$, фигура Лиссажу для которых является окружностью, получают разность фаз $\varphi(t)$ интерферирующих лучей:

$$\varphi(t) = \arctg[u_1(t)/u_2(t)];$$

зависимость $\Delta L(t)$ разности длин плеч интерферометра от времени

$$\Delta L(t) = \varphi(t)\lambda/(4\pi).$$

Квадратурные сигналы записывают с помощью 16-битного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) на компьютер, где происходит обработка сигналов и вычисление оптической разности хода лучей в деформографе. Частота записи – не менее 50 кГц. Точность измерения системы составляет 0,1 нм. Фактическая точность измерения отличается от теоретически возможной по ряду причин. В работах [12, 13] подробно разобраны факторы, влияющие на точность измерений. Описанная схема измерения при длине измерительного плеча в 50 м позволяет достичь чувствительности $\varepsilon = \Delta L/L$ порядка 10^{-11} (здесь ΔL – изменение в разнице длин измерительного и опорного плеч деформографа, вызванное внешним воздействием, L – длина измерительного плеча в деформографе).

Зарубежные устройства, осуществляющие вычисление параметров p , q , α в реальном времени [11], используют частоту записи до 200 кГц. Основную трудность представляет обработка больших массивов данных и сложность вычислений, поэтому запись данных ведётся фрагментами длиной от 2 до 10–15 мин на частоте 100–200 кГц с последующей фильтрацией и передискретизацией до частот 1–2 кГц и ниже в зависимости от целей исследований [3].

Приведённое выше описание не даёт полного представления о длительности обработки сигналов фотоприёмников деформографа. Однако эти временные затраты иногда значительны, поскольку в процессе записи сигналов большой амплитуды и частоты изменение фазы со значения $\pi/2$ на $-\pi/2$ при вычислении $\varphi(t) = \arctg[u_1(t)/u_2(t)]$ происходит очень быстро, что вызывает неверную интерпретацию данных при обработке. Поэтому приходится повышать частоту опроса каналов АЦП, а это ведёт к увеличению объёма данных и времени расчётов. Использование идентичного деформографа в качестве системы контроля приводит к увеличению объёма данных и времени их обработки в два раза, что может оказаться критичным. Помимо перечисленных оптических элементов деформографа требуются дополнительные детали, занимающие дополнительное пространство и делающие невозможной установку системы контроля в непосредственной близости от места измерения.

Система контроля с пробным сигналом. В настоящей статье предлагается метод обработки интерференционного сигнала, который позволяет снизить частоту опроса каналов АЦП и при этом не терять данные при быстром изменении оптической разности хода. Для этого в схему деформографа на основе интерферометра Майкельсона для получения

интерференционного сигнала в квадратурном режиме вносят изменения. Оптическая схема такого деформографа представляет собой модификацию оптической схемы классического интерферометра Майкельсона. Вместо зеркал в измерительных плечах устанавливают уголки отражатели, как в схеме на рис. 1, а лёгкий уголкового отражателя опорного плеча соединяют с пьезокерамическим элементом, на который подается синусоидальное напряжение с генератора. Это позволяет ввести в систему дополнительную периодическую разность хода и затем восстановить характер исходного возмущения в измерительном плече. Установка поляризационного светоделительного куба не требуется, интерференционная картина принимается одним фотодетектором ИС1. Также из оптической схемы исключают фазовые пластины $\lambda/2$ и $\lambda/4$.

Блок-схема предложенного регистратора показана на рис. 2. Интерференционную картину фиксируют фотоприёмником $\Phi Д$ и усиливают с помощью усилителя фототока $У Ф$. Выходное напряжение $У Ф$ через повторитель подают на фильтр низкой частоты $Ф Н Ч$ и с него — на канал аналого-цифрового преобразователя $А Ц П 1$. Также выходное напряжение $У Ф$ подают на полосовой фильтр $П Ф$ с центральной частотой 100 кГц. Выходной сигнал полосового фильтра поступает на один из входов логического устройства $Л У$, который выполняет роль фазового детектора. На второй вход логического устройства поступает напряжение от генератора $Г$, также имеющего частоту 100 кГц. Выходное напряжение логического устройства подают на второй канал аналого-цифрового преобразователя $А Ц П 2$. Выходное напряжение генератора поступает на фазовращательное устройство $Ф В У$, выход которого подключается к пьезокерамическому цилиндру с закрепленным на нем уголкового отражателем, что обеспечивает введение периодического пробного сигнала в разность хода лучей. Фильтры $Ф Н Ч$ и $П Ф$ рассчитывают так, чтобы их групповая задержка была одинаковой на частоте 100 кГц (в данном случае она составляет около 14 мкс). Суммарное время одного цикла измерения логического устройства в сумме со временем преобразования АЦП не должно превышать 10 мкс.

Временную зависимость интенсивности интерференционной картины в деформографе, попадающей на фотоприёмник, описывают как

$$I(t) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[4\pi \Delta L(t)/\lambda], \quad (3)$$

где I_1, I_2 — интенсивности излучения интерферирующих лучей плеч интерферометра; λ — длина волны излучения лазера.

Изменение напряжения фотоприёмника со временем определяют по формуле

$$U(t) = U_0 + U_A \cos[\Delta\varphi(t)], \quad (4)$$

где U_0 — постоянная составляющая напряжения фотоприёмника; U_A — амплитуда сигнала фотоприёмника, $\Delta\varphi(t)$ — оптическая разность хода интерферирующих лучей.

Выражение (4) описывает интерферограмму — изменение интерференционного сигнала. Данную формулу используют

для расчёта фотоэлектрического сигнала деформографа, измерительное плечо которого движется и создаёт переменную интенсивность излучения согласно уравнению (3).

Зависимость $\Delta\varphi(t)$ вычисляют непосредственно из интерференционного сигнала. Считая U_0, U_A постоянными, $\Delta\varphi(t)$ выражают как функцию арккосинуса от $[U(t) - U_0]/U_A$. Однако по значению косинуса угла в силу периодичности этой функции нельзя точно вычислить угол. Функцию арккосинуса

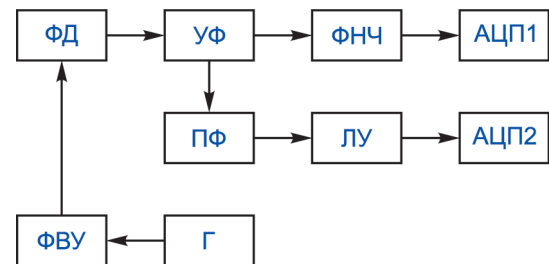


Рис. 2. Блок-схема регистрирующей системы: $\Phi Д$ — фотоприёмник; $У Ф$ — усилитель фототока; $Ф Н Ч$ — фильтр низкой частоты; $А Ц П 1, А Ц П 2$ — каналы аналого-цифрового преобразователя; $П Ф$ — полосовой фильтр; $Л У$ — логическое устройство; $Г$ — генератор; $Ф В У$ — фазовращательное устройство

Fig. 2. Block diagram of the recording system: PD — photodetector, PA — photocurrent amplifier, LPF — low-pass filter, $ADC1, ADC2$ — analog-to-digital converter channels, BPF — band-pass filter, LU — logic unit, G — generator, FSU — phase-shifting unit

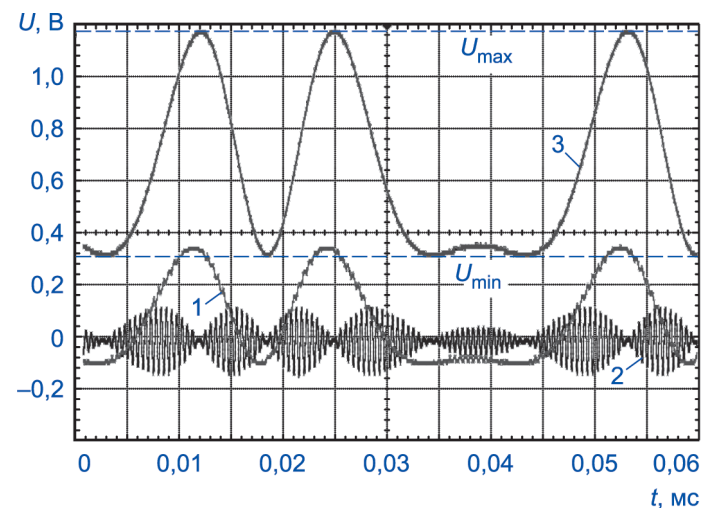


Рис. 3. Сигналы в регистрирующей системе: 1 — сигнал на выходе усилителя фототока; 2 — выходное напряжение полосового фильтра; 3 — выходное напряжение фильтра низкой частоты ($U_{\max}, U_{\min}$ — максимальное и минимальное выходные напряжения)

Fig. 3. Signals in the recording system: 1 — output signal of the photocurrent amplifier, 2 — output voltage of the bandpass filter, 3 — output voltage of the lowpass filter ($U_{\max}, U_{\min}$ — maximum and minimum output voltage)

однозначно определяют только для углов в интервалах $[0; \pi]$, $[\pi; 2\pi]$ и т. д., а в сигнале $U(t)$ отсутствует информация о том, к какому из интервалов $[0; \pi]$, $[\pi; 2\pi]$ относится рассчитанное значение $\Delta\varphi(t)$.

Для корректного вычисления значения $\Delta\varphi(t)$ в случае, когда интерференционный сигнал регистрируют одним фотоприёмником, используют пробный гармонический сигнал. Выделяя частоту пробного сигнала из $U(t)$ и сравнивая разность фаз этих двух сигналов, определяют, какой именно полупериод интерферограммы регистрирует фотоприёмник. Таким образом полностью восстанавливают закон изменения длины измерительного плеча.

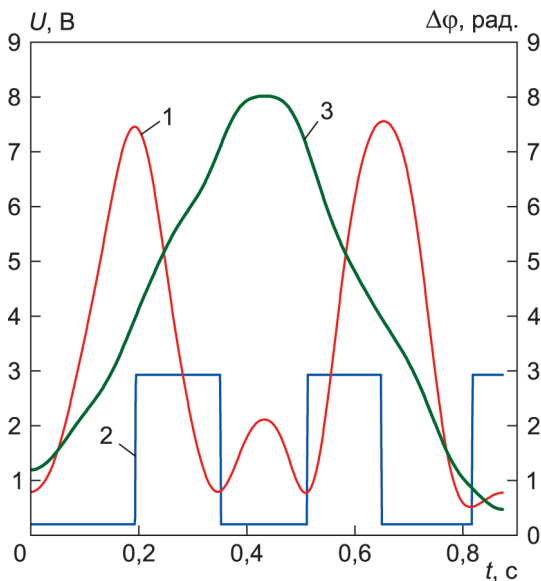


Рис. 4. Сигналы в системе контроля:

1 – выходное напряжение фильтра низкой частоты; 2 – выходной сигнал логического устройства; 3 – рассчитанная с помощью сигналов 1 и 2 оптическая разность хода $\Delta\varphi$; частота дискретизации 10 кГц

Fig. 4. Signals in the control system:

1 – output voltage of the low-frequency filter; 2 – output signal of the logic unit; 3 – calculated using signals 1 and 2, the value of the optical path difference $\Delta\varphi$; sampling rate 10 kHz

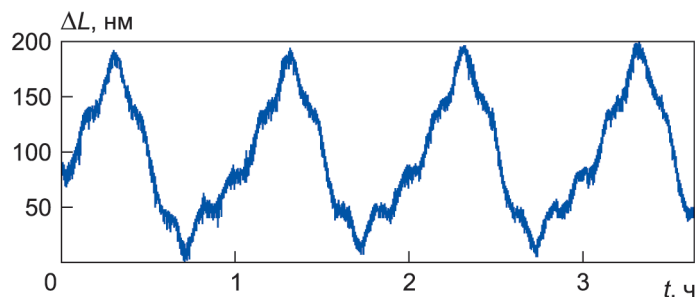


Рис. 5. Зарегистрированное системой контроля изменение длины измерительного плеча $\Delta L(t)$ в лабораторном интерферометре Майкельсона

Fig. 5. The change in the length of the measuring arm $\Delta L(t)$ recorded by the control system in a laboratory Michelson interferometer

На рис. 3 приведены сигналы в системе контроля. Сигнал фотодетектора (кривая 1) зависит от оптической разности хода и частоты и амплитуды пробного сигнала. Частота выходного сигнала полосового фильтра соответствует частоте пробного сигнала (кривая 2). Выходное напряжение фильтра низкой частоты (кривая 3) качественно не отличается от сигнала фотодетектора, но не имеет характерной «гребенки» с частотой пробного сигнала, а также сдвигается по времени относительно сигнала фотодетектора.

Параметры полосового фильтра и фильтра низкой частоты подбирают так, что экстремальные значения $U_{\max}$, $U_{\min}$ выходного напряжения фильтра низкой частоты по времени совпадают с уменьшением выходного напряжения полосового фильтра до нуля (рис. 3). Если величина выходного напряжения фильтра низкой частоты не достигает значений $U_{\max}$, $U_{\min}$, то разность фаз между опорным напряжением (пробным сигналом) и выходным напряжением полосового фильтра равна либо 180° , либо нулю в зависимости от оптической разности хода в интерферометре. Получив в процессе обработки значения $U_{\max}$, $U_{\min}$, разность хода определяют из выражения

$$\Delta L(t) = \frac{\lambda}{4\pi} \arccos\{[2U(t) - U_{\max} - U_{\min}] / (U_{\max} - U_{\min})\}.$$

В логическом устройстве предусмотрен специальный цифровой выход, на котором для разности фаз между опорным напряжением и выходным напряжением полосового фильтра 180° устанавливается логический низкий уровень, а разности фаз, равной нулю, соответствует логический высокий уровень. Это позволяет корректно восстановить оптическую разность хода. На рис. 4 показаны два используемых для восстановления сигнала, записанных с помощью АЦП, и результат восстановления разности хода.

Таким образом, в регистрирующей аппаратуре системы контроля, так же как и в основном деформографе, используют два канала получения данных, необходимых для восстановления зависимости оптической разности хода от времени, но при этом применяют один фотодетектор и реализуют меньшую частоту опросов каналов АЦП (до 10 кГц).

Систему контроля в геофизическом лазерно-интерференционном измерительном комплексе устанавливают в трёх случаях. Для регистрации посторонних шумов и дрейфа в целях их последующего учёта систему контроля размещают на оптической скамье и основаниях, на которых закреплены отражатели лазерного деформографа. Для контроля температурных деформаций систему контроля размещают на одной оптической скамье с лазерными измерителями вариаций атмосферного давления. Также систему контроля применяют для ознакомления с уровнем шумов и деформаций в помещениях, которые предполагается использовать для дальнейшей установки лазерного деформографа.

Тестирование системы контроля и результаты. Для проверки системы контроля проводились тестовые измерения разности хода как в лабораторных, так и полевых условиях. На рис. 5 показана полученная в лаборатории запись сигнала системы контроля длительностью 3 ч 40 мин. В лабораторной установке отражатели опорного и измерительного плеч

интерферометра закреплялись на пьезокерамических цилиндрах. Длина измерительного плеча 2,5 м. На пьезокерамический цилиндр в опорном плече подавался пробный сигнал (синусоида с частотой 100 кГц). На пьезокерамический цилиндр в измерительном плече подавалось напряжение генератора U_r вида

$$U_r(t) = 2U_{r1}\sin(\omega t) + 0,5U_{r1}\sin(2\omega t) + 0,25U_{r1}\sin(6\omega t),$$

где U_{r1} – опорное напряжение; ω – угловая частота, значение которой подбиралось так, чтобы соответствующий ей период равнялся 1 часу.

В данном случае изоляция пути прохождения лазерного луча в измерительных плечах не выполнялась, поэтому на общей записи присутствовали шумы от внешних источников. После фильтрации сделанной записи получили зависимость оптической разности хода, идентичную по виду сигналу генератора.

Ещё одно преимущество системы контроля по сравнению с интерферометром с квадратурными сигналами – одновременная запись сигналов двух лазерных измерителей вариаций давления атмосферы (нанобарографов). Подробно принцип их работы описан в [7]. Уточним, что в измерительном плече такого прибора установлен чувствительный к изменениям атмосферного давления элемент с закреплённым на нем зеркалом, меняющий свои размеры пропорционально этим изменениям. Оба измерителя собраны на одной оптической скамье. Параллельно проведена запись датчиками атмосферного давления нескольких видов и с различным разрешением. На рис. 6 приведён фрагмент записи атмосферного давления датчиком давления метеостанции (кривая 1) и двумя нанобарографами. Кривая 2 отображает данные, полученные нанобарографом с использованием квадратурных сигналов с двумя фотодатчиками, кривая 3 – полученные нанобарографом с использованием регистрирующей системы с пробным сигналом и одним фотодатчиком (как в системе контроля). Для удобства минимальное давление, зафиксированное каждым из приборов, принято за ноль, а графики сдвинуты друг относительно друга по вертикали. Несмотря на более простую конструкцию второго прибора, полученные графики давления совпали с высокой точностью.

Предложенная авторами настоящей статьи система контроля также успешно заменяет ранее созданную для лазерного измерителя давления гидросферы систему [8]. Чувствительный элемент измерителя – контактирующая с гидросферой мембрана с закреплённым на ней зеркалом – является частью измерительного плеча интерферометра. Основная задача системы контроля лазерного измерителя давления гидросферы – измерение изменения длины его плеч, возникающего в результате теплового расширения элементов конструкции. Вычитая результат измерений дополнительного интерферометра из результата измерений первого, получали значение оптической разности хода, пропорциональное вариациям гидросферного давления на мембране, без погрешности, обусловленной тепловым расширением элементов интерферометра [14]. Однако в ряде устройств, например в автономном лазерном измерителе колебаний давления [14], применявшаяся ранее регистрирующая система

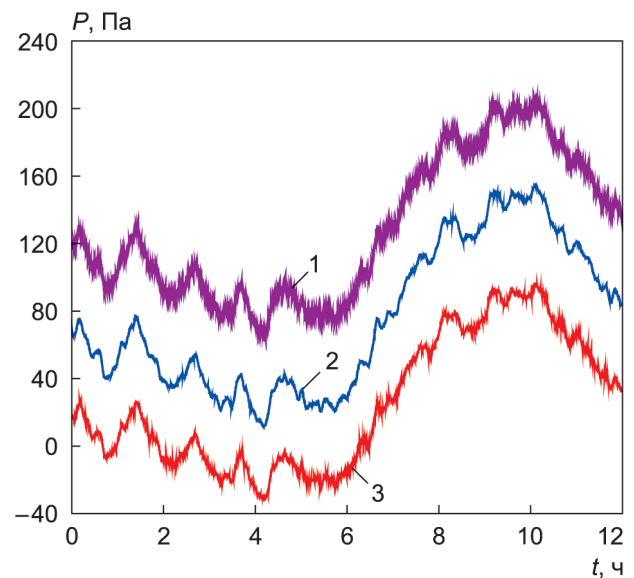


Рис. 6. Одновременная запись вариаций атмосферного давления длительностью 12 часов, выполненная метеостанцией MaxiMet GMX500-5B (1), лазерным нанобарографом с регистрирующей системой, использующей квадратурные сигналы (2), а также системой контроля для лазерного нанобарографа (3)

Fig. 6. Simultaneous 12 hours record of atmospheric pressure variations performed by the MaxiMet GMX500-5B weather station (1), a laser nanobarograph with a recording system using quadrature signals (2) and a control system for a laser nanobarograph (3)

была выполнена на базе системы компенсационного типа и требовала различных номиналов питающих напряжений, в том числе и достаточно высокого (более 400 В). Поэтому установка системы контроля именно в виде лазерного интерферометра оказалась невозможной в существовавшем ранее виде. В описанном случае система контроля автономного лазерного измерителя давления гидросферы представляла собой группы датчиков температуры и давления. Предлагаемая авторами в настоящей статье система контроля на базе интерферометра компактнее и требует всего два напряжения питания (± 15 В), при этом может быть размещена в корпусе автономного измерителя вариаций давления. Разрешение по давлению у лазерного измерителя давления гидросферы при использовании систем контроля составляет 11,5 мПа [15].

Закключение. Представленная система контроля на базе неравноплечего лазерного интерферометра Майкельсона – результат постоянно ведущейся работы по усовершенствованию входящих в состав геофизического комплекса ТОИ ДВО РАН средств мониторинга и учёта влияния внешних факторов на конструкцию отдельных лазерно-интерференционных приборов. Разработанную систему контроля можно использовать как по прямому назначению (для учёта погрешностей измерения), так и в качестве самостоятельного устройства для регистрации колебаний и волн с частотами до 2 кГц в составе геофизического комплекса. Точность измерения системы контроля составляет 0,3 нм (при измерении в составе лазерного деформографа с длиной измерительного

плеча до 50 м), что сопоставимо с точностью обслуживаемого длиннобазового лазерного деформографа. При этом оптическая часть системы проще и компактнее, при записи данных используется меньшая частота опроса аналого-цифрового преобразователя, надежность регистрирующей системы выше при меньшем энергопотреблении.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 18–05–80011 «Опасные явления»), а также в рамках выполнения государственного задания АААА-А20-120021990003-3 «Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей Мирового океана».

Список литературы

1. Abbott B. P., The LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration et al., *Living Rev. Relativity*, 2016, vol. 19, 1. <https://doi.org/10.1007/lrr-2016-1>
2. KAGRA collaboration, Akutsu T., Ando M. et al., *Nature Astronomy*, 2019, vol. 3, no. 1, pp. 35–40. <https://doi.org/10.1038/s41550-018-0658-y>
3. Araya A., Takamori A., Morii W. et al., *Earth, Planets and Space*, 2017, vol. 69, 77. <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0660-0>
4. Kobe M., Jahr T., Poschel W., Kukowski N., *Review of Scientific Instruments*, 2016, vol. 87, no. 3, 034502. <https://doi.org/10.1063/1.4942433>
5. Miyo K., *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1468. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1468/1/012221>
6. Wyatt F., Beckstrom K., Berger J., *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1982, vol. 72, no. 5, pp. 1707–1715.
7. Долгих Г. И. Лазерно-интерференционный комплекс // Сейсмические приборы. 2003. Т. 39. С. 13–27.
8. Dolgikh G. I., Dubrov M. N., Dolgikh S. G., Kovalev S. N., Ovcharenko V. V., Savvin E. A., Chupin V. A., Shvets V. A., Yakovenko S. V., *Acta Geophysica*, 2006, vol. 54, no. 2, pp. 187–197. <https://doi.org/10.2478/s11600-006-0015-x>
9. Швеиц В. А. Лазерный деформограф с формированием квадратурных сигналов // Физика геосфер. Сборник научных статей по избранным материалам XI Всероссийского симпозиума «Физика геосфер», Владивосток, Россия, 9–14 сентября, 2019. Владивосток: Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева, 2019. Вып. 1. С. 22–29. <https://www.doi.org/10.35976/POI.2019.14.42.002>
10. Heydemann P., *Appl. Opt.*, 1981, vol. 20, no. 19, pp. 3382–3384.
11. Zumberge M. A., Berger J., Dzieciuch M. A., Parker R. L., *Appl. Opt.*, 2004, vol. 43, no. 4, pp. 771–775. <https://doi.org/10.1364/ao.43.000771>
12. Agnew D. C., *Reviews of Geophysics*, 1986, vol. 24, no. 3, pp. 579–624. <https://doi.org/10.1029/RG024i003p00579>
13. Милуков В. К., Клячко Б. С., Мясников А. В., Стриганов П. С., Янин А. Ф., Власов А. Н. Лазерный интерферометр-деформограф для мониторинга движений земной коры // Приборы и техника эксперимента. 2005. № 6. С. 87–103.

14. Долгих Г. И., Плотников А. А., Будрин С. С. Лазерно-интерференционный измеритель давления гидросферы с учётом изменений температуры // Приборы и техника эксперимента. 2015. № 5. С. 149–150.

<https://doi.org/10.7868/S0032816215050183>

15. Долгих Г. И., Будрин С. С., Швеиц В. А., Яковенко С. В. Автономный лазерный измеритель колебаний давления // Фотоника. 2019. Т. 13. № 4. С. 372–381.

<https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2019.13.4.372.380>

References

1. Abbott B. P., The LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration et al., *Living Rev. Relativity*, 2016, vol. 19, 1. <https://doi.org/10.1007/lrr-2016-1>
2. KAGRA collaboration, Akutsu T., Ando M. et al., *Nature Astronomy*, 2019, vol. 3, no. 1, pp. 35–40. <https://doi.org/10.1038/s41550-018-0658-y>
3. Araya A., Takamori A., Morii W. et al., *Earth, Planets and Space*, 2017, vol. 69, 77. <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0660-0>
4. Kobe M., Jahr T., Pöschel W., Kukowski N., *Review of Scientific Instruments*, 2016, vol. 87, no. 3, 034502. <https://doi.org/10.1063/1.4942433>
5. Miyo K., *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1468. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1468/1/012221>
6. Wyatt F., Beckstrom K., Berger J., *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1982, vol. 72, no. 5, pp. 1707–1715.
7. Dolgikh G. I., A Laser-Interference Complex, *Seismic instruments*, 2003, vol. 39, pp. 13–27 (in Russ.).
8. Dolgikh G. I., Dubrov M. N., Dolgikh S. G., Kovalev S. N., Ovcharenko V. V., Savvin E. A., Chupin V. A., Shvets V. A., Yakovenko S. V., *Acta Geophysica*, 2006, vol. 54, no. 2, pp. 187–197. <https://doi.org/10.2478/s11600-006-0015-x>
9. Shvets V. A., *Physics of geospheres. The collection of scientific articles on selected materials XI All-Russian Symposium "Physics of geospheres"*, Vladivostok, Russia, September, 9–14, 2019, iss. 1, pp. 22–29 (in Russ.). <https://www.doi.org/10.35976/POI.2019.14.42.002>
10. Heydemann P., *Appl. Opt.*, 1981, vol. 20, no. 19, pp. 3382–3384.
11. Zumberge M. A., Berger J., Dzieciuch M. A., Parker R. L., *Appl. Opt.*, 2004, vol. 43, no. 4, pp. 771–775. <https://doi.org/10.1364/ao.43.000771>
12. Agnew D. C., *Reviews of Geophysics*, 1986, vol. 24, no. 3, pp. 579–624. <https://doi.org/10.1029/RG024i003p00579>
13. Milyukov V. K., Klyachko B. S., Myasnikov A. V., Striganov P. S., Yanin A. F., Vlasov A. N., *Instruments and Experimental Techniques*, 2005, vol. 48, no. 6, pp. 780–795. <https://doi.org/10.1007/s10786-005-0140-9>
14. Dolgikh G. I., Plotnikov A. A., Budrin S. S., *Instruments and Experimental Techniques*, 2015, no. 5, pp. 149–150 (in Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0032816215050183>
15. Dolgikh G. I., Budrin S. S., Shvets V. A., Yakovenko S. V., *Photonics Russia*, 2019, vol. 13, no. 4, pp. 372–381 (in Russ.). <https://doi.org/10.22184/FRos.2019.13.4.372.380>

Статья поступила в редакцию 13.11.2020; принята к публикации 24.12.2020.