

ЛАЗЕРНЫЙ ДЕФОРМОГРАФ С ФОРМИРОВАНИЕМ КВАДРАТУРНЫХ СИГНАЛОВ

Швец В.А.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева

E-mail: vshv@poi.dvo.ru

Аннотация

В данной работе приведены некоторые результаты разработки, создания и использования регистрирующих систем для длиннобазовых лазерных деформографов и других измерительных приборов, созданных на его основе. В качестве источника излучения используется частотно-стабилизированный лазер с длиной волны 633 нм. Приведено описание регистрирующей системы лазерного деформографа с использованием квадратурных сигналов, позволяющей достигать высокой чувствительности ($\Delta L/L \approx 10^{-10}$), способной регистрировать колебания высокой частоты (до 4 кГц), имеющей высокую надежность. Представлены результаты испытаний данной системы и ее работы в составе измерительного комплекса.

Ключевые слова: лазер, интерферометр, лазерный деформограф.

LASER STRAINMETER BASED ON QUADRATURE LASER INTERFEROMETER

Shvets V.A.

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute

Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok

E-mail: vshv@poi.dvo.ru

Abstract

This article gives a brief overview of results achieved in process of design, developing and using of data acquisition systems for LSM (long-base strainmeters) and other devices based on laser interferometers. A frequency-stabilized 633 nm laser is used as a light source. The data acquisition system of homodyne quadrature LSM was described, and main characteristics of the instrument are:

high sensitivity ($\Delta L/L \approx 10^{-10}$), high sample rate (up to 4 kHz), high reliability. Trial records and experimental data obtained in measuring complex were processed and some results are presented.

Keywords: laser, interferometer, laser strainmeter.

Введение

Лазерные деформографы с различными длинами измерительных плеч используются наряду с другими геофизическими измерительными приборами уже в течение полувека. Несмотря на сложность конструкции, данные измерители отличаются широким динамическим диапазоном, а их порог чувствительности при измерении относительных изменений длины измерительного плеча на несколько порядков выше, чем у других приборов. С развитием элементной базы электронных устройств изменяется и регистрирующая аппаратура лазерных измерителей разности хода в лазерных деформографах, появляются новые возможности по модификации конструкции деформографов.

В течение 2018 года закончено проектирование и создание новых регистрирующих систем для сейсмоакустико-гидрофизического комплекса МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца». Проверка систем производилась в лабораторных условиях и на экспедиционной станции в составе нанобарографа и 17,5-м деформографа с ориентацией запад-восток. Оба измерителя построены на основе неравноплечего интерферометра Майкельсона. Регистрация вариаций атмосферного давления и земной коры производилась системами двух видов: 1) с одним фотоприемником и вспомогательным пробным сигналом и 2) с использованием двух фотоприемников и квадратурными интерференционными сигналами.

Постановка задачи

Первый вид системы является улучшением существующей регистрирующей аппаратуры и также использует пробный гармонический сигнал. Рассмотрим вопрос о его необходимости. Временная зависимость интенсивности излучения интерференционной картины в деформографе, попадающей на фотоприемник, описывается выражением:

$$I(t) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[4\pi \cdot \Delta L(t) / \lambda], \quad (1)$$

а напряжение, снимаемое с фотоприемника, со временем меняется как

$$U(t) = U_0 + U_A \cos(\Delta\varphi(t)) \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2) обозначено: I_1, I_2 – интенсивности излучения интерферирующих лучей плеч интерферометра, λ – длина волны излучения лазера, $\Delta L(t)$ – зависимость разности хода лучей от времени, U_0 – постоянная составляющая напряжения фотоприемника, U_A – амплитуда сигнала фотоприемника, $\Delta\varphi(t)$ – переменная во времени разность фаз между интерферирующими лучами. Выражение (2) описывает интерферограмму, или интерференционный сигнал. Его можно использовать для расчета фотоэлектрического сигнала деформографа, измерительное плечо которого движется и создает переменную интенсивность излучения согласно уравнению (1).

Зависимость $\varphi\Delta(t)$ можно вычислить непосредственно из интерференционного сигнала. Считая U_0 и U_A постоянными, $\varphi\Delta(t)$ можно выразить как функцию арккосинуса от величины $U_p(t) = (U(t) - U_0) \cdot U_A$, нормировав ее на единицу. Однако по значению косинуса угла, в силу периодичности этой функции, нельзя однозначным образом определить величину самого угла. Функция арккосинуса однозначно определена только для углов в интервалах $[0; \pi]$, $[\pi; 2\pi]$ и т.д. В самом сигнале $U(t)$ отсутствует информация о номере полупериода, для которого в данный момент времени следует рассчитывать $\varphi\Delta(t)$.

Для получения информации о номере полупериода для случая, когда для регистрации интерференционного сигнала используется один фотоприемник, можно использовать пробный гармонический сигнал [1]. Выделяя частоту пробного сигнала из $U(t)$ и сравнивая разность фаз этих двух сигналов, можно определить, какой именно полупериод интерферограммы наблюдается фотоприемником. Таким образом, можно полностью восстановить закон изменения длины измерительного плеча. Недостатком такого метода является ошибка определения экстремума и флуктуации интерференционной картины и, как следствие, сигнала $U(t)$, что ведет к появлению «разрывов» при сшивке данных, относящихся к разным полупериодам $U(t)$.

Система с использованием квадратурных сигналов

Хорошо известной альтернативой являются интерферометры с использованием квадратурных сигналов, и второй вид системы регистрации построен на этом принципе измерения. Регистрация при этом ведется двумя фотодетекторами, а принимаемые ими сигналы отличаются по фазе друг от друга на угол $\pi/2$ (рис. 1).

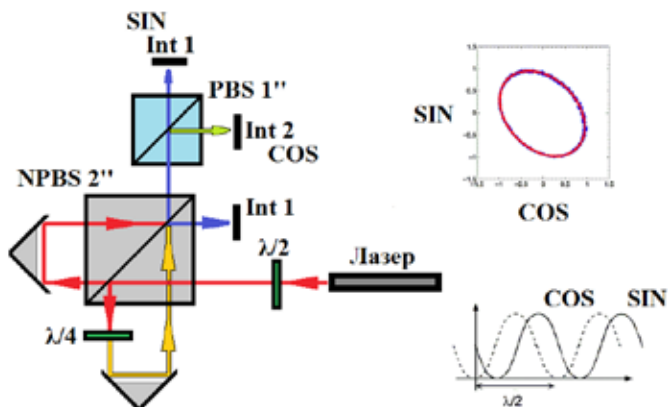


Рис. 1 Схема интерферометра Майкельсона для получения интерференционного сигнала в квадратурном режиме

Лазерный луч направляется через фазовую пластину $\lambda/2$ на делительный куб без поляризации NPBS. В опорном плече, образованном отраженным лучом, установлена фазовая пластинка $\lambda/4$, создающая между прямым и отраженным лучом фазовый сдвиг величиной $\pi/2$. Интерферирующие лучи далее проходят через поляризующий делительный куб PBS, распадаясь на два ортогонально поляризованных луча Int1 и Int2, принимаемые двумя фотодетекторами, выходные напряжения которых описываются выражениями:

$$u_{1d}(t) = u_1(t) + p, \quad u_{2d}(t) = \frac{1}{r}(u_2(t) \cos \alpha - u_1(t) \sin \alpha) + q, \quad (3)$$

где r – отношение коэффициентов усиления фотодетекторов, p и q – смещения синусоидального и косинусоидального каналов Int1 и Int2, α – угол ошибки.

Сигналы u_{1d} и u_{2d} формируют в общем случае фигуру Лиссажу, являющуюся эллипсом (как на рис. 1). Существуют различные методы [3, 4], позволяющие определить значения r , p , q и α . После их нахождения преобразуем (3) к виду:

$$u_1(t) = u_{1d}(t) - p, u_2(t) = \frac{1}{\cos \alpha} [(u_{1d}(t) - p) \sin \alpha + r(u_{2d}(t) - q)]. \quad (4)$$

Вычислив $u_1(t)$ и $u_2(t)$, фигура Лиссажу для которых является окружностью, можно получить:

$$\varphi(t) = \arctg[u_1(t) / u_2(t)], \quad \Delta L(t) = \varphi(t)\lambda / (4\pi). \quad (5)$$

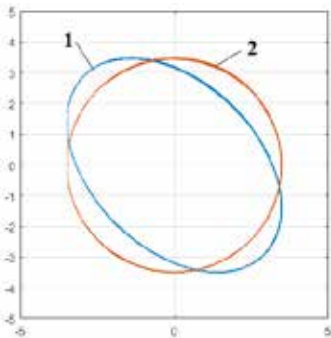


Рис. 2 Фигуры Лиссажу для экспериментальных данных ($u_{1d}(t)$, $u_{2d}(t)$) (кривая 1) и скорректированных с использованием выражения (4) значений ($u_1(t)$, $u_2(t)$) (кривая 2).

Испытания и основные результаты

Схема интерферометра рис.1 была собрана и проверена в лабораторных условиях, а затем была установлена в составе лазерного деформографа с ориентацией «запад-восток» на измерительном полигоне МЭС «Мыс Шульца» (рис. 3).

Квадратурные сигналы записываются с помощью аналого-цифрового преобразователя на компьютер, где происходит их обработка и вычисляется оптическая разность хода лучей в деформографе. Частота записи составляет 50 кГц. Зарубежные устройства, осуществляющие вычисление параметров p , q и α в реальном времени [3, 4], используют частоту записи 50-200 кГц. Обработка больших массивов данных и сложность вычислений представляют основную трудность, поэтому запись данных ведется фрагментами по 10-15 минут на частоте 20-50 кГц с последующей обработкой и фильтрацией до частоты 1-2 кГц [2]. Определение величины угла ошибки с точностью

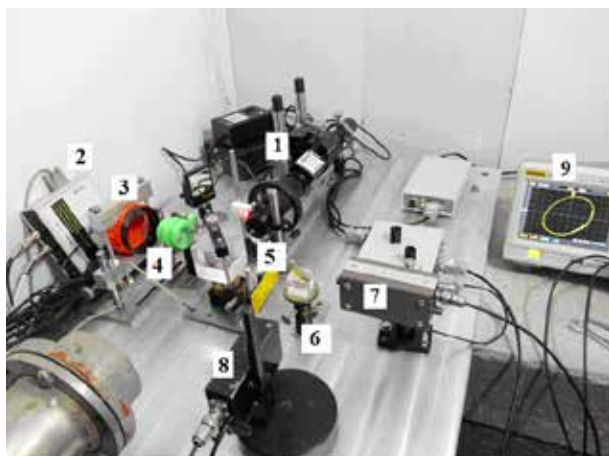


Рис. 3 Вид оптической скамьи деформографа «запад-восток» на МЭС «Мыс Шульца». 1 – Лазер с блоком питания, 2 – блок регистрации датчиков температуры, 3 – отражатель опорного плеча интерферометра, 4 – фазовая пластина $\lambda/4$, 5 – делительный куб без поляризации и фазовая пластина $\lambda/2$, 6 – делительный куб с поляризацией, 7, 8 – фотодетекторы, 9 – осциллограф для наблюдения картин Лиссажу, образуемых квадратурными сигналами деформографа.



Рис. 4 Запись длительностью 18 часов метеостанции МахіMet GMX500-5B (верхний) и лазерного нанобарографа (нижний) с помощью регистрирующей системы, использующей квадратурные сигналы

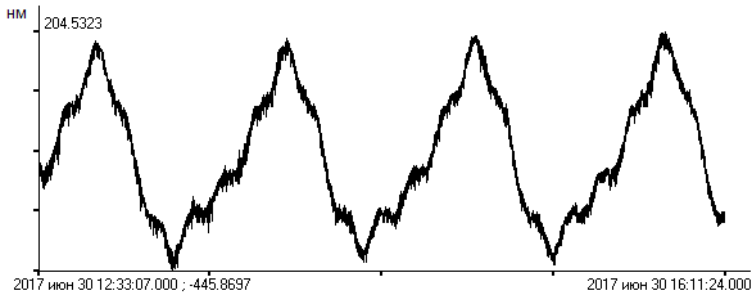


Рис. 5 Тестовая запись системы с квадратурными сигналами длительностью 3 ч 40 мин. Велась запись детерминированного сигнала, содержащего гармоники с периодами 1, 1/2 и 1/6 часов с помощью лабораторного неравноплечего интерферометра Майкельсона с измерительным плечом 10,5 м. Относительные амплитуды гармоник равны 2, 0,5 и 0,25 единиц, соответственно. Высокочастотный шум в записи определяется флуктуациями атмосферного давления, температуры и влажности, имевшихся в воздушных зазорах установки.

до 0.5 градуса позволяет добиться величины $\varepsilon = \Delta L / L$ порядка 10^{-10} (здесь ΔL – изменение длины измерительного плеча, L – оптическая длина пути лазерного луча в деформографе).

Заключение

Представленные регистрирующие системы являются результатом постоянно ведущейся работы по усовершенствованию регистрирующей аппаратуры лазерно-интерференционных измерителей вариаций деформации земной коры. Системы, которые используют для измерения оптической разности хода квадратурные сигналы, являются наиболее многочисленными и переход к ним актуален. Тем не менее, показанная в данной работе как предшественник, усовершенствованная система с пробным сигналом остается полезной при необходимости создания компактных устройств. Кроме того, в отличие от системы с квадратурными сигналами, такая система требует значительно меньших машинных затрат на вычисления. Обе представленные системы в составе лазерного деформографа с измерительным плечом 52,5 м для величины $\varepsilon = \Delta L / L = 700 \cdot 10^{-10}$ регистрируют колебания и волны с частотой до 4 кГц.

Благодарность Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 18-05-80011-опасные явления)

Литература

1. Яковенко С.В., Будрин С.С., Долгих С.Г., Плотников А.А., Чупин В.А., Швец В.А. Лазерно-интерференционная система «Приморье - о. Сахалин» // Метрология. 2015. №1. С. 28-31.
2. Akito Araya, Akiteru Takamori, Wataru Morii, Kouseki Miyo, Masatake Ohashi, Kazuhiro Hayama, Takashi Uchiyama, Shinji Miyoki and Yoshio Saito. Design and operation of a 1500-m laser strainmeter installed at an underground site in Kamioka, Japan. *Earth, Planets and Space* (2017) 69:77.
3. Heydemann P.L.M. (1981). Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers. *Appl Opt* 20:3382–3384.
4. Zumberge M.A., Berger J., Dzieciuch M.A., Parker R.L. (2004). Resolving quadrature fringes in real time. *Appl Opt* 43:771–775.

References

1. Jakovenko S.V., Budrin S.S., Dolgikh S.G., Plotnikov A.A., Chupin V.A., Shvets V.A. The Primorye-Sakhalin Laser-Interference System. *Measurement techniques*. 2015. V.58. No 3. p. 314-316. DOI: 10.1007/s11018-015-0706-2
2. Akito Araya, Akiteru Takamori, Wataru Morii, Kouseki Miyo, Masatake Ohashi, Kazuhiro Hayama, Takashi Uchiyama, Shinji Miyoki and Yoshio Saito. Design and operation of a 1500-m laser strainmeter installed at an underground site in Kamioka, Japan. *Earth, Planets and Space* (2017) 69:77.
3. Heydemann P.L.M. (1981). Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers. *Appl Opt* 20:3382–3384.
4. Zumberge M.A., Berger J., Dzieciuch M.A., Parker R.L. (2004). Resolving quadrature fringes in real time. *Appl Opt* 43:771–775.