

07;12

## Принципы построения однокоординатных лазерных деформографов

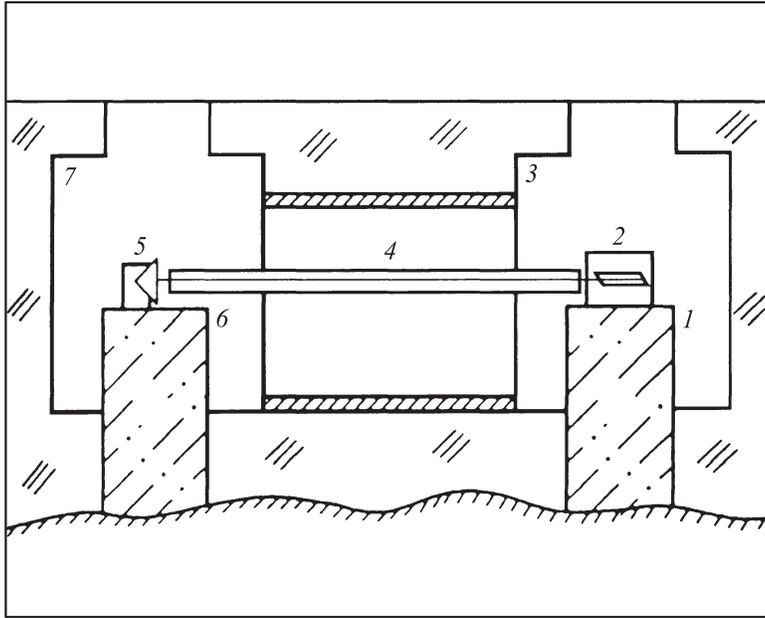
© Г.И. Долгих

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,  
Владивосток  
E-mail: dolgikh@poi.dvo.ru

Поступило в Редакцию 1 сентября 2010 г.

Обсуждаются конструктивные принципы расположения основных оптических узлов интерферометров Майкельсона при создании однокоординатных лазерных деформографов неравноплечего типа. Показаны принципиальные преимущества лазерного деформографа маятникового типа перед деформографом классического типа.

Еще в прошлом веке были созданы первые лазерные деформографы, оптические схемы которых построены на использовании интерферометров Майкельсона или Фабри-Перо и частотно стабилизированных лазеров. В настоящее время успешно эксплуатируются лазерные деформографы, направленные на регистрацию гравитационных волн [1], изучение геодинамических и геофизических процессов [2], исследование степени воздействия гидросферных и атмосферных процессов на уровень микродеформаций земной коры, ее сейсмичность [3–5]. Оптические элементы всех указанных интерферометров установлены на блоках, созданных из различных материалов, которые жестко соединены с земными породами. Технические характеристики деформографов зависят в основном от частотной стабильности применяемых лазеров, способов установки блоков деформографов и основных параметров среды их расположения. Учитывая сказанное, лазерные деформографы необходимо рассматривать не только как конкретные лазерные интерферометры, но и как системы „лазерный интерферометр—упругая среда“. В данной статье мы остановимся на принципах построения однокоординатных, неравноплечих лазерных деформографов, установленных на однородной среде, и рассмотрим некоторые особенности их амплитудно-частотных характеристик.



**Рис. 1.** Блок-схема лазерного деформографа классического типа: 1, 6 — бетонные (гранитные) устои лазерного деформографа; 2 — интерференционный узел лазерного деформографа; 3, 7 — подземные, гидротермоизолированные боксы лазерного деформографа; 4 — вакуумный (герметичный) лучевод; 5 — блок уголкового отражателя.

Сначала рассмотрим однокоординатный лазерный деформограф, оптические элементы которого смонтированы на двух блоках, которые жестко соединены с упругой средой (рис. 1). Основная масса лазерных деформографов создана по подобному принципу, который мы будем называть классическим. Как известно [6], применение лазерно-интерференционных методов в лазерных деформографах позволяет измерять на выходе их фотоприемников изменение силы тока, которое зависит от вариаций расстояния между устоями интерферометра, стабильности мощности и частоты применяемых лазеров, шумов фотоэлектронной аппаратуры. Выполнение обязательных мероприятий

по уменьшению уровня шумовых компонент позволяет по изменению тока  $\Delta i$  оценивать изменение расстояния между устоями деформографа  $\Delta L$ :

$$\Delta L = \frac{\Delta i}{i_0} \frac{\lambda_1}{2\pi} \pm \sqrt{\left(L \frac{\Delta \lambda_1}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\Delta i_1}{i_0} \frac{\lambda_1}{2\pi}\right)^2 + \left(\frac{\Delta i_2}{i_0} \frac{\lambda_1}{2\pi}\right)^2}, \quad (1)$$

где  $\frac{\Delta i}{i_0} \frac{\lambda_1}{2\pi}$  — измеряемая величина, а остальные слагаемые — шумы;  $L \frac{\Delta \lambda_1}{\lambda}$  — шумы, связанные с нестабильностью частоты лазерного излучения;  $\frac{\Delta i_1}{i_0} \frac{\lambda_1}{2\pi}$  — шумы фотоэлектронной аппаратуры;  $\frac{\Delta i_2}{i_0} \frac{\lambda_1}{2\pi}$  — шумы, вызванные нестабильностью мощности лазерного излучения;  $\lambda_1$  — длина волны лазера;  $\Delta i$  — величина силы тока на выходе фотоприемника, вызванная изменением расстояния между устоями лазерного деформографа;  $i_0 = 4I_0\chi$ ;  $\chi$  — чувствительность фотоприемника;  $I_0$  — интенсивность лазерного луча;  $L$  — длина рабочего плеча лазерного деформографа.

Рассмотрим амплитудно-частотную характеристику указанного лазерного деформографа. Пусть вдоль оптической оси деформографа распространяется гармоническая волна продольного типа, которую можно описать следующим выражением:

$$u_1 = A_0 \cos(kx_1 - \omega t), \quad (2)$$

где  $u_1$  — смещение в точке  $x_1$ ,  $A_0$  — амплитуда волны,  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число,  $\lambda$  — длина волны,  $\omega = 2\pi\nu$  — циклическая частота,  $\nu$  — частота волны,  $t$  — текущее время. При распространении волны через лазерный деформограф он будет регистрировать изменение его базы:

$$\Delta L = u_2 - u_1 = 2A_0 \sin\left(\frac{kL}{2}\right) \sin\left(\omega t - kx_1 - \frac{kL}{2}\right), \quad (3)$$

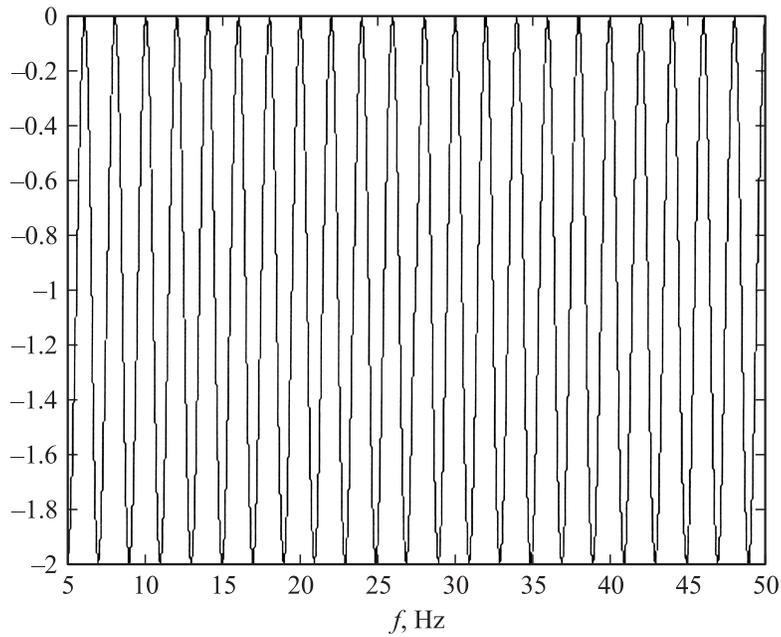
где  $u_1$  — смещение первого устоя лазерного деформографа, вызванное распространяющейся волной,  $u_2$  — смещение второго устоя лазерного деформографа, вызванное распространяющейся волной;  $x_1$  — координата первого устоя лазерного деформографа; т.е. регистрируемая им амплитуда волны зависит от  $L$  и  $\lambda$ .

Далее рассмотрим зависимость измеренного смещения при  $x_1 = 0$  и  $t = 0$  от длины волны (или частоты) для лазерных деформографов с длинами рабочих плеч 1000 и 100 м. При анализе формул можно

выделить две зоны: первая зона — до появления биений, вторая зона — зона биений. Отметим общие закономерности для указанных лазерных деформографов при регистрации упругой волны амплитудой 1 м, распространяющейся со скоростью 2000 м/с. В низкочастотной области на частотах 1.0, 0.1, 0.01, 0.001 и 0.0001 Hz имеем: 1) для лазерного деформографа с длиной плеча 1000 м регистрируемое смещение равно  $-1.48$ ,  $-2.2 \cdot 10^{-2}$ ,  $-2.2 \cdot 10^{-4}$ ,  $-2.2 \cdot 10^{-6}$  и  $-2.2 \cdot 10^{-8}$  м; 2) для лазерного деформографа с длиной плеча 100 м регистрируемое смещение равно  $-2.2 \cdot 10^{-2}$ ,  $-2.2 \cdot 10^{-4}$ ,  $-2.2 \cdot 10^{-6}$ ,  $-2.2 \cdot 10^{-8}$  и  $-2.2 \cdot 10^{-10}$  м. В зоне биений амплитудно-частотной характеристики имеем; 1) для лазерного деформографа с длиной плеча 1000 м  $A(1.5 \text{ Hz}) = A(4.5 \text{ Hz}) = A(7.5 \text{ Hz}) = \dots = -2$ ,  $A(3.0 \text{ Hz}) = A(6.0 \text{ Hz}) = A(9.0 \text{ Hz}) = \dots = 0$ ; 2) для лазерного деформографа с длиной плеча 100 м  $A(15 \text{ Hz}) = A(45 \text{ Hz}) = A(75 \text{ Hz}) = \dots = -2$ ,  $A(30 \text{ Hz}) = A(60 \text{ Hz}) = A(90 \text{ Hz}) = \dots = 0$ , где  $A$  — амплитуда волны на выходе лазерного деформографа. Таким образом, из вышесказанного следует, что до зоны биений наилучшими характеристиками обладают лазерные деформографы, имеющие плечи наибольшей длины. В зоне биений сложно проводить регистрацию из-за периодических изменений амплитудно-частотной характеристики. Сложно рассчитать теоретически и определить экспериментально все особенности конкретных лазерных деформографов из-за неоднородного строения земной коры в зоне их расположения.

Можно ли убрать данные биения? Ниже мы рассмотрим основной метод, позволяющий не только убрать данные биения, но и позволяющий измерять абсолютные амплитуды упругих волн для частот выше 1 Hz.

Расположим один из оптических блоков интерферометра (например, уголкового отражателя (5) (рис. 1), устой (6) при этом убирается) на маятниковой системе, имеющей резонансную частоту  $\nu_0$  и добротность  $Q$ . Другой оптический блок интерферометра (мы рассматриваем однокоординатный лазерный деформограф, расположенный на двух опорных точках) расположим жестко на земной коре. Пусть вдоль оптической оси деформографа распространяется гармоническая волна продольного типа, которую, как и выше, можно описать выражением (2). При распространении волны через лазерный деформограф он будет

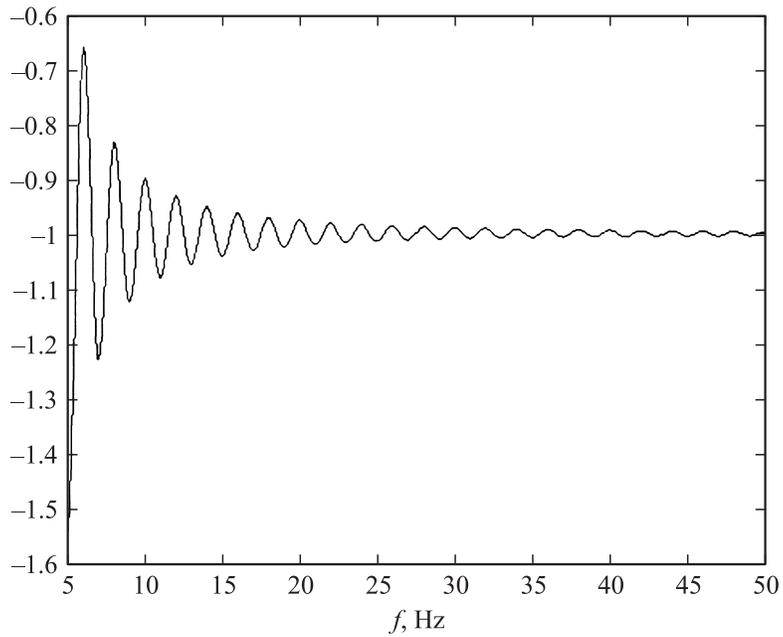


**Рис. 2.** Амплитудно-частотная характеристика лазерного деформографа классического типа с длиной плеча 1000 м в частотном диапазоне 5–50 Hz. По оси ординат отложена относительная амплитуда.

регистрировать изменение его базы:

$$\Delta L = u_2 - u_1 = A_0 \left\{ \frac{\omega_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\gamma^2\omega^2}} \times \cos \left( kx_1 + kL - \omega t + \arctg \left( \frac{2\gamma\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \right) \right) - \cos(kx_1 - \omega t) \right\}, \quad (4)$$

где  $\gamma = \omega_0/2Q$ , т.е. регистрируемая им амплитуда волны зависит от  $L$ ,  $\lambda$ ,  $v_0$  и  $Q$ . Далее рассмотрим только зависимость измеренного смещения от длины волны (или частоты) для лазерного деформографа с длиной плеча  $L = 1000$  м при резонансной частоте 3 Hz и добротности 300.



**Рис. 3.** Амплитудно-частотная характеристика маятникового лазерного деформографа с длиной плеча 1000 м в частотном диапазоне 5–50 Гц. По оси ординат отложена относительная амплитуда.

Сравним амплитудно-частотные характеристики лазерного деформографа классического типа при длине 1000 м и лазерного деформографа маятникового типа аналогичной длины. В низкочастотной (меньше 1 Гц) области спектра их характеристики идентичны, а в высокочастотной области спектра их характеристики сильно отличаются. Так на рис. 2 приведено изменение амплитудно-частотной характеристики лазерного деформографа классического типа длиной 1000 м в частотном диапазоне от 5 до 50 Гц (для примера) при регистрации вышеуказанной гармонической продольной волны, имеющей скорость 2000 м/с. А на рис. 3 приведено изменение амплитудно-частотной характеристики лазерного деформографа маятникового типа длиной 1000 м в том же случае. Как видно из рис. 2, амплитудно-частотная характеристика

лазерного деформографа классического типа испытывает периодические изменения, характер которых невозможно определить для действующих установок ввиду того, что непонятно, на каких частотах они ничего не регистрируют из-за сложного строения пород участков земной коры, на которых они расположены, что делает их непригодными для измерений в данном диапазоне частот. Как видно из рис. 3, амплитудно-частотная характеристика маятникового лазерного деформографа не испытывает таких биений (главное, что амплитуда на выходе деформографа не достигает нуля). Более того, лазерные деформографы маятникового типа с увеличением частоты способны регистрировать абсолютную (по модулю) амплитуду волны. Манипулируя резонансной частотой и добротностью системы, можно добиться желаемых характеристик лазерных деформографов.

Таким образом, создавая лазерный деформограф по маятниковому принципу, можно значительно улучшить его амплитудно-частотную характеристику.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-05-00597-а) и ДВО РАН.

## Список литературы

- [1] *Laser interferometer gravitational wave observatory*. Official site of the LIGO Laboratory [www.ligo.caltech.edu](http://www.ligo.caltech.edu).
- [2] *Shuzo Takemoto, Akito Araya, Junpei Akamatsu et al.* // *J. Geodynamics*. 2004. V. 38. P. 477–488.
- [3] *Долгих Г.И., Овчаренко В.В.* // *ДАН*. 2008. Т. 422. № 2. С. 250–253.
- [4] *Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н. и др.* // *Физика Земли*. 2004. № 8. С. 82–90.
- [5] *Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н. и др.* // *ДАН*. 2007. Т. 417. № 1. С. 109–112.
- [6] *Долгих Г.И., Привалов В.Е.* *Лазеры. Лазерные системы*. Владивосток: Дальнаука, 2009. 203 с.