

МОБИЛЬНЫЙ АДАПТИВНЫЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ЛАЗЕРНЫЙ СЕЙСМОГРАФ

О. Т. Каменев^{1,2}, Ю. С. Петров¹, Р. В. Хижняк¹,
И. Н. Завестовская^{3,4}, Ю. Н. Кульчин^{1,4}, Р. В. Ромашко^{1,2}

Разработан прототип мобильного лазерного сейсмографа на основе многовиткового волоконно-оптического чувствительного элемента и адаптивного голографического интерферометра. Показана возможность регистрации лазерным сейсмографом слабых сейсмических волн, распространяющихся в переходной зоне “суша–море”. Оригинальная многовитковая конструкция чувствительного элемента сейсмографа обеспечивает пороговую чувствительность к сейсмоускорению $1.6 \cdot 10^{-7}$ м/с². Долговременная стабильность работы лазерного сейсмографа обеспечивается за счет адаптивных свойств интерферометра, построенного с использованием динамической голограммы, формируемой в фоторефрактивном кристалле титаната висмута.

Ключевые слова: лазерный сейсмоприемник, волоконно-оптический датчик, адаптивный интерферометр, фоторефрактивный кристалл.

В любом сейсмоприемнике регистрация сейсмосигналов в конечном счете сводится к регистрации смещений точек поверхности, на которой он установлен. Оптическая интерферометрия является одним из наиболее чувствительных методов регистрации смещений [1]. Чувствительность интерферометра ограничена уровнем шумов фотодетектора и может быть чрезвычайно высокой: теоретически достижимый уровень чувствительности к перемещениям составляет величину порядка $1.1 \cdot 10^{-16}$ м/Гц^{1/2} для

¹ Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, 690041 Россия, Владивосток, ул. Радио, 5; e-mail: romashko@iacp.dvo.ru.

² Дальневосточный федеральный университет, 690950 Россия, Владивосток, ул. Суханова, 8.

³ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53.

⁴ Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

оптического излучения мощностью 10 мВт и длиной волны 500 нм [2]. Применение для построения интерферометра волоконно-оптической элементной базы обеспечивает возможность создания компактных высокочувствительных сейсмоприемников. Дополнительное увеличение чувствительности волоконно-оптических интерферометрических датчиков может быть обеспечено за счет применения многовиткового чувствительного элемента [3]. В результате сочетание высокой чувствительности интерферометрических методов измерения с большой длиной оптического пути чувствительного элемента может обеспечить пороговую чувствительность к измерению смещений до 10^{-13} м. Это открывает возможности регистрировать слабые сейсмические волны, распространяющиеся в переходной зоне “суша–море”, с использованием волоконно-оптических интерферометрических сейсмоприемников.

В настоящей работе создан и исследован мобильный адаптивный лазерный голографический сейсмограф (МАЛС), в котором в качестве первичного сейсмоприемника использован многовитковый волоконно-оптический акселерометр на основе интерферометра Маха–Цендера [4], а в качестве системы фазовой демодуляции – адаптивный голографический интерферометр, обеспечивающий долговременную стабильность работы сейсмографа во внелабораторных (полевых) условиях.

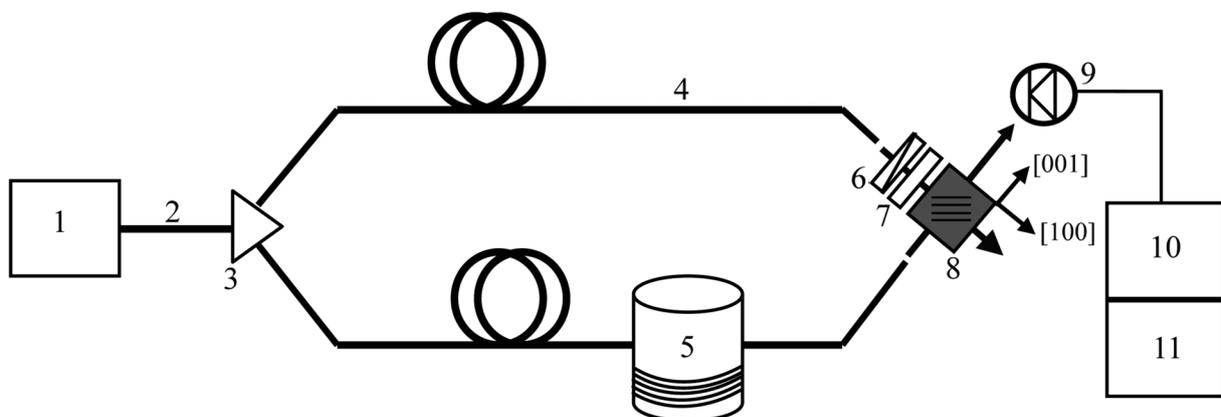


Рис. 1: Схема волоконно-оптического сейсмографа на основе адаптивного голографического интерферометра: 1 – DFB-лазер; 2 – волоконный световод; 3 – волоконно-оптический Y-разветвитель; 4 – опорное плечо интерферометра; 5 – многовитковый чувствительный элемент в сигнальном плече интерферометра; 6 – поляризатор; 7 – четвертьволновая фазовая пластинка; 8 – фоторефрактивный кристалл $Bi_{12}TiO_2$ среза (100); 9 – фотоприёмник; 10 – АЦП; 11 – компьютер.

Принцип действия лазерного голографического сейсмографа представлен блок-схемой на рис. 1. Излучение от полупроводникового лазера (1) (длина волны 650 нм, мощность 40 мВт), направляется посредством волоконно-оптического Y-разветвителя (3) в два одномодовых световода, которые являются опорным и сигнальным плечами интерферометра. Далее, опорная волна, приобретаемая после прохождения через поляризатор (6) и полуволновую пластинку (7) эллиптическую поляризацию, направляется в фоторефрактивный кристалл (8) $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ среза (100) вдоль его кристаллографической оси [100], где интерферирует с сигнальной волной, направленной вдоль оси [001]. Векторное взаимодействие волн с разным типом поляризации в ортогональной геометрии в кристалле кубической симметрии, поддерживающей “анизотропный” тип дифракции, т.е. дифракции на образующейся решетке $\delta\epsilon_{ij}$, позволяет реализовать линейный режим фазовой демодуляции без приложения к кристаллу внешнего электрического поля [5, 6]. Взаимодействие волн на формируемой ими динамической голограмме приводит к преобразованию модуляции фазы сигнальной волны, вызванной воздействием сейсмических колебаний на чувствительный элемент (5) сейсмографа, в модуляцию интенсивности, которая регистрируется при помощи фотоприемника (9).

Коэффициент преобразования многовиткового чувствительного элемента МАЛС составляет величину 500 рад/(м/с²). При чувствительности голографического интерфе-

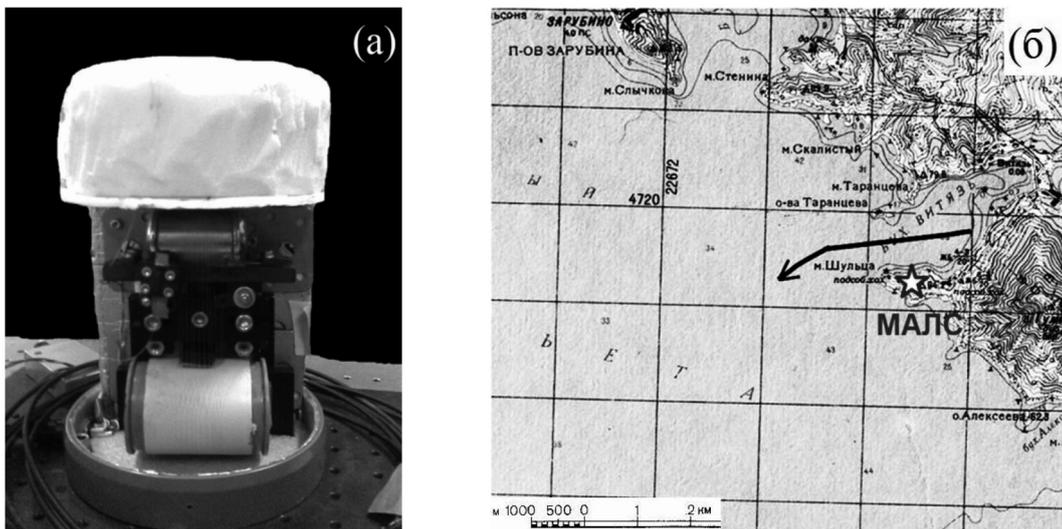


Рис. 2: Чувствительный многовитковый волоконно-оптический элемент мобильного адаптивного лазерного сейсмографа (а) и место установки МАЛС при проведении полевых испытаний (б). Стрелкой показана траектория движения судна.

рометра 1.2 В/рад общая чувствительность МАЛС составляет величину $6 \cdot 10^2$ В/(м/с²). При уровне собственных шумов измерительной системы 100 мкВ порог детектирования сейсмографа составляет величину порядка $1.6 \cdot 10^{-7}$ м/с². Это обеспечивает возможность регистрации слабых сейсмических волн, создающих сейсмоускорение порядка 10^{-6} м/с². Для проверки возможности регистрации слабых сейсмических волн с использованием МАЛС были проведены полевые испытания макета сейсмографа.

При проведении полевых испытаний макет мобильного адаптивного лазерного сейсмографа был установлен в переходной зоне “суша–море” в составе измерительной системы, обеспечивающей электропитание, сбор и обработку данных. На рис. 2(а) представлена фотография чувствительного элемента МАЛС, а на рис. 2(б) – место его установки, на берегу бухты Витязь залива Петра Великого на скале, на высоте 50 м от уровня моря.

На рис. 3 представлен фрагмент спектрограммы выходного сигнала МАЛС, соответствующий интервалу времени 50 мин, в течение которого из бухты Витязь выходило научное судно. На рисунке хорошо видны треки, соответствующие слабым сейсмосигналам, регистрируемым на берегу во время работы двух судовых силовых установок. Начальные частоты регистрируемых сейсмосигналов 12.46 и 12.69 Гц. По мере удале-

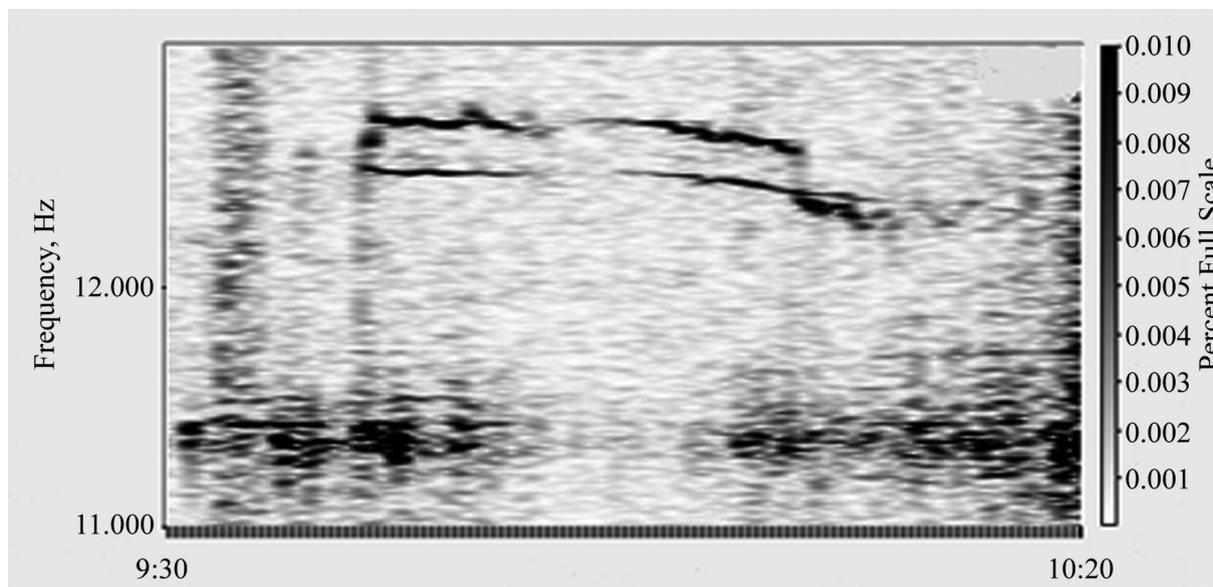


Рис. 3: Спектрограмма слабых сейсмосигналов, регистрируемых мобильным адаптивным лазерным сейсмографом во время движения научного судна в акватории бухты Витязь.

ния судна от берега частоты сигналов уменьшаются, что связано со снижением оборотов судовых силовых установок. В момент времени 10:05 одна из установок выключается.

Из спектрограммы следует, что уровень зарегистрированных сигналов лежит в интервале 0.006...0.01% от общего диапазона измерения сейсмографа, который определяется параметрами регистрирующей аппаратуры (фотоприемника и аналого-цифрового преобразователя). При этом зарегистрированное лазерным адаптивным сейсмографом сейсмоускорение составило величину $1.5 \cdot 10^{-6}$ м/с².

Таким образом, в работе показана возможность регистрации лазерным сейсмографом слабых сейсмических волн, распространяющихся в переходной зоне “суша–море”. Величина регистрируемого сейсмоускорения составила $\sim 10^{-6}$ м/с².

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-12-01122).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] P. Hariharan, Rep. Prog. Physics **54**, 339 (1990).
- [2] J. W. Wagner and J. B. Spicer, J. Opt. Soc. Am. B **4**, 1316 (1987).
- [3] O. T. Kamenev, Yu. N. Kulchin, Yu. S. Petrov, and R. V. Khizhnyak, Tech. Phys. Lett. **40**(2), 119 (2014).
- [4] O. T. Kamenev, Yu. N. Kulchin, Yu. S. Petrov, et al., Sensors and Actuators A **244**, 133 (2016).
- [5] S. Di Girolamo, R. V. Romashko, Y. N. Kulchin, and A. A. Kamshilin, Optics Communications **283**(1), 128 (2010).
- [6] R. V. Romashko, S. Di Girolamo, Y. N. Kulchin, and A. A. Kamshilin, J. Opt. Soc. Am. B **27** (2), 311 (2010).

Поступила в редакцию 12 декабря 2016 г.