

Разработка физических основ низкочастотной акустической томографии на арктическом шельфе волоконно–оптическими сейсмоприемниками

О. Т. Каменев,* Ю. Н. Кульчин,† Ю. С. Петров, В. А. Колчинский

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН. Россия, 690041, Владивосток, ул. Радио, д. 5
(Статья поступила 17.07.2017; Подписана в печать 20.09.2017)

Предложен и экспериментально исследован сейсмоприемник на основе интерферометра Маха-Цендера. Волоконно-оптический многовитковый чувствительный элемент сейсмоприемника обеспечивает высокую чувствительность к виброускорению в диапазоне 1–20 Гц. Стабильность положения рабочей точки интерферометра сейсмоприемника обеспечивается цепью обратной связи. Показано, что пороговая чувствительность сейсмоприемника 10^{-7} м/с² обеспечивает возможность регистрации слабых сейсмосигналов.

PACS: 42.81.Pa.

УДК: 681.7

Ключевые слова: сейсмоакустика, волоконная оптика, интерферометр.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема применения акустических методов для мониторинга морской среды и диагностики пород океанического дна в условиях Арктики сопряжена с трудностями, вызванными наличием в акватории ледового покрова. В отдельных районах наблюдается круглогодичное заледенение акватории. В таких условиях применение традиционных методов сейсмоакустического мониторинга затруднительно. В то же время развитие низкочастотных гидроакустических излучателей сопровождается увеличением энергии излучения, проникающего в породы морского дна. В этой связи открываются перспективы использования ледового покрова в качестве среды, воспринимающей акустические волны, формируемые при работе гидроакустических излучателей. Для решения этой задачи необходимо применение высокочувствительных малогабаритных быстроразвертываемых сейсмоприемников.

Интерферометрические методы измерений обеспечивают пороговую чувствительность до 10^{-14} м. Однако широко применяемые в сейсмоакустике стационарные лазерные интерферометры–деформографы не могут использоваться на ледовом покрове. Создание компактных интерферометров, и, как следствие, переносных высокочувствительных датчиков на их основе стало возможным благодаря развитию волоконной оптики. Пороговая чувствительность волоконно-оптических интерферометров к деформациям может составлять величину порядка 10^{-12} м, что вполне достаточно для проведения сейсмологических исследований. Однако для достижения указанной чувствительности необходимо обеспечить значительную длину волоконного световода измерительного плеча интерферометра, который используется в качестве чувствительного элемента интерферометрического датчика. Это обстоятельство затрудняет создание малогабаритных

быстроразвертываемых сейсмоприемников. Кроме того, протяженный волоконно-оптический чувствительный элемент подвержен значительному влиянию изменяющихся параметров окружающей среды, таких как температура и давление.

В данной работе для создания переносных высокочувствительных низкочастотных приемников сейсмических волн предлагается использовать подход, основанный на совместном применении интерферометрического метода измерения и пространственной локализации волоконно-оптического интерферометра [1].

1. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ СЕЙСМОПРИЕМНИК

На рис. 1 представлена схема волоконно-оптического приемника слабых сейсмоакустических сигналов на основе двухплечевого интерферометра Маха-Цендера и многовиткового чувствительного элемента.

Многовитковый оптико–механический преобразователь сейсмоприемника представляет собой два цилиндра, на которые намотан волоконный световод измерительного плеча интерферометра Маха–Цендера [2]. Один цилиндр жестко соединен с корпусом сейсмоприемника, второй выполняет роль инертной массы. Инертная масса может совершать колебания в направлении перпендикулярном плоскости, на которой установлен сейсмоприемник. При колебаниях происходит изменение длины волоконного световода, что приводит к изменению фазы оптического излучения в измерительном плече и модуляции интенсивности на выходе интерферометра, регистрируемой фотоприемником. При этом выходной сигнал волоконно-оптического сейсмоприемника оказывается прямо пропорциональным регистрируемому сейсмоускорению, а его АЧХ в низкочастотной области горизонтальна (рис. 2). Таким образом, волоконно-оптический сейсмоприемник является акселерометром.

Применение МЧЭ обеспечивает возможность пространственной локализации протяженного волоконно-оптического чувствительного элемента, что существен-

*E-mail: okamenev@mail.ru

†E-mail: director@iacp.dvo.ru

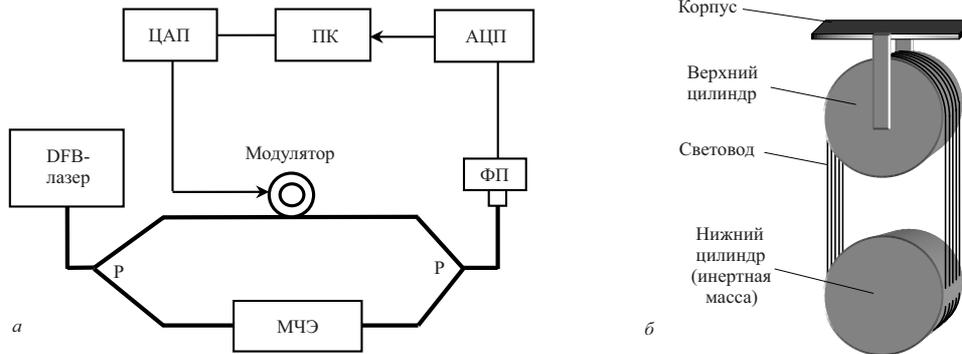


Рис. 1: Волоконно–оптический сейсмоприемник на основе интерферометра Маха-Цендера *а* — с многовитковым чувствительным элементом (МЧЭ), *б* — ФП — фотоприемник, Р — волоконно-оптический разветвитель, ПК — персональный компьютер

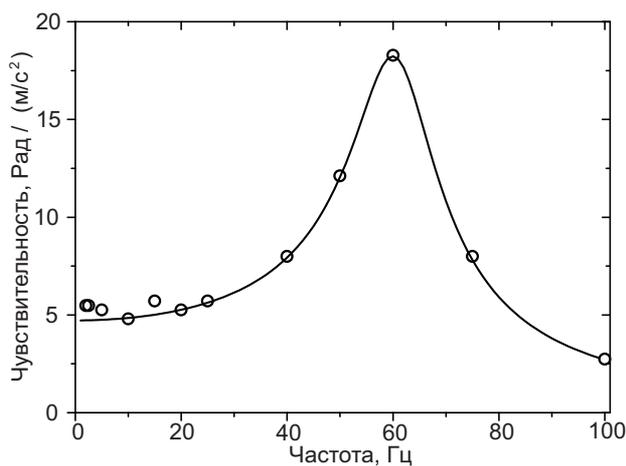


Рис. 2: Зависимость чувствительности оптико–механического преобразователя волоконно–оптического сейсмоприемника от частоты

но снижает влияние изменений параметров окружающей среды на интерферометр. В сейсмоприемнике применяется система активной стабилизации рабочей точки интерферометра, удерживающая ее на середине линейного участка. Применение в этой системе пьезоэлектрического фазового модулятора снижает помехозащищенность сейсмоприемника. Тем не менее, его пороговая чувствительность достигает значений порядка 10^{-7} м/с² [2], что обеспечивает возможность регистрации слабых сейсмосигналов.

2. ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПРОТОТИПА ВОЛОКОННО–ОПТИЧЕСКОГО СЕЙСМОПРИЕМНИКА

Для проверки возможности применения предложенного волоконно–оптического сейсмоприемника для регистрации слабых сейсмосигналов, формируемых в переходной зоне море–суша низкочастотным гидроаку-

стическим излучателем, были проведены экспедиционные исследования изготовленного прототипа сейсмоприемника. Эксперименты проводились на сейсмоакустическом полигоне Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН на мысе Шульца, (42° 34.753' с.ш., 131° 9.397' в.д.).



Рис. 3: Прототип волоконно–оптического сейсмоприемника на мысе Шульца (Японское море)

Волоконно–оптический сейсмоприемник размещался в прибрежной зоне на скальном выступе (рис. 3). Источником сейсмоакустической волны являлся низкочастотный гидроакустический излучатель, который погружался с борта дрейфующего судна в заливе Посьета на расстоянии 10 км от берега. Рабочая частота излучателя 22 Гц. Конструкция излучателя обеспечивала эффективную трансформацию энергии гидроакустических волн в энергию сейсмоакустических волн на границе «вода–дно».

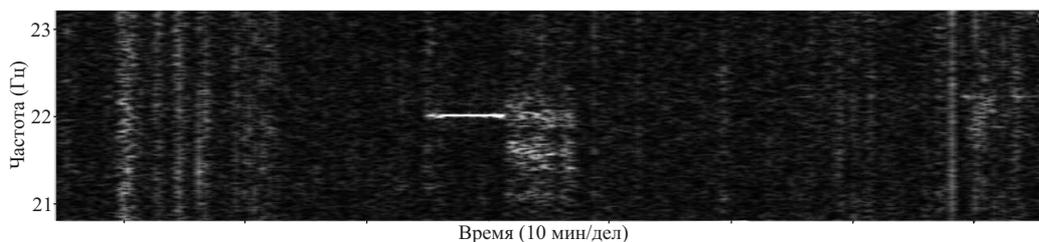


Рис. 4: Спектрограмма выходного сигнала волоконно-оптического сейсмоприемника во время испытаний

На рис.4 представлена спектрограмма выходного сигнала сейсмоприемника, на которой наблюдается сигнал на частоте 22 Гц, который соответствует периоду времени, в течении которого включался гидроакустический излучатель.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в настоящей работе предложены принципы построения переносных быстроразвертываемых высокочувствительных приемников сейсмоакустических сигналов на основе средств волоконной оптики и интерферометрических методов измерений. Показано, что предложенный сейсмоприемник явля-

ется акселерометром. Особенности конструкции чувствительного элемента обеспечивает регистрацию вертикальных колебаний. Пороговая чувствительность изготовленного прототипа акселерометра составляет 10^{-7} м/с². Показано, что при указанной чувствительности волоконно-оптический сейсмоприемник способен регистрировать слабые сейсмоакустические волны, формируемые в переходной зоне суша-море низкочастотным гидроакустическим излучателем на частоте 22 Гц. Представленный сейсмоприемник предназначенного для регистрации низкочастотных акустических сигналов в ледовом покрове.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 16-05-00750 и № 16-29-02082).

- [1] Каменев О. Т., Кульчин Ю. Н., Петров Ю. С., Хижняк Р. В. Письма в ЖТФ. 2014. **40**, № 3. С. 49.
[2] Kamenev O. T., Kulchin Yu. N., Petrov Yu. S., Khiznyak

R. V., Romashko R. V. Sensors and Actuators A. 2016. **244**. P. 133.

Development of physical principles of low-frequency acoustic tomography on the Arctic shelf by fiberoptic seismometers

O. T. Kamenev^a, Y. N. Kulchin^b, Y. S. Petrov, V. A. Kolchinskiy

Institute of Automation & Control Processes, Far-Eastern Branch of RAS, Vladivostok 690041, Russia
E-mail: ^aokamenev@mail.ru, ^bdirector@iacp.dvo.ru

The seismometer based on fiber-optic Mach-Zehnder interferometer is proposed and tested. The sensing element of the seismometer is implemented as a multiturn optical fiber coil which allowed to obtain high responsivity to acceleration in the frequency range 1–2 Hz. Stability of the seismometer operation is provided by feed-back control of the interferometer working point. It is experimentally demonstrated that seismometer is able to reliably detect weak seismic vibration with acceleration amplitude at the level of 10^{-7} m/s².

PACS: 42.81.Pa.

Keywords: seismometer, fiber-optic sensor, Mach-Zehnder interferometer.

Received 17 July 2017.

Сведения об авторах

1. Каменев Олег Тимурович — докт. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: . e-mail: okamenev@mail.ru.
2. Кульчин Юрий Николаевич — академик РАН, докт. физ.-мат. наук, профессор; тел.: (423) 231-04-39, e-mail: director@iacp.dvo.ru.
3. Петров Юрий Сергеевич — канд. техн. наук, науч. сотрудник.
4. Колчинский Владислав Андреевич — мл. науч. сотрудник.