



Пеленгование геосферных возмущений лазерными деформографами

Г. И. Долгих, С. С. Будрин, С. Г. Долгих, В. А. Чупин
Тихоокеанский океанологический институт
им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения
Российской академии наук, Владивосток

Рассмотрены два метода пеленгования геосферных источников колебаний и волн инфразвукового и низкочастотного звукового диапазонов лазерными деформографами. Первый метод основан на предположении, что регистрируемые волновые возмущения относятся к поверхностным волнам рэлеевского типа. В этом случае используется двухкоординатный лазерный деформограф, состоящий из рядом стоящих однокоординатных лазерных деформографов с взаимно-перпендикулярными измерительными плечами. Во втором случае используется триангуляционный метод. В этом методе применяются минимум три пространственно-разнесенных лазерных деформографа.

Ключевые слова: двухкоординатный лазерный деформограф, пространственно-разнесенные лазерные деформографы, пеленгование, триангуляция

Статья получена: 17.11.2021

Статья принята: 02.12.2021

ВВЕДЕНИЕ

Решение задач о мониторинге и определении местоположения различных источников антропогенного и природного происхождения с использованием лазерно-интерференционных методов выполняется с применением комплексного подхода, учитывающего как направленность, так и распределение в пространстве измерительных систем. В нашем случае, для

Direction Finding of Geospheric Disturbances by Laser Strainmeters

G. I. Dolgikh, S. S. Budrin, S. G. Dolgikh, V. A. Chupin
V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch
Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

Two methods of direction finding of geosphere sources of oscillations and waves of infrasonic and low-frequency sound ranges by laser strainmeters are considered. The first method is based on the assumption that the recorded wave disturbances refer to surface waves of the Rayleigh type. In this case, a two-coordinate laser strainmeter is used, which consists of adjacent one-coordinate laser strainmeters with mutually perpendicular measuring arms. In the second case, the triangulation method is used. This method uses a minimum of three spatially separated laser strainmeters.

Keywords: two-coordinate laser strainmeter, spatially separated laser strainmeters, direction finding, triangulation

Article received: 17.11.2021

Article accepted: 02.12.2021

INTRODUCTION

The problems of monitoring and determining the location of various sources of anthropogenic and natural origin using laser interference methods are solved using an integrated approach that takes into account both the directivity and the spatial distribution of measuring systems. In our case, several methods can be used to solve the problem of detecting and determining the location of oscillating sources. The first method consists in using an orthogonal system of laser strainmeters, the second method is based on the use of three or more spaced laser strainmeters having the same directivity.

The first method is based on the assumption of a known polarization of the recorded wave processes. Such well-known polarization signals include seismo-acoustic signals arising at the water-bottom bound-



решения задачи обнаружения и определения местоположения источников колебаний можно использовать несколько методов. Первый метод состоит в использовании ортогональной системы лазерных деформографов, второй метод основан на использовании трех и более разнесенных в пространстве лазерных деформографов, имеющих одинаковую направленность.

Первый метод базируется на предположении об известной поляризации регистрируемых волновых процессов. К таким известным поляризационным сигналам можно отнести сейсмоакустические сигналы, возникающие на границе «вода-дно» в результате трансформации гидроакустических сигналов, создаваемых в воде низкочастотными гидроакустическими излучателями и движущимися подводными и надводными объектами. Впервые возможность отслеживания перемещения источника геосферных возмущений с помощью лазерного деформографа была описана в работе [1], в которой приводилась запись 105-метрового лазерного деформографа, содержащая промодулированные гравитационными морскими волнами сейсмоакустические волны, создаваемые на границе «вода-дно» движущимся надводным судном. По вариациям параметров модуляции в данной записи можно оценивать изменение направления движения судна. Другой тип амплитудной модуляции подводного шумоизлучения морских судов широко используется в настоящее время на практике для их классификации [2]. В работе [3] было показано, что в области низких частот сейсмоакустические поверхностные волны становятся доминирующим механизмом переноса акустической энергии в мелководной шельфовой зоне моря. Экспериментальные исследования сравнительных уровней акустических шумов, регистрируемых гидрофонами и донными геофонами [3], показали, что на мелководном шельфе при частотах ниже 25 Гц в спектре записей гидрофонов наблюдается уменьшение, а в спектре записей геофонов – увеличение уровня спектральных составляющих. Данное поведение зависит от отношения длины гидроакустической волны к глубине моря. При глубинах меньше половины длины гидроакустической волны возникают условия, при которых почти вся гидроакустическая энергия трансформируется в упругие колебания дна, регистрируемые береговым лазерным деформографом [4]. Данные глубины были названы критическими глубинами. В земной коре эти возмущения распространяются в основном в виде

ary as a result of the transformation of sonar signals generated in the water by a low-frequency underwater sound projector and moving underwater and surface objects. For the first time, the ability to track the movement of a source of geospheric disturbances using a laser strainmeter was described in paper [1], in which a record of a 105-meter laser strainmeter was given, containing seismoacoustic waves modulated by gravitational sea waves generated at the “water-bottom” boundary by a moving surface vessel. Variations in the modulation parameters in this record can be used to estimate the change in the direction of the ship’s movement. Another type of amplitude modulation of underwater noise emission from sea vessels is currently widely used in practice for their classification [2]. In paper [3], it was shown that in the low-frequency region, seismoacoustic surface waves become the dominant mechanism for the transfer of acoustic energy in the shallow-water shelf zone of the sea. Experimental studies of comparative levels of acoustic noise recorded by hydrophones and bottom geophones [3] have shown that on the shallow shelf at frequencies below 25 Hz, a decrease is observed in the spectrum of hydrophone records, and an increase in the level of spectral components in the spectrum of geophone records. This behavior depends on the ratio of sonar wavelength to sea depth. At depths less than half the length of the hydroacoustic wave, conditions arise under which almost all of the hydroacoustic energy is transformed into elastic vibrations of the bottom, recorded by a coastal laser strainmeter [4]. These depths have been called critical depths. In the earth’s crust, these disturbances propagate mainly in the form of Rayleigh-type surface waves. This condition can be used for registration and direction finding of such disturbances with a two-coordinate laser strainmeter consisting of two one-coordinate laser strainmeters with almost mutually perpendicular measuring arms installed at Mys Shul’tsa [5].

Not always recorded disturbances can be represented in the form of the Rayleigh-type surface waves. For example, deformation jumps recorded by distant laser strainmeters [6] and which are an unconditional indicator of the occurrence of seabed movements [7] leading to a tsunami cannot be attributed to Rayleigh-type surface waves in any way. Therefore, it is impossible to use the polarization properties of surface waves for their direction finding. For this, the triangulation method, which is based on the use of three or more spatially separated laser strainmeters, is fitting better. This system includes strainmeters described in work [8]. In the second part of the article, using the example of a recording of deformation disturbances

поверхностных волн рэлеевского типа. Это условие можно использовать при регистрации и пеленгования подобных возмущений двухкоординатным лазерным деформографом, состоящим из двух однокоординатных лазерных деформографов с почти взаимно-перпендикулярными измерительными плечами, установленными на м. Шульца [5].

Далеко не всегда регистрируемые возмущения можно представить в виде поверхностных волн рэлеевского типа. Так, например, скачки деформации, регистрируемые удаленными лазерными деформографами [6] и являющиеся безусловным индикатором возникновения подвижек морского дна [7], приводящих к цунами, нельзя никак отнести к поверхностным волнам рэлеевского типа. Поэтому для их пеленгования невозможно использовать поляризационные свойства поверхностных волн. Для этого лучше подходит триангуляционный метод, в основе которого лежит применение трех и более пространственно-разнесенных лазерных деформографов. К такой системе можно отнести деформографы, описанные в работе [8]. Во второй части статьи на примере регистрации деформационных возмущений различного происхождения рассмотрим особенности работы триангуляционного метода пеленгования данными лазерными деформографами.

ПЕЛЕНГОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ДВУХКООРДИНАТНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ДЕФОРМОГРАФОМ

3 июня 2014 года с помощью ортогональной системы лазерных деформографов, направленности «север-юг» и «запад-восток», установленных на МЭС «м. Шульца», удалось в течение длительного времени осуществить сопровождение парома от момента начала его движения из порта Зарубино до максимально возможной дистанции наблюдения. Первичная информация о траектории движения парома была взята с ресурса <http://marinetraffic.com>, предоставляющем данные в открытом доступе о положении судов, зарегистрированных в Автоматической Идентификационной Системе (AIS). На рис. 1 представлены спектрограммы синхронных записей двух деформографов.

Спектрограммы, показанные на рис. 1, имеют длительность 7 ч. с двух деформографов «север-юг» и «запад-восток» в диапазоне 20,5–22 Гц. Время на спектрограммах отсчитывается от начала записи – 8:00 UTC. Стрелками на спектрограммах

of various origins, the features of the triangulation method of direction finding by these laser strainmeters will be considered.

DIRECTION FINDING OF DEFORMATION DISTURBANCES BY A TWO-COORDINATE LASER STRAINMETER

On June 3, 2014, with the help of an orthogonal system of laser strainmeters, directions «north-south» and «west-east», installed at the Mys Shul'tsa Marine Experimental Station, it was possible for a long time to escort the ferry from the moment it began to move from the port of Zarubino to the maximum possible observation distance. The primary information on the trajectory of the ferry was taken from the resource <http://marinetraffic.com>, which provides publicly available data on the position of vessels registered in the Automatic Identification System (AIS). Figure 1 shows spectrograms of synchronous recordings of two strainmeters.

The spectrograms shown in Fig. 1 have a duration of 7 h from two «north-south» and «west-east» strainmeters in the range of 20.5–22 Hz. The time on the spectrograms is counted from the beginning of the recording – 8:00 UTC. The arrows on the spectrograms indicate the times corresponding to the position of the

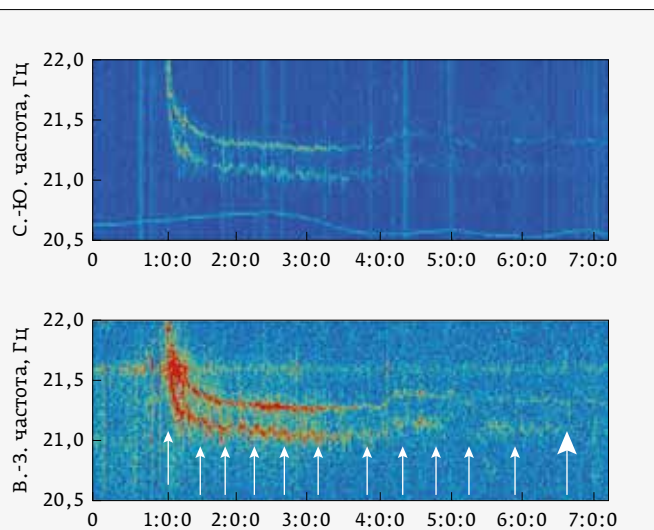


Рис. 1. Спектрограммы записи двухкоординатного лазерного деформографа 3 июня 2014 г. при движении рейсового морского парома (вверху – «север-юг», внизу – «запад-восток»)

Fig. 1. Spectrograms of the recording of a two-coordinate laser strainmeter on June 3, 2014 during the movement of a liner sea ferry (above – «north-south», below – «west-east»)



указаны моменты времени, соответствующие положению судна в точках, помеченных на траектории движения парома, представленной на рис. 2.

Как можно видеть по рис. 1 и рис. 2, частотные треки парома очень хорошо видны на спектрограммах обоих деформографов вплоть до точки поворота 7, после чего становятся менее контрастными, однако прослеживаются весьма уверенно вплоть до маркерной точки 9–12:00 UTC, соответствующей удалению судна от м. Шульца на 156 км. С учетом диаграммы направленности лазерных деформографов [14, 17] была исследована возможность использования двухкоординатного лазерного деформографа для определения направления на движущееся судно. При выполнении расчетов в соответствии с [1, 5] считалось, что основные смещения устоев деформографов вызваны поверхностными волнами рэлеевского типа. При расчете будем учитывать только составляющую волны, ориентированную вдоль направления распространения волны. Сначала расчеты проведем при условии, что угол направления на источник находится между осями лазерных деформографов «север-юг» и «запад-восток» (положение маркерной точки 1). Проекция составляющих, ориентированных по направлению распространения волны, на оси лазерных деформографов «север-юг» и «запад-восток» будут равны:

$$A(1,1) = A(1)\cos(\alpha_1 - \gamma_1), \quad (1)$$

$$A(2,1) = A(2)\cos(\alpha_2 - \gamma_1), \quad (2)$$

где: γ_1 – угол направления на источник, отсчитываемый от направления на север по часовой стрелке, $A(1,1)$ и $A(2,1)$ – амплитуды на частоте анализируемого сигнала, полученные при спектральной обработке записей лазерных деформографов «север-юг» и «запад-восток» при нахождении парома в точке 1, $A(1)$ и $A(2)$ – «истинная» амплитуда смещения частиц среды, приведенная к длине базы лазерных деформографов «север-юг» и «запад-восток»,

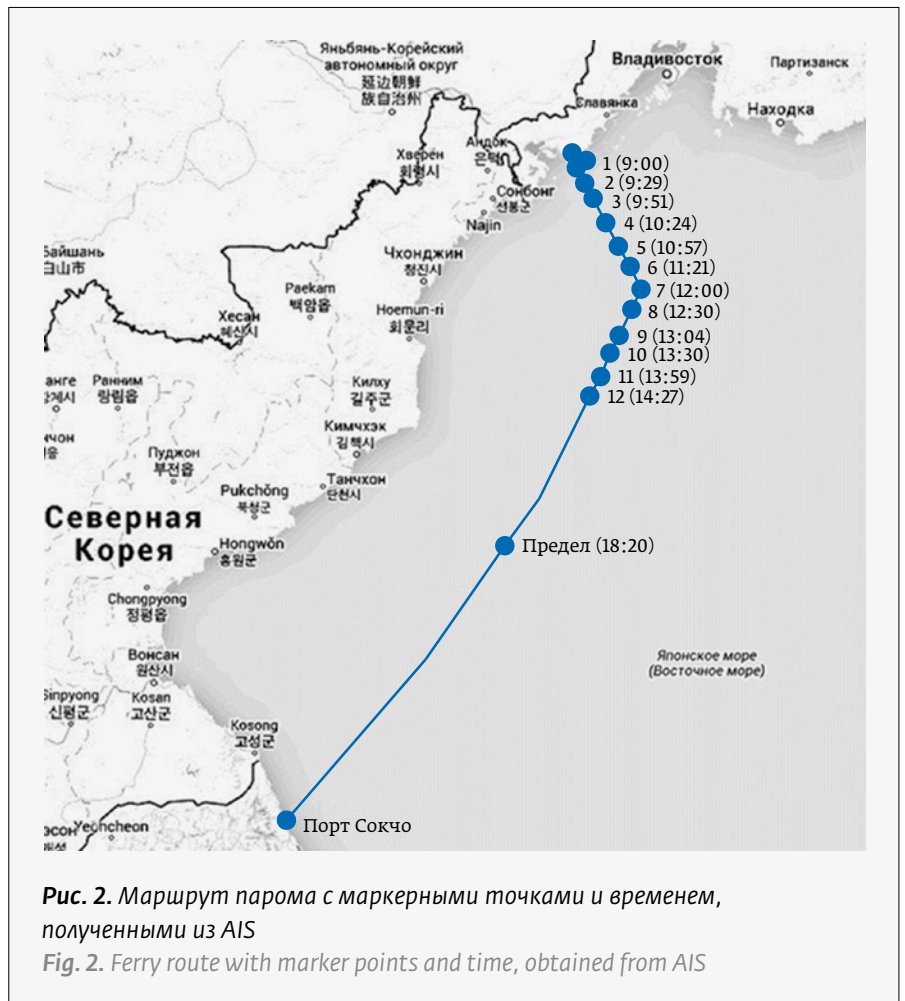


Рис. 2. Маршрут парома с маркерными точками и временем, полученными из AIS

Fig. 2. Ferry route with marker points and time, obtained from AIS

vessel at the points marked on the trajectory of the ferry, shown in Fig. 2.

As can be seen from Figs. 1 and 2, the frequency tracks of the ferry are very clearly visible on the spectrograms of both strainmeters up to the turning point 7, after which they become less contrasting, but they can be traced very confidently up to the marker point 9–12:00 UTC, corresponding to the distance of the vessel from Mys Shul'tsa at 156 km. Taking into account the directive pattern of laser strainmeters [14, 17], the possibility of using a two-coordinate laser strainmeter to determine the direction of a moving vessel was investigated. When performing calculations, in accordance with [1, 5], it was assumed that the main displacements of the abutments of the strainmeters are caused by the Rayleigh-type surface waves. When calculating, we will take into account only the wave component oriented along the direction of wave propagation. First, we will carry out the calculations under the condition that the angle of direction to the source is between the “north-south” and “west-east” axes of the laser strainmeters (marker

при нахождении парома в точке 1, α_1 и α_2 – углы между осями лазерных деформографов «север-юг» и «запад-восток» и направлением на север (198°).

Учитывая то, что $A(1)/A(2)=2,8$, и раскладывая косинусы в уравнениях (1) и (2), имеем:

$$\frac{A(1,1)}{2,8 \cdot A(2)} = \cos(\alpha_1)\cos(\gamma_1) + \sin(\alpha_1)\sin(\gamma_1), \quad (3)$$

где:

$$A(2) = \frac{A(2,1)}{\cos(\alpha_1)\cos(\gamma_1) + \sin(\alpha_1)\sin(\gamma_1)}. \quad (4)$$

При подстановке (4) в (3) после несложных преобразований получаем:

$$\gamma_1 = \arctg \frac{\left\{ \frac{A(1,1)\cos(\alpha_2)}{2,8 \cdot A(2,1)} - \cos(\alpha_1) \right\}}{\left\{ \sin(\alpha_1) - \frac{A(1,1)\sin(\alpha_2)}{2,8 \cdot A(2,1)} \right\}}. \quad (5)$$

Далее расчеты проводятся при условии, что угол направления на источник находится восточнее оси лазерного деформографа «север-юг» (положение маркерных точек 2-11). В этом случае проекции составляющей, ориентированной по направлению распространения волны, на оси лазерных деформографов будет равна:

$$A(1, i+1) = A(1)\cos(\alpha_1 - \gamma_{i+1}), \quad (6)$$

$$A(2, i+1) = A(2)\cos(180^\circ - (\alpha_1 - \gamma_{i+1})), \quad (7)$$

где: γ_1 и γ_{i+1} – углы направления на источник, отсчитываемый от направления на север для $i+1$ точки, $A(1, i+1)$ и $A(2, i+1)$ – амплитуды на частоте анализируемого сигнала, полученные при спектральной обработке записей лазерных деформографов «север-юг» и «запад-восток» при нахождении парома в маркерной точке ($i+1$), $A(1)$ и $A(2)$ – «истинная» амплитуда смещения частиц среды, приведенная к длине базы лазерных деформографов «север-юг» и «запад-восток», при нахождении парома в точке $i+1$. Решая систему уравнений (6) и (7) и с учетом того, что $A(1)/A(2)=2,8$, получаем:

$$\gamma_{i+1} = \arctg \left[- \frac{\left\{ \frac{A(1, i+1)\cos(\alpha_2)}{2,8 \cdot A(2, i+1)} + \cos(\alpha_1) \right\}}{\left\{ \frac{A(1, i+1)\sin(\alpha_2)}{2,8 \cdot A(2, i+1)} + \sin(\alpha_1) \right\}} \right], \quad (8)$$

point position 1). The projections of the components oriented in the direction of wave propagation on the “north-south” and “west-east” axis of the laser strainmeters will be equal:

$$A(1,1) = A(1)\cos(\alpha_1 - \gamma_1), \quad (1)$$

$$A(2,1) = A(2)\cos(\alpha_2 - \gamma_1), \quad (2)$$

where: γ_1 is the angle of direction to the source, measured from the north direction clockwise, $A(1,1)$ and $A(2,1)$ are the amplitudes at the frequency of the analyzed signal, obtained during spectral processing of the records of “north-south” and “west-east” laser strainmeters, when the ferry is at point 1, $A(1)$ and $A(2)$ are the “true” amplitude of the displacement of the particles of the medium, reduced to the length of the base of the “north-south” and “west-east” laser strainmeters, when the ferry is at point 1, α_1 and α_2 are the angles between axes of the “north-south” and “west-east” laser strainmeters and the north direction (198°).

Taking into account that $A(1)/A(2)=2,8$, and expanding the cosines in equations (1) and (2), we have:

$$\frac{A(1,1)}{2,8 \cdot A(2)} = \cos(\alpha_1)\cos(\gamma_1) + \sin(\alpha_1)\sin(\gamma_1), \quad (3)$$

where:

$$A(2) = \frac{A(2,1)}{\cos(\alpha_1)\cos(\gamma_1) + \sin(\alpha_1)\sin(\gamma_1)}. \quad (4)$$

When substituting (4) into (3) after simple transformations, we obtain:

$$\gamma_1 = \arctg \frac{\left\{ \frac{A(1,1)\cos(\alpha_2)}{2,8 \cdot A(2,1)} - \cos(\alpha_1) \right\}}{\left\{ \sin(\alpha_1) - \frac{A(1,1)\sin(\alpha_2)}{2,8 \cdot A(2,1)} \right\}}. \quad (5)$$

Further calculations are carried out under the condition that the angle of direction to the source is east of the axis of the “north-south” laser strainmeter (position of marker points 2-11). In this case, the projection of the component oriented in the direction of wave propagation on the axis of the laser strainmeters will be equal to:

$$A(1, i+1) = A(1)\cos(\alpha_1 - \gamma_{i+1}), \quad (6)$$

$$A(2, i+1) = A(2)\cos(180^\circ - (\alpha_1 - \gamma_{i+1})), \quad (7)$$

После анализа результатов расчетов были выявлены некоторые погрешности в значениях углов с реальным направлением движения источника. Причина этого может быть связана с распространением сигналов от паромов до лазерного деформографа. Рассмотрим два возможных случая распространения:

1. Излученный паромом сигнал захватывается звуковым каналом и распространяется по нему до глубин 35 м (примерно половина длины волны на частоте 21,5 Гц при скорости 1500 м/с), а далее сигнал до лазерного деформографа распространяется только по границе «вода-дно» в виде волны Рэлея поверхностного типа цилиндрической расходимости. Конечно, излученный паромом сигнал на шельфе начинает взаимодействовать с дном раньше, но мы не знаем глубины расположения оси звукового канала, поэтому будем считать, что излученный паромом сигнал распространяется по границе «вода-дно» до лазерного деформографа начиная с глубин 35 м, а по воде не распространяется.
2. При отсутствии звукового канала сигнал, созданный паромом, по закону сферической расходимости распространяется до дна, а далее сигнал до лазерного деформографа распространяется по границе «вода-дно» в виде волны Рэлея поверхностного типа цилиндрической расходимости. Несмотря на это, метод определения направления на источник с помощью системы ортогональных лазерных деформографов дает вполне хорошие результаты.

ПЕЛЕНГОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ТРИАНГУЛЯЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Теперь рассмотрим метод обнаружения источника колебаний с использованием пространственно-разнесенной системы из нескольких лазерных деформографов. В данный момент мы имеем такую систему, состоящую из трех лазерных деформографов. Лазерные деформографы располагаются: м. Шульца, Приморский край; м. Свободный, о. Сахалин; г. Краснокаменск, Забайкальский край. Данный метод – метод триангуляции – не является новым и повсеместно применяется в современной жизни, в том числе и в системах геопозиционирования, однако применение его для нахождения источника с помощью лазерно-

where: γ_1 and γ_{i+1} are the angles of direction to the source, measured from the north direction for $i+1$ point, $A(1, i+1)$ and $A(2, i+1)$ are the amplitudes at the frequency of the analyzed signal, obtained by spectral processing of records of “north-south” and “west-east” laser strainmeters, when the ferry is at the marker point ($i+1$), $A(1)$ and $A(2)$ are the “true” amplitude of displacement of the medium particles, reduced to the length of the base of the “north-south” and “west-east” laser strainmeters, when the ferry is at $i+1$ point. Solving the system of equations (6) and (7) and taking into account the fact that $A(1)/A(2)=2.8$, we obtain:

$$\gamma_{i+1} = \arctg \left[- \frac{\left\{ \frac{A(1, i+1) \cos(\alpha_2)}{2,8 \cdot A(2, i+1)} + \cos(\alpha_1) \right\}}{\left\{ \frac{A(1, i+1) \sin(\alpha_2)}{2,8 \cdot A(2, i+1)} + \sin(\alpha_1) \right\}} \right], \quad (8)$$

After analyzing the calculation results, some errors were revealed in the values of the angles with the real direction of the source movement; this may be due to the propagation of signals from the ferry to the laser strainmeter. Let's consider two possible cases of propagation:

1. The signal emitted by the ferry is captured by the sound channel and propagates through it to a depth of 35 m (approximately half the wavelength at a frequency of 21.5 Hz at a speed of 1500 m/s), and then the signal to the laser strainmeter propagates only along the “water-bottom” boundary in the form of a Rayleigh wave of the surface type of cylindrical divergence. Of course, the signal emitted by the ferry on the shelf begins to interact with the bottom earlier, but we do not know the depth of the location of the axis of the sound channel, so we will assume that the signal emitted by the ferry propagates along the “water-bottom” boundary to the laser strainmeter starting from a depth of 35 m, and does not propagate through the water.
2. In the absence of a sound channel, the signal generated by the ferry, according to the law of spherical divergence, propagates to the bottom, and then the signal to the laser strainmeter propagates along the “water-bottom” boundary in the form of a Rayleigh wave of the surface type of cylindrical divergence. Despite this, the method of determining the direction to the source using a system of orthogonal laser strainmeters gives quite good results.

интерференционных приборов обсуждается впервые.

Допустим, что мы имеем источник колебаний естественного или антропогенного характера в акватории Японского моря. Источниками данных колебаний могут быть подводные взрывы, землетрясения, тайфуны, аномально большие волны и т.п. Будем считать, что колебания от источника проникают в верхний слой земной коры и распространяются до точек приема со средней скоростью 2 км/с. Зададим на карте произвольную точку в Японском море, в которой предположительно находится источник колебаний. Расстояния от источника до точек приема следующие: «Источник – м. Шульца» – 640 км, «Источник – м. Свободный» – 1484 км, «Источник – Краснокаменск» – 1818 км. Тогда время прихода до каждой точки приема: «Источник – м. Шульца» – $640/2=320$ с, «Источник – м. Свободный» – $1484/2=742$ с, «Источник – Краснокаменск» – $1818/2=909$ с. Учитывая, что в точку «м. Шульца» колебания придут первыми, то считаем эту точку за нулевую отметку, тогда времена распространения до остальных точек будут следующие: «м. Шульца» – 0 с, «м. Свободный» – $742-320=422$ с, «Краснокаменск» – $909-320=589$ с.

Произведем расчет направления на источник по трассе распространения «м. Шульца – м. Свободный». Для этого начертим 2 круга с центром в точке «м. Шульца» радиусом 1000 и 1200 км. Вычисляем расстояние с учетом времени распространения от «м. Шульца» до «м. Свободный» $422 \cdot 2=844$ км. Далее чертим 2 круга с центром в точке «м. Свободный» радиусом $1000+844=1844$ км и $1200+844=2044$ км. По пересечениям окружностей чертим 2 направления на источник (зеленые линии).

Как можно увидеть из рис. 3, были получены два направления на источник, при этом одно из них является истинным, а второе ложным. Ложное направление на источник при дальнейших расчетах будет исключено.

Произведем расчет направления на источник по трассе распространения «м. Шульца – Краснокаменск». Чертим 2 круга с центром в точке «м. Шульца»

DIRECTION FINDING OF DEFORMATION DISTURBANCES BY TRIANGULATION METHOD

Now we will consider a method for detecting an oscillation source using a spatially spaced system of several laser strainmeters. At the moment we have such a system consisting of three laser strainmeters. Laser strainmeters are located at Mys Shul'tsa, Primorsky Krai; Mys Svobodny, Sakhalin; Krasnokamensk, Trans-Baikal Territory. This method, the triangulation method is not new and is widely used in modern life, including in geolocation systems, but its use for finding a source using laser interference devices is discussed for the first time.

Let's assume that we have a source of fluctuations of a natural or anthropogenic nature in the waters of the Sea of Japan. The sources of these vibrations can be underwater explosions, earthquakes, typhoons, abnormally large waves, etc. Let's assume that vibrations from the source penetrate into the upper layer of the earth's crust and propagate to the receiving points at an average speed of 2 km/s. Let's set an arbitrary point on the map in the Sea of Japan, where the oscillating source is supposedly located. The distances from the source to the receiving points are as follows: Source – Mys Shul'tsa – 640 km, Source – Mys Svobodny – 1484 km, Source – Krasnokamensk – 1818 km. Then the time of arrival to each receiving point: Source – Mys Shul'tsa – $640/2 = 320$ s, Source – Mys Svobodny – $1484/2 = 742$ s, Source – Krasnokamensk – $1818/2 = 909$ s. Considering that the oscillations will come to the point Mys Shul'tsa first, then we consider this point as the zero mark, then

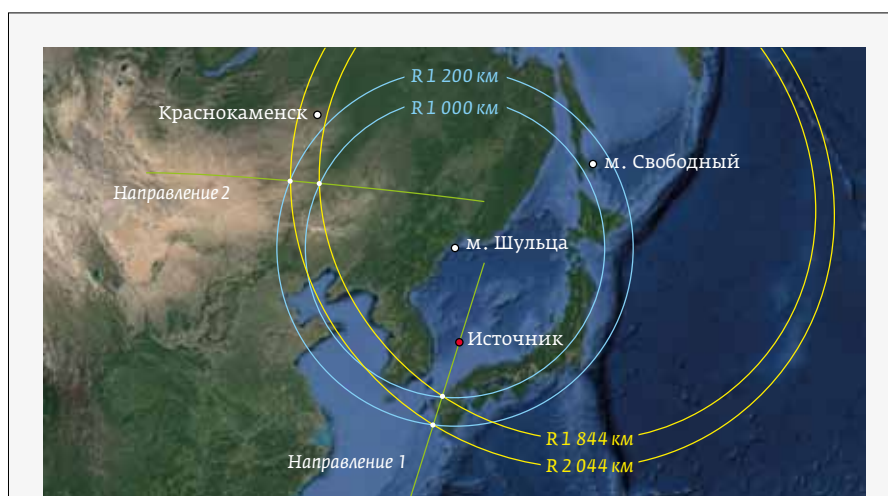


Рис. 3. Схема расчета направления на источник по трассе «Шульца – м. Свободный»

Fig. 3. Scheme for calculating the direction to the source along the trace "с. Schultz – с. Svobodny"

радиусом 1000 и 1200 км. Время прихода волны от «м. Шульца» до «Краснокаменск» составляет 589 с. Расстояние с учетом времени распространения от «м. Шульца» до «Краснокаменск» $589 \cdot 2 = 1178$ км. Чертим 2 круга с центром в точке «Краснокаменск» радиусом $1000 + 1178 = 2178$ км и $1200 + 1178 = 2378$ км. По пересечениям окружностей чертим 2 направления на истинный источник (красные линии).

На рис. 4 два направления пересекаются, соответственно они являются истинными, два остальных направления убираем как ложные.

Рассчитываем направление на источник по трассе «м. Свободный – Краснокаменск». Чертим 2 круга с центром в точке «м. Свободный» радиусом 1000 и 1200 км. Вычисляем расстояние с учетом времени распространения ($589 - 422 = 167$ с) от «м. Свободный» до «Краснокаменск» $167 \cdot 2 = 334$ км. Чертим 2 круга с центром в точке «Краснокаменск» радиусом $1000 + 334 = 1334$ км и $1200 + 334 = 1534$ км. По пересечениям окружностей чертим направление на истинный источник (фиолетовая линия).

На рис. 5 видно, что направления пересекаются в одной точке, данная точка пересечения и будет являться местоположением источника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлено несколько методов определения направления и местоположения источников колебаний естественного и антропогенного происхождения с помощью систем, состоящих из нескольких лазерных деформографов.

При использовании ортогональной системы направленных лазерных деформографов ошибка в определении направления на источник находится в пределах от 0.2% до 16.5%. При этом, как ожидалось, максимальные ошибки связаны с движением парама на мелкой воде

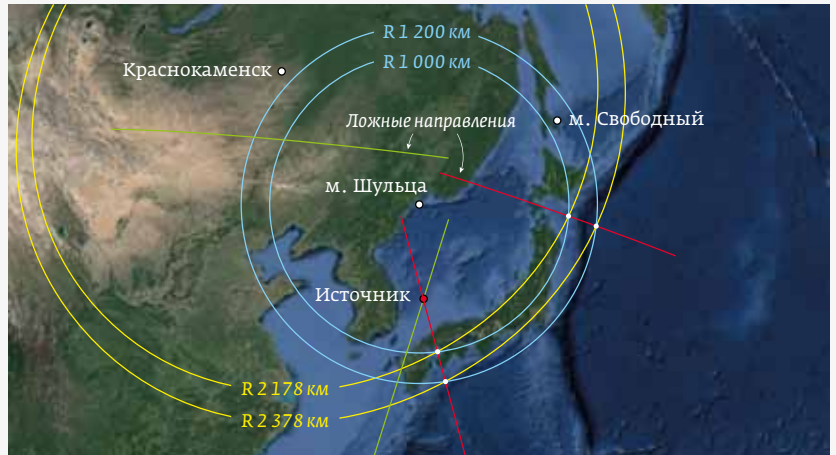


Рис. 4. Схема расчета направления на источник по трассе «м. Шульца – Краснокаменск»

Fig. 4. Scheme for calculating the direction to the source along the trace “с. Schultz – Krasnokamensk”

the propagation times to the remaining points will be as follows: Mys Shul'tsa – 0 s, Mys Svobodny – $742 - 320 = 422$ s, Krasnokamensk – $909 - 320 = 589$ s.

Let's calculate the direction to the source along the Mys Shul'tsa – Mys Svobodny propagation path. To do this, draw 2 circles with the center at the point Mys Shul'tsa point with a radius of 1000 and 1200 km. We calculate the distance taking into account the propagation time from Mys Shul'tsa to Mys Svobodny $422 \cdot 2 = 844$ km.

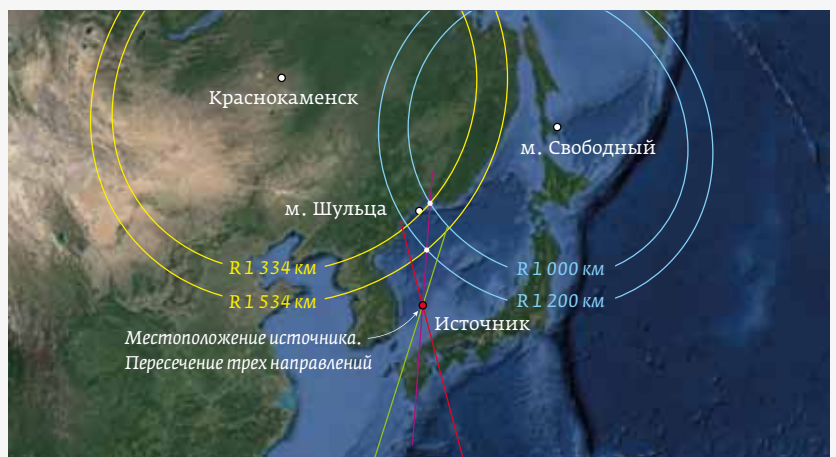


Рис. 5. Схема расчета направления на источник по трассе «м. Свободный – Краснокаменск»

Fig. 5. Scheme for calculating the direction to the source along the trace “с. Svobodny – Krasnokamensk”



(длина гидроакустической волны на частоте 20 Гц равна около 75 м). Снизить погрешность может применение третьей оси – вертикальной. Существенный вклад в ошибку вносят особенности трансформации гидроакустических волн на границе «вода-дно» и преобразования их энергии в энергию волн рэлеевского типа, распространяющихся по границе «вода-дно», а также различных других волн (продольных и поперечных, волн Стоунли и Лява). Учет всех особенностей возможен только при точном знании о структуре морского дна и характеристиках пород морского дна, угла наклона морского дна и т. п., чем на данный момент авторы не располагают. После проведения ряда экспериментальных работ по определению упругих параметров морского дна и построения его акустической модели можно более точно решить задачу по пеленгу надводного судна. Плюсом данного метода является нахождение системы лазерных деформографов в одной точке, что является преимуществом перед распределенными системами деформографов.

Пространственно-разнесенные системы лазерных деформографов обладают большей точностью определения местоположения источника, а при использовании большего количества измерительных станций, распределенных в пространстве, точность будет увеличиваться. Основной погрешностью в данном методе выступает изотропность и состав среды распространения регистрируемых колебаний. Так, для волн Рэля в разных материалах скорость распространения может варьироваться в больших пределах, что может создавать существенные ошибки в определении местоположения источника. Не исключено и то, что на трассе распространения колебаний от одной точки измерения до другой могут находиться геологические аномалии, которые не позволят использовать данный метод. В связи с этим установка лазерных деформографов должна осуществляться в местах с заранее известной и хорошо исследованной геологической структурой по направлениям распространения колебаний от одной точки измерений до другой.

Источник финансирования. Исследования выполнены за счет средств Министерства науки и высшего образования (тема госзадания «Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей в Мировом океане»).

Next, draw 2 circles with the center at the point Mys Svobodny with a radius of $1000+844=1844$ km and $1200+844=2044$ km. At the intersections of the circles, draw 2 directions to the source (green lines).

As you can see from Fig. 3, two directions to the source were received, one of them being true and the other false. A false direction to the source will be excluded in further calculations.

Let's calculate the direction to the source along the Mys Shul'tsa – Krasnokamensk propagation path. Draw 2 circles with the center at the Mys Shul'tsa point with a radius of 1000 and 1200 km. The arrival time of the wave from Mys Shul'tsa to Krasnokamensk is 589 s. The distance taking into account the propagation time from Mys Shul'tsa to Krasnokamensk $589 \cdot 2 = 1178$ km. We draw 2 circles with the center at the Krasnokamensk point with a radius of $1000+1178=2178$ km and $1200+1178=2378$ km. At the intersections of the circles, draw 2 directions to the true source (red lines).

In Fig. 4, two directions intersect, respectively, they are true, the other two directions are removed as false.

We calculate the direction to the source along the Mys Svobodny – Krasnokamensk propagation path. Draw 2 circles with the center at the Mys Svobodny point with a radius of 1000 and 1200 km. We calculate the distance taking into account the propagation time ($589-422=167$ s) from Mys Svobodny to Krasnokamensk $167 \cdot 2 = 334$ km. We draw 2 circles with the center at the Krasnokamensk point with a radius of $1000+334=1334$ km and $1200+334=1534$ km. At the intersections of the circles, draw the direction to the true source (purple line).

In Fig. 5 it can be seen that the directions intersect at one point, this intersection point will be the location of the source.

CONCLUSION

This paper presents several methods for determining the direction and location of oscillating sources of natural and anthropogenic origin, using systems consisting of several laser strainmeters.

When using an orthogonal system of directed laser strainmeters, the error in determining the direction to the source ranges from 0.2% to 16.5%. At the same time, as expected, the maximum errors are associated with the movement of the ferry in shallow water (the length of the hydroacoustic wave at a frequency of 20 Hz is about 75 m). The use of the third axis – the vertical one – can reduce the error. A significant contribution to the error is made by the features of the transformation of hydroacoustic waves at the “water-bottom” boundary and the conversion of their energy into the energy of Rayleigh-type waves propagating



REFERENCES

- Dolgikh G. I., Kopvillem U. Kh., Pavlov A. N.** Measurement of the Earth free oscillation periods with a laser strainmeter. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Fizika Zemli*. 1983;2:15–20.
Долгих Г. И., Копвиллем У. Х., Павлов А. Н. Наблюдение периодов собственных колебаний Земли лазерным деформометром. *Известия АН СССР. Физика Земли*, 1983;(2):15–20.
- Машошин А. И.** Оптимизация устройства обнаружения и измерения параметров амплитудной модуляции подводного шумоизлучения морских судов. *Акустический журнал*. 2013; 59(3):347–353. DOI: 10.7868/S0320791913030106.
Mashoshin A. I. Optimizatsiya ustrojstva obnaruzheniya i izmereniya parametrov amplitudnoj modulyatsii podvodnogo shumozlucheniya morskikh sudov. *Acoustical physics*. 2013; 59(3):347–353. DOI: 10.7868 / S0320791913030106.
- Akal T., Jensen F. B.** Ocean seismoacoustic propagation – Progr. Congr. Acoust. Symp. Underwater Acoust. Halifax. London. 1987, p. 493–500.
- Dolgikh G. I., Piao Shengchun, Budrin S. S., Song Yang, Dolgikh S. G., Chupin V. A., Yakovenko S. V., Dong Yang, Wang Xiaohan.** Study of Low-Frequency Hydroacoustic Waves' Behavior at the Shelf of Decreasing Depth. *Applied Sciences Basel*. 2020; 10(9): 3183. DOI: 10.3390/app10093183.
- Dolgikh G. I., Kovalev S. N., Koren' I. A., and Ovcharenko V. V.** A Two-Coordinate Laser Strainmeter. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 1988; 34(11): 946–950.
Долгих Г. И., Ковалев С. Н., Корень И. А., Овчаренко В. В. Двухкоординатный лазерный деформограф. *Физика Земли*. 1998; 34(11): 76–81.
- Dolgikh G. I., Dolgikh S. G., Kovalev S. N., Koren I. A., Ovcharenko V. V., Chupin V. A., Shvets V. A., Yakovenko S. V.** Recording of deformation anomaly of a tsunamigenous earthquake using a laser strainmeter. *Doklady Earth Sciences*. 2007; 412(1):74–76.
Долгих Г. И., Долгих С. Г., Ковалев С. Н., Корень И. А., Овчаренко В. В., Чупин В. А., Шве́ц В. А., Яковенко С. В. Регистрация деформационной аномалии цунамигенного землетрясения лазерным деформографом. *Доклады Академии наук*. 2007; 412(1):104–106.
- Dolgikh G. I., Dolgikh S. G., Kovalev S. N., Ovcharenko V. V., Chupin V. A., Shvets V. A., Yakovenko S. V.** A deformation method of tsunamigenic earthquakes definition. *Doklady Earth Sciences*. 2007; 417(1):1261–1264.
Долгих Г. И., Долгих С. Г., Ковалев С. Н., Корень И. А., Овчаренко В. В., Чупин В. А., Шве́ц В. А., Яковенко С. В. Деформационный метод определения цунамигенности землетрясений. *Доклады Академии наук*. 2007; 417(1): 109–112.
- Dolgikh G. I., Budrin S. S., Dolgikh S. G., Zakurko A. G., Kosarev O. V., Ovcharenko V. V., Plotnikov A. A., Chupin V. A., Shvets V. A., Yakovenko S. V.** *Measurement Techniques*. 2016; 59(3): 252–255.
Долгих Г. И., Будрин С. С., Долгих С. Г., Закурко А. Г., Косарев О. В., Овчаренко В. В., Плотников А. А., Чупин В. А., Шве́ц В. А., Яковенко С. В. Комплексный пространственно-разностный полигон на Дальнем Востоке для геонаблюдений. *Измерительная техника*. 2016;59(3): 34–36.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

- Григорий Иванович Долгих, д. ф. - м. н., академик РАН, dolgikh@poi.dvo.ru; Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Владивосток, Россия.
ORCID: 0000-0002-2806-3834
- Станислав Григорьевич Долгих, к. ф. - м. н., sdolgikh@poi.dvo.ru; Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН, Владивосток, Россия.
ORCID: 0000-0001-9828-5929
- Владимир Александрович Чупин, к. ф. - м. н., chupin@poi.dvo.ru; Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия.
ORCID: 0000-0001-5103-8138
- Сергей Сергеевич Будрин, ss_budrin@mail.ru; Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия.
ORCID: 0000-0001-7462-9459

along the “water-bottom” boundary, as well as various other waves (longitudinal and transverse, Stoneley and Love waves). Taking into account all the features is possible only with accurate knowledge of the structure of the seabed and characteristics of the seabed rocks, the angle of inclination of the seabed, etc., which the author does not currently have. After carrying out a number of experimental works to determine the elastic parameters of the seabed and build its acoustic model, it is possible to more accurately solve the problem of the direction finding of a surface vessel. The advantage of this method is finding the system of laser strainmeters at one point, which is an advantage over distributed systems of strainmeters.

Spatially separated systems of laser strainmeters have higher accuracy in determining the location of the source, and with the use of a larger number of measuring stations distributed in space, the accuracy will increase. The main error in this method is the isotropy and composition of the propagation medium of the recorded oscillations. For example, for Rayleigh waves in different materials, the propagation velocity can vary within wide limits, which can create significant errors in determining the location of the source. It is also possible that geological anomalies can be found on the path of propagation of oscillations from one measurement point to another, which will not allow the use of this method. In this regard, the installation of laser strainmeters should be carried out in places with a previously known and well-studied geological structure along the directions of propagation of oscillations from one measurement point to another.

Source of financing: The research was carried out at the expense of the Ministry of Science and Higher Education (the topic of the state assignment “Studying the fundamental principles of the origin, development, transformation, and interaction of hydroacoustic, hydrophysical and geophysical fields in the World Ocean”).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

- Grigory Ivanovich Dolgikh, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences, dolgikh@poi.dvo.ru; V. I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia.
ORCID: 0000-0002-2806-3834
- Stanislav Grigorievich Dolgikh, Cand. of Physical and Mathematical Sciences, sdolgikh@poi.dvo.ru; V. I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia.
ORCID: 0000-0001-9828-5929
- Vladimir Alexandrovich Chupin, Cand. of Physical and Mathematical Sciences, chupin@poi.dvo.ru; V. I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia.
ORCID: 0000-0001-5103-8138
- Sergey Budrin, ss_budrin@mail.ru; V. I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia.
ORCID: 0000-0001-7462-9459