

ТЕОРИЯ И ТЕХНИКА РАДИОСВЯЗИ

Научно-технический
журнал

№ 4/2021

Воронеж 2021

Главный редактор

докт. техн. наук, проф.
В.И. НИКОЛАЕВ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Председатель

докт. техн. наук, проф., академик РАН
В.И. БОРИСОВ

Заместитель председателя

докт. техн. наук, проф.
В.И. НИКОЛАЕВ

Члены редакционного совета

докт. техн. наук, доцент

М.Л. АРТЕМОВ (г. Воронеж)

докт. техн. наук, доцент

Р.Ю. БОРОДУЛИН (г. Санкт-Петербург)

докт. физ.-мат. наук, проф., академик РАН

А.С. БУГАЕВ (г. Москва)

докт. физ.-мат. наук, проф., академик РАН

Ю.В. ГУЛЯЕВ (г. Москва)

докт. техн. наук, проф.

В.В. ЗЕЛЕНЕВСКИЙ (г. Серпухов)

докт. техн. наук, проф.

Ю.Л. КОЗИРАЦКИЙ (г. Воронеж)

докт. техн. наук, проф., академик РАН

Н.А. КУЗНЕЦОВ (г. Москва)

докт. физ.-мат. наук, проф.

Ю.Б. НЕЧАЕВ (г. Воронеж)

докт. техн. наук, проф.

В.Н. ПОВЕТКО (г. Воронеж)

докт. техн. наук, проф.

А.Ю. САВИНКОВ (г. Воронеж)

докт. физ.-мат. наук, проф., академик РАН

А.С. СИГОВ (г. Москва)

докт. техн. наук, доцент

Н.М. ТИХОМИРОВ (г. Воронеж)

докт. техн. наук, проф.

В.А. ЦИМБАЛ (г. Серпухов)

Научно-технический журнал «Теория и техника радиосвязи» издаётся с 1966 года. Выходит 4 раза в год. В журнале публикуются статьи ведущих специалистов, докторантов и аспирантов АО «Концерн «Созвездие» (Воронежского НИИ связи) и отрасли по общим вопросам радиосвязи, теоретическим и экспериментальным исследованиям в области передачи непрерывных и дискретных сообщений, проблемам помехоустойчивости и методам передачи информации в условиях высокоорганизованного радиопротиводействия; особенностям построения различных видов систем связи с использованием узкополосных и широкополосных шумоподобных сигналов; вопросам разработки методов совмещения телекоммуникационных, измерительных и управляющих систем, а также другим вопросам областей исследований, соответствующих группе специальностей 2.2. «Электроника, фотоника, приборостроение и связь».

Журнал входит в Перечень изданий, рекомендуемых ВАК РФ
для опубликования основных результатов диссертаций
на соискание учёной степени доктора и кандидата наук.

Учредитель и издатель:

АО «Концерн «Созвездие»

Издание зарегистрировано
в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-36740 от 1 июля 2009 г.

Подписной индекс
в Объединённом каталоге «Пресса России»
№ 72972

Страница в Интернете:
http://www.sozvezdie.su/science/nauchnotekhnicheskij_zhurnal/

Набор и верстка компьютерные
Формат 60×88 $\frac{1}{8}$. Уч.-изд. л. 0,9
Тираж 200 экз. Заказ № 254
Подписано в печать: 22.11.2021
Выход в свет: 29.11.2021
Цена свободная.

© АО «Концерн «Созвездие», 2021

СОДЕРЖАНИЕ

№ 4, 2021

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ РАДИОСВЯЗИ

Применение технологий искусственного интеллекта в автоматизированных системах управления и радиосвязи

М.Л. Артемов 5

К вопросу о моделировании сетецентрического управления боевыми действиями в тактическом звене

И.В. Владимиров, А.А. Ерыгин, М.В. Богатырев, С.А. Житенёв, А.М. Сепкин 18

Подход к оценке возможностей системы связи авиационного формирования

Е.В. Головченко, В.А. Комогорцев, Е.В. Гуриков 23

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВ РАДИОСВЯЗИ

Разработка и исследование штыревых антенн с повышенной механической прочностью

В.В. Блинов, В.И. Николаев, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин 28

Исследование возможности использования искусственных нейронных сетей при назначении радиочастот подвижным комплексам средств связи

И.В. Владимиров, М.В. Богатырев, В.П. Пустовит, Ф.П. Астапенко, С.А. Житенёв... 44

Обнаружение и локация наземных подвижных объектов с использованием спектрально-поляризационного метода

В.И. Доброродный, О.А. Копылова, М.С. Хайретдинов, Д.В. Костин 48

Многоканальный обнаружитель шумоподобного сигнала с принятием решения по максимальному каналу

И.И. Малышев, Ю.В. Сидоров, В.И. Шестопалов, А.И. Мордовин 58

Перспективные многолучевые антенные системы полноазимутального и полусферического обзора для мобильных телефонов

Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, С.М. Федоров 66

УДК 527.62: 534.2: 519.254

ОБНАРУЖЕНИЕ И ЛОКАЦИЯ НАЗЕМНЫХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕКТРАЛЬНО-ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО МЕТОДА¹

© Авторы, 2021

В.И. Добrorодный, аспирант, e-mail: Dobrorodny@bk.ru

О.А. Копылова, инженер, e-mail: oksana@opg.sssc.ru

М.С. Хайретдинов, д.т.н., профессор, г.н.с., e-mail: marat@opg.sssc.ru

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН

Д.В. Костин, д.ф.-м.н., начальник отдела, АО «Концерн «Созвездие», e-mail: d.v.kostin@sozvezdie.su

Рассматривается задача пассивного геофизического мониторинга подвижных механизированных объектов на фоне помех в текущие моменты времени с использованием трёхкомпонентной регистрации сейсмических колебаний транспортных шумов. Задача решается с применением метода поляризационной обработки колебаний с предварительной полосовой фильтрацией сейсмоакустических сигналов в информативных полосах частот. Ориентация получаемого при поляризационной обработке положения большой оси эллипса рассеяния позволяет определить азимутальное направление на источник. Рассматривается оптимизационная задача выбора параметров предварительной полосовой фильтрации для повышения точности определения направления. Получены численные оценки точности решения задачи в условиях натурного эксперимента.

Ключевые слова: пассивная сейсмоакустическая локация, подвижный объект, информативные параметры, спектрально-временной анализ, поляризационный анализ, натурный эксперимент.

DETECTION AND LOCATION OF LAND MOBILE OBJECTS USING THE SPECTRAL POLARIZATION METHOD

© Authors, 2021

V.I. Dobrorodny, Postgraduate, e-mail: Dobrorodny@bk.ru

O.A. Kopylova, Engineer, e-mail: oksana@opg.sssc.ru

M.S. Khairtdinov, D.Sc. in Engineering Sciences, Professor, Principal Researcher, e-mail: marat@opg.sssc.ru

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS

D.V. Kostin, D. Sc. (Phys. and Math.), Head of department, JSC «Concern «Sozvezdie»

The problem of passive geophysical monitoring of mobile mechanized objects against the background noise at current time moments using three-component registration of seismic oscillations of transport noises is considered. The problem is solved by using the method of polarization processing of oscillations with preliminary band-pass filtering of seismoacoustic signals in informative frequency bands. The orientation of the polarization-processed scattering ellipse allows to determine the azimuthal direction to the source. The optimization problem of preliminary band-pass filtering parameter choice to increase the accuracy of direction finding is considered. Numerical estimates of the accuracy of solving the problem under field experiment conditions are obtained.

Keywords: passive seismoacoustic location, mobile object, informative parameters, spectral-time analysis, polarization analysis, field experiment.

Подвижные транспортные объекты при движении по поверхности Земли возбуждают сейсмические колебания в земле и акустические в атмосфере. Задача локации таких источников является актуальной в решении прикладных задач мониторинга территорий. Её решению посвящён ряд работ [1–4], связанных с использованием ма-

лых сейсмических групп датчиков для определения характеристик направленности на источник. Другой подход к решению задачи возможен за счёт применения метода регистрации и обработки трёхкомпонентных сейсмических колебаний, получаемых в пространстве взаимоперпендикулярных координат X , Y , Z [5, 6]. Использование такого подхода оказывается оправданным для решения ряда научных задач [7, 8].

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-07-00861a.

В интересах решения задачи локации транспорта использование поляризационного метода обусловлено тем, что, в общем случае, функция излучения наземных подвижных объектов описывается набором квазигармонических функций с переменными параметрами на фоне широкополосного шума. Получаемый трёхмерный вектор сейсмоакустических колебаний описывает эллипсоид вращения по траекториям, рассеянным в пространстве X, Y, Z («эллипсоид рассеяния»). Измеряемые при этом поляризационные характеристики сейсмоакустических волн используются в качестве информативного параметра для определения азимутального направления (пеленга) на источник излучения.

Решение задачи при таком подходе распадается на ряд этапов: обнаружение в условиях априорной неопределённости, спектрально-временной анализ колебаний типов объектов, формирование эллипсоидов рассеяния, определение пеленга и идентификация.

Трудности решения задачи обнаружения обусловлены частотной дисперсией и затуханием сейсмических волн по расстоянию. Это приводит к изменению формы сейсмического сигнала как во временной, так и в спектральной области, и это наблюдается даже на коротких расстояниях, что затрудняет измерение временных задержек и приводит к погрешностям.

Корректное решение задачи здесь возможно при предположении однородности строения среды распространения сейсмических колебаний. В противном случае необходимо проведение предварительной сейсмической калибровки среды для учёта её скоростных вариаций.

С учётом сказанного в работе рассматриваются вопросы обнаружения транспортных подвижных объектов и использования метода поляризационного анализа для повышения точности определения пеленга на объект в текущие моменты времени. Задача рассматривается на примере двух гусеничных объектов разной массы. По результатам натурных экспериментов приводятся оценки точности определения их пеленга.

Постановка задачи и выбор метода решения

В предположении однородности среды распространения сейсмических колебаний рассматривается задача обнаружения и повышения точности определения пеленга на транспортный подвижный объект в текущие моменты времени с применением метода поляризационного анализа. При этом предполагается, что векторная

функция излучения колебаний источником $A(t)$ описывается квазигармоническими функциями с параметрами, адекватными типу источника. В точках регистрации транспортных колебаний на них накладывается широкополосный шум с нормальным распределением $N\{0, \sigma\}$.

Поляризационный метод заключается в нахождении направления распространения волны и основывается на данных об изменении траектории движения частиц упругой среды во времени. В прямоугольной системе координат это проекции A_x, A_y, A_z полного вектора колебания A на оси x, y, z . Если положительное направление оси x совместить с направлением на север, оси y – на восток, а оси z – к зениту, то

$$\begin{aligned} A_x(t) &= |A(t)| \sin \varphi(t) \cos \omega(t), \\ A_y(t) &= |A(t)| \sin \varphi(t) \sin \omega(t), \\ A_z(t) &= |A(t)| \cos \varphi(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $|A(t)|$ – величина вектора A , или смещение в момент t ; $\omega(t)$ – азимут направления колебания; $\varphi(t)$ – угол между вектором A и вертикалью в каждый момент времени [5].

В скользящем временном окне, размеры которого выбираются в зависимости от длины волны, зашумлённости среды и шага дискретизации, по записям трёхкомпонентного приёмника вычисляется амплитуда главной компоненты смещения частицы в волне. Для каждого положения временного окна вычисляется ковариационная матрица [9].

Данные измерений представляются как набор точек или радиус-векторов $\vec{x}_i \equiv (x_i, y_i, z_i)$. Ставится задача определения направления, задаваемого единичным вектором $\vec{p}_i \equiv (p_x, p_y, p_z)$ поляризации так, чтобы сумма квадратов расстояний всех точек от прямой, проведённой в этом направлении, была минимальна. Собственные числа и собственные векторы матрицы ковариации исходных данных определяют из уравнения [10]:

$$\begin{pmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i \\ \sum x_i z_i & \sum y_i z_i & \sum z_i^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Определяемым из (2) вектором поляризации является собственный вектор \vec{p}_1 ковариационной матрицы, соответствующий максимальному

собственному числу. Два других собственных вектора, \vec{p}_2 и \vec{p}_3 , дают два ортогональных направления. Собственные числа $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ показывают значение отклонения поляризации от линейной.

Зная параметры осей мгновенного эллипсоида поляризации, можно найти тангенциальный и азимутальный углы, а также коэффициент эллиптичности. Последний характеризует «вытянутость» эллипсоида поляризации. Направление главной оси эллипсоида поляризации определяется по компонентам вектора \vec{p}_1 . Азимутальный угол находится из выражения

$$\Phi = \arctg\left(\frac{p_{1y}}{p_{1x}}\right), \quad (3)$$

где p_{1x}, p_{1y} – x - и y -компоненты p_1 соответственно. Тангенциальный угол вычисляется по формуле

$$\Theta = \arctg\left(\frac{\sqrt{p_{1x}^2 + p_{1y}^2}}{p_{1z}}\right), \quad (4)$$

где p_{1x}, p_{1y}, p_{1z} – x -, y - и z -компоненты p_1 соответственно. Коэффициент эллиптичности вычисляется по формуле

$$e = \sqrt{\frac{3\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}}. \quad (5)$$

Для повышения точности определения направления на источник колебаний необходимо предварительно решить задачу подавления шумов и выделения полезных сигналов. Это можно сделать с помощью процедуры цифровой фильтрации, в качестве которой используется фильтр Баттерворта. Данный фильтр характеризуется максимально плоской амплитудно-частотной характеристикой отклика в полосе пропускания и монотонной в полосе задерживания. Рассматриваемый фильтр описывается уравнением

$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{2n}}}, \quad (6)$$

где ω_0 – граничная частота, n – порядок фильтра.

Границы фильтрации могут быть определены эмпирическим путём с использованием данных полевых экспериментов. В рамках такого подхода были проведены экспериментальные работы, связанные с регистрацией сейсмических колебаний от гусеничной техники.

Методика и результаты проведения эксперимента

В ходе эксперимента № 1 были получены записи сейсмоакустических колебаний, создаваемых тяжёлой гусеничной машиной.

Регистрация колебаний осуществлялась на расстояниях приблизительно от 430 до 1090 м от сейсмостанции № 1 до источника и, соответственно, на расстояниях от 475 до 645 м от сейсмостанции № 2 при движении гусеничной машины по направлению от сейсмостанции № 1 на восток. На рис. 1 отображены места установки регистраторов, а также траектория движения источника. Регистрация сигналов осуществлялась с помощью трёхкомпонентных геофонов GS-3.



Рис. 1. Схема эксперимента № 1

Далее был проведён спектральный анализ полученных в ходе эксперимента записей колебаний от подвижного источника с целью выбора информативных частотных составляющих. Анализ показал, что для представленной тяжёлой гусеничной машины наиболее характерной является частота колебаний около 16–19 Гц, что видно из графиков на рис. 2.

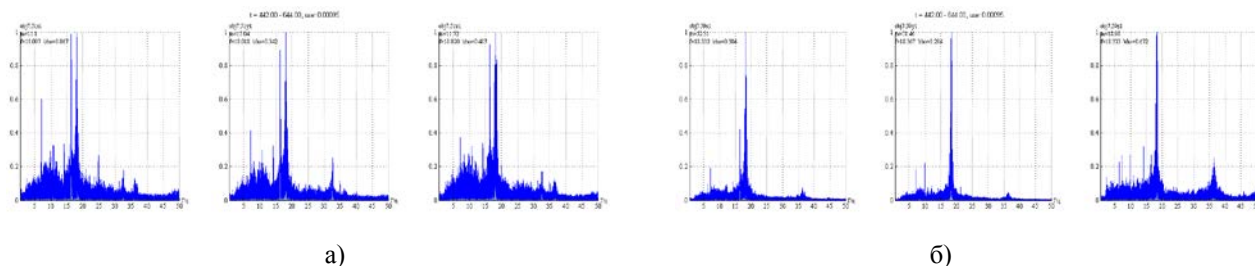


Рис. 2. Графики спектрального анализа записей колебаний от тяжелой гусеничной машины, зарегистрированных: а) на сейсмостанции № 1; б) на сейсмостанции № 2

Чтобы проследить динамику изменения частотного спектра во времени, используется спектрально-временной анализ. В качестве примера графики спектрально-временного анализа колебаний по одной из компонент геофона GS-3, возникающих при непрерывном движении тяжелой гусеничной машины, представлены на рис. 3.

Из графиков видно, что постоянство диапазона преобладающих частот сохраняется на всем интервале записи. На более близком расстоянии (около 475–515 м) помимо основной частоты видна субгармоника на частотах около 32–38 Гц. Отсюда следует, что выбор информативных частот, возможно, должен быть увязан с расстоянием.

На основании полученных данных для полосовой фильтрации были выбраны соответствующие частотные области, определяющие параметры (б) предварительной фильтрации зарегистрированных шумов.

В нашем случае обобщенный график пространственно-временных спектров шумов подвижного объекта в данной среде характеризуется следующими особенностями:

- монотонным уровнем шумов в выбранном диапазоне частот;
- резким возрастанием уровня амплитуды спектра в моменты характерного элемента движения (работы) подвижного объекта.

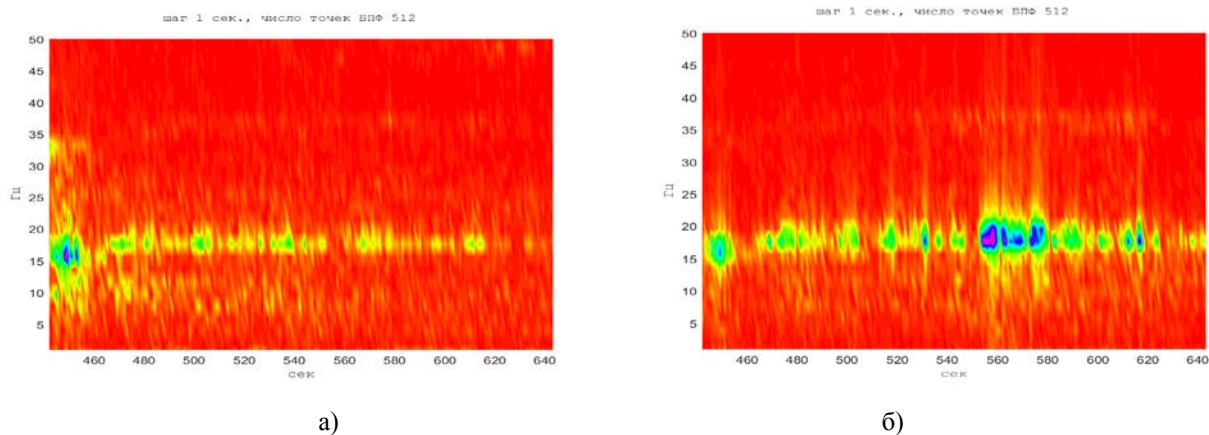
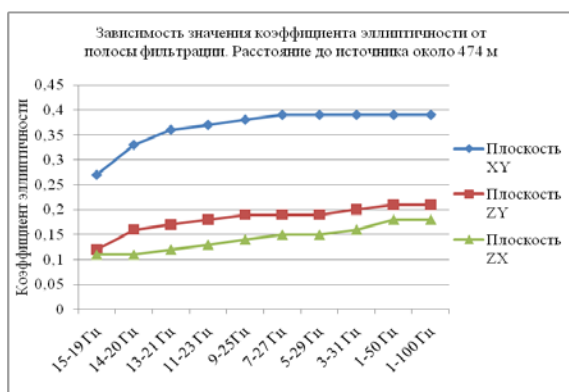


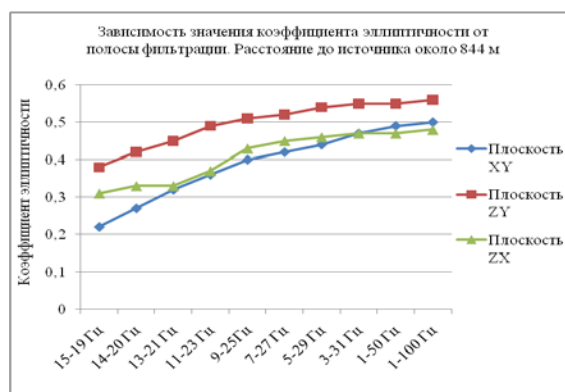
Рис. 3. Графики спектрально-временного анализа записей колебаний, зарегистрированных: а) на сейсмостанции № 1; б) на сейсмостанции № 2

Далее в соответствии с (5) были получены значения коэффициентов эллиптичности для азимутальной плоскости XU и для вертикальных плоскостей YZ и XZ . Коэффициенты эллиптич-

ности рассчитывались для данных, полученных на удалении около 474 м от источника для сейсмостанции № 2 (рис. 4а) и 844 м для сейсмостанции № 1 (рис. 4б).



а)

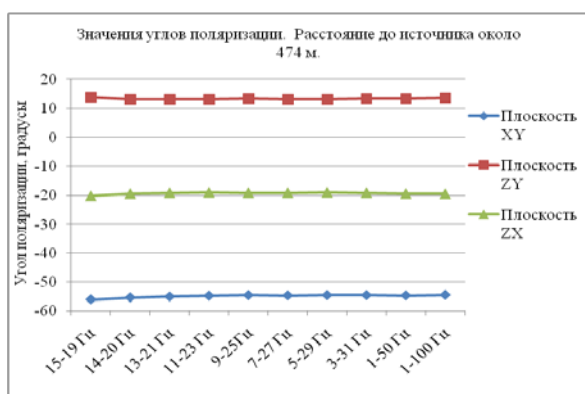


б)

Рис. 4. График зависимости коэффициента эллиптичности от полосы фильтрации для записей колебаний, полученных на удалении: а) около 474 м от источника для сейсмостанции № 2; б) около 844 м от источника для сейсмостанции № 1

Из графиков видно, что предварительная фильтрация в полосе частот 15–19 Гц для рассматриваемого источника при его непрерывном движении позволяет существенно уменьшить коэффициент эллиптичности эллипса поляризации. При дальнейшем расширении полосы фильтрации происходит существенное увеличение коэффициента эллиптичности. На большем удалении влияние фильтрации в выбранной полосе частот оказывает более существенное влияние на уменьшение коэффициента эллиптичности и, следовательно, на повышение точности определения направления на источник.

В соответствии с (3) были получены значения углов поляризации для азимутальной плоскости ХУ и для вертикальных плоскостей YZ и XZ. Значения углов поляризации, полученные на удалении около 474 м от источника для сейсмостанции № 2 и на удалении около 844 м от источника для сейсмостанции № 1, представлены соответственно на рис. 5а и 5б. Из графиков видно, что с увеличением расстояния определяемый угол поляризации более чувствителен к выбранным параметрам полосовой фильтрации.



а)



б)

Рис. 5. Значения углов поляризации для записей колебаний, полученных на удалении: а) около 474 м от источника для сейсмостанции № 2; б) около 844 м от источника для сейсмостанции № 1

На рис. 6а в качестве примера приведены полярограммы записей колебаний, зарегистрированных сейсмостанцией № 2 на удалении около 474

метров от источника, полученные после фильтрации в полосе частот 15–19 Гц. На рис. 6б приведены полярограммы записи колебаний, отфильтро-

ванной на тех же частотах, зарегистрированных сейсмостанцией № 1 на удалении около 844 метров. Приведённые полярограммы наглядно показывают, как влияет расстояние от источника коле-

баний до сейсмоприёмника на форму эллипса поляризации. Видно, что увеличение расстояния приводит к увеличению коэффициента эллиптичности (5), т.е. размытости эллипса рассеяния.

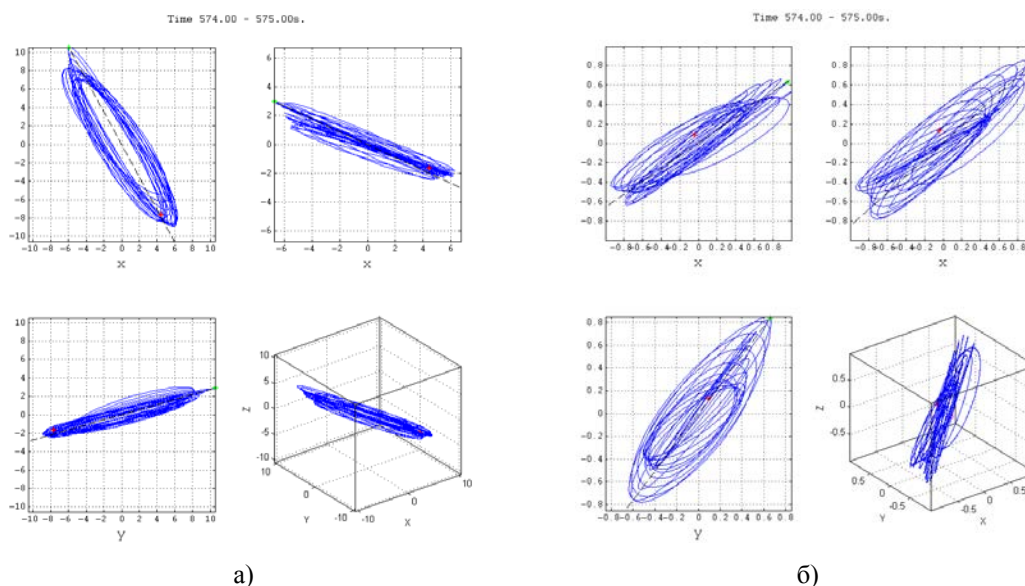


Рис. 6. Полярограммы, полученные после фильтрации в полосе частот 15–19 Гц, для записей колебаний, полученных на удалении: а) около 474 м от источника для сейсмостанции № 2; б) около 844 м от источника для сейсмостанции № 1

В эксперименте № 2, проведённом в другой географической местности, регистрировались шумы средней по массе гусеничной машины. Регистрация колебаний осуществлялась на расстояниях 111 и 237 метров от источника. Схема эксперимента изображена на рис. 7. На рисунке отображены места установки датчика, а также точки, соответствующие местоположению источника в моменты работы на месте. Регистрация сигналов осуществлялась также с помощью трёхкомпонентного геофона GS-3.



Рис. 7. Схема эксперимента № 2

В проведённом эксперименте был строго выдержан азимут установки датчика GS-3, который составил 343° относительно направления на север. Таким образом, угол относительно направления компоненты X датчика и первой точки составляет -23° , второй точки – 70° (значение отрицательного угла связано с системой отсчёта реализованного алгоритма поляризационного анализа).

В ходе работ также был проведён предварительный спектральный анализ записей сейсмо-акустических шумов движения средней по массе гусеничной машины. Анализ показал, что для представленного объекта наиболее характерной является частота колебаний около 17 Гц, что видно из графиков на рис. 8.

Для уточнения динамики изменения спектра был проведён спектрально-временной анализ. Графики результатов анализа для двух выбранных точек наблюдения положения источника представлены на рис. 9. В поведении спектра логично прослеживается момент ослабления амплитуды более высоких частот, а также преобладающая гармоника около 17 Гц.

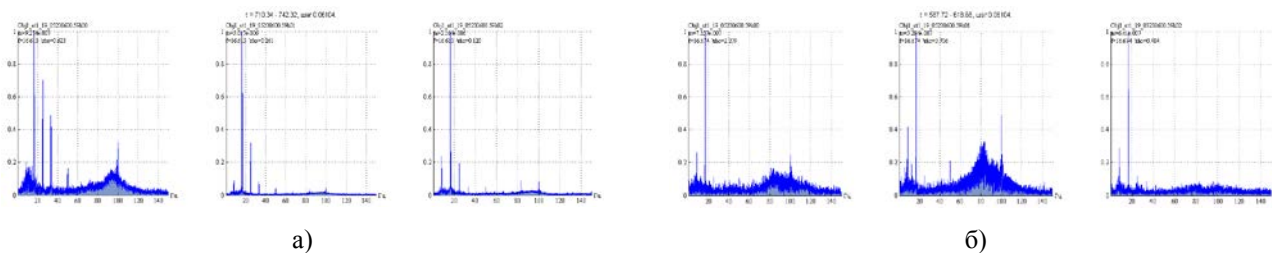


Рис. 8. Графики спектрального анализа записей сигналов, зарегистрированных при работе средней гусеничной машины на расстоянии: а) около 111 м; б) 237 м

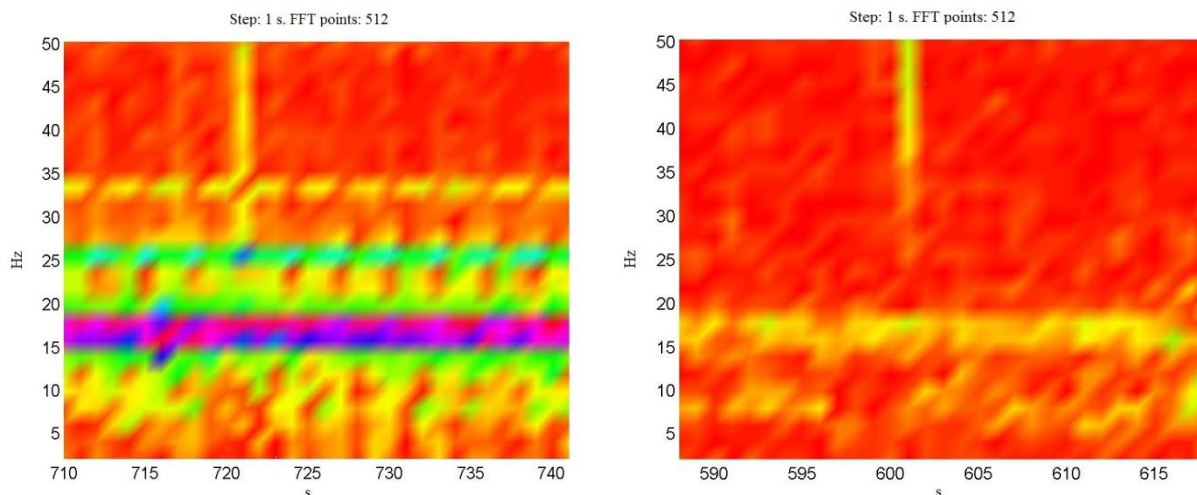


Рис. 9. Графики результатов спектрально-временного анализа для расстояний до источника 111 и 237 метров соответственно

На основании полученных данных для полосовой фильтрации были выбраны характерные частотные области анализа данных.

Далее также в соответствии с (5) были получены значения коэффициентов эллиптичности

для азимутальной плоскости XU и для вертикальных плоскостей YZ и XZ . Коэффициенты эллиптичности рассчитывались для данных, полученных на удалении 111 и 237 метров от источника (рис. 10).

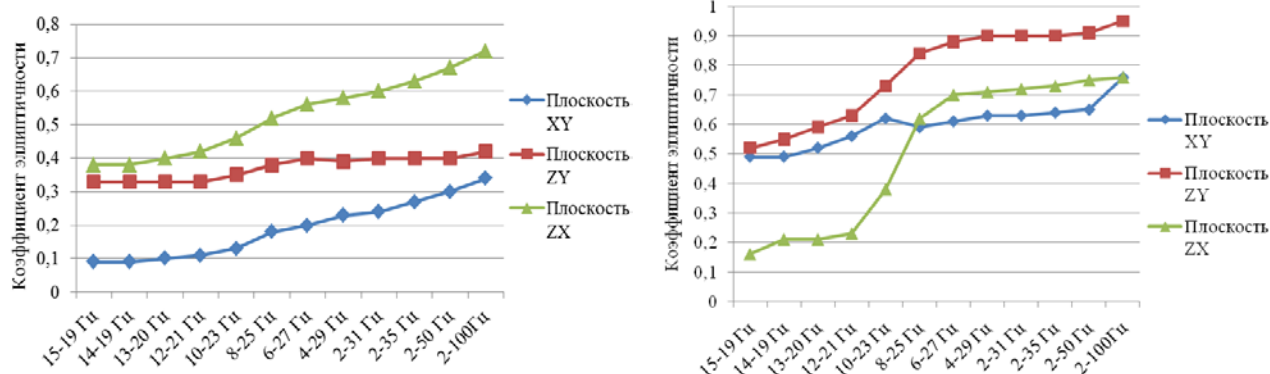


Рис. 10. Графики зависимости коэффициента эллиптичности от полосы фильтрации на расстояниях 111 м слева и 237 м справа

Из графиков видно, что предварительная фильтрация в полосе частот 12–21 Гц для рассматриваемого источника позволяет существенно уменьшить коэффициент эллиптичности эллипса поляризации. Дальнейшее сужение полосы частот на изменение коэффициента эллиптичности влияет незначительно. При дальнейшем расширении полосы фильтрации происхо-

дит существенное увеличение коэффициента эллиптичности (рис. 10). На большем удалении фильтрация в выбранной полосе частот оказывает более существенное влияние на уменьшение коэффициента эллиптичности и, следовательно, на повышение точности определения направления на источник.

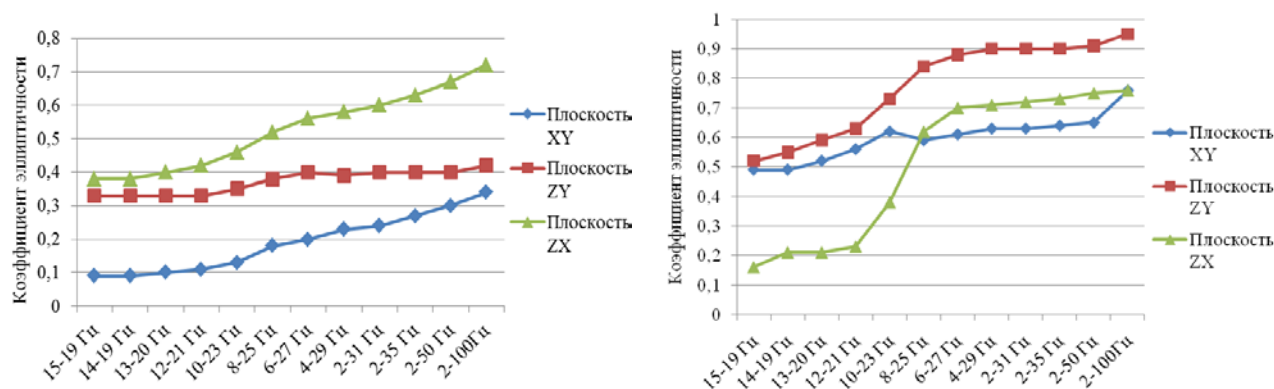


Рис. 10. Графики зависимости коэффициента эллиптичности от полосы фильтрации на расстояниях 111 м слева и 237 м справа

В соответствии с (3) были получены значения углов поляризации для азимутальной плоскости XY и для вертикальных плоскостей YZ и XZ . Значения углов поляризации, полученные при расстоянии до источника около 111 м и 237 м, представлены на рис. 11.

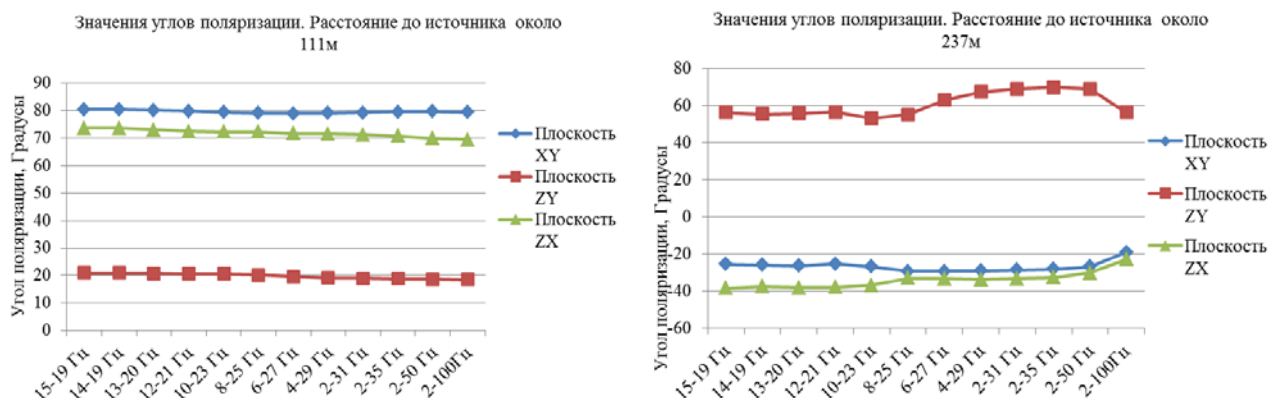


Рис. 11. Графики зависимости значения углов поляризации

На рис. 12 в качестве примера приведены полярограммы записей колебаний, зарегистрированных на том же удалении от источника, полученные после фильтрации в полосе частот 12–21 Гц.

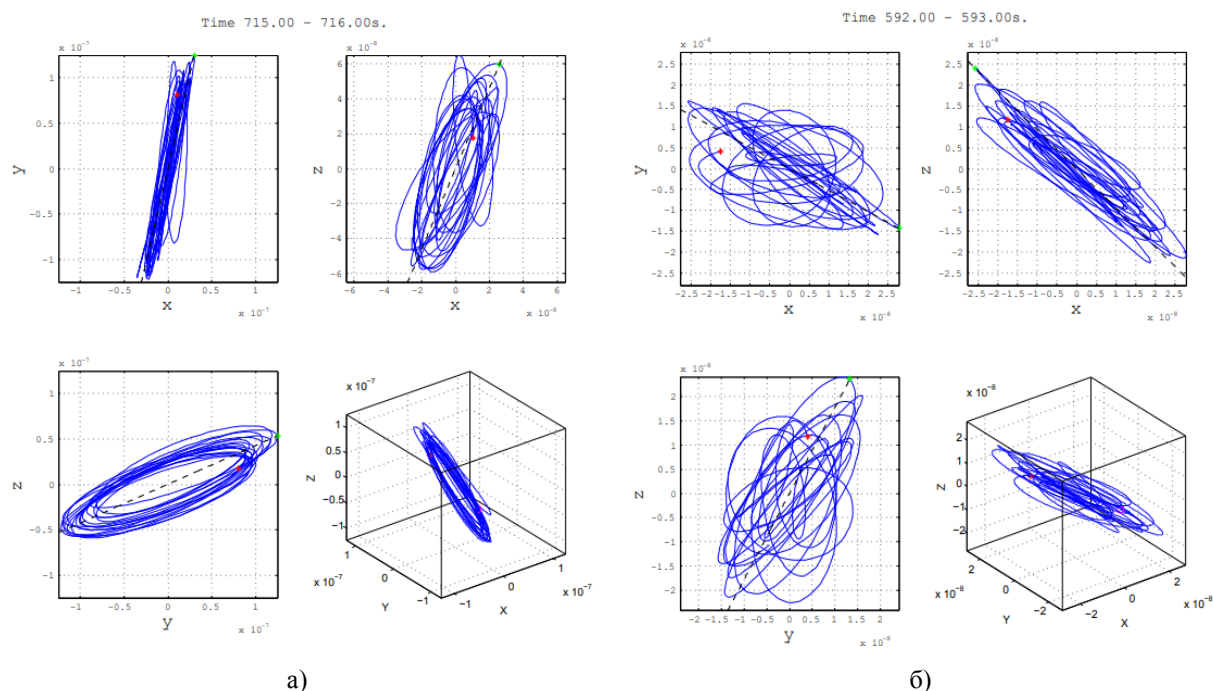


Рис. 12. Полярограммы на интервале 1 с, полученные после фильтрации в полосе частот 12–21 Гц:
а) расстояние до источника 111 м; б) расстояние до источника 237 м

По результатам проведения поляризационного анализа с предварительной фильтрацией в полосе частот 12–21 Гц определено, что угол относительно ориентации датчика (компонента X) и первой рассматриваемой точки составляет $-24,7^\circ$, второй точки – 80° . Для сравнения, если фильтровать в полосе частот от 2 до 50 Гц, то определяется, что для первой точки угол равен $-26,8^\circ$, для второй $79,4^\circ$.

Таким образом, для направления на первую точку азимутальная ошибка составила $1,7^\circ$, а для направления на вторую точку – 10° . Показано, что использование полосовой фильтрации позволяет повысить точность определения направления на источник, что становится более заметным с увеличением расстояния до источника.

Заключение

В статье рассмотрена задача повышения точности оценивания одного из параметров локализации источника сейсмоакустических колебаний – азимутального направления – в условиях регистрации сейсмических колебаний трёхкомпо-

нентными датчиками. В качестве источника рассматривались тяжёлый и средний по массе гусеничные подвижные объекты. Для решения задачи определения азимутального направления на источник рассмотрен оптимизационный метод поляризационного анализа для разных режимов работы объекта. Исследовано влияние выбора параметров предварительной полосовой фильтрации записей сейсмоакустических данных на повышение точности определения направления на источник излучения с помощью выбранного метода. Получены численные оценки точностей решения задачи на основе оценивания азимутального направления в условиях натурального эксперимента. Показано, что использование полосовой фильтрации позволяет существенно повысить точность определения направления на источник, что становится более заметным с увеличением расстояния. Интересным представляется исследование устойчивости данного метода к изменению базы подвижного объекта на колёсную, а также различным типам грунтов.

Литература

1. Алямкин С.А., Нежевенко Е.С. Восстановление траектории движущегося объекта в сейсмической системе обнаружения при ограниченном количестве датчиков // Автоматика и телемеханика. 2014. № 2. С. 31–39.
2. Морозов Ю.В., Райфельд М.А., Снектор А.А. Обработка сейсмических сигналов для оценки траектории движущегося транспортного средства // Автометрия. 2018. № 3. С. 32–38.
3. Аверьянов А.В., Глебова Г.М. Определение координат движущегося объекта сосредоточенной сейсмической системой наблюдения // Автометрия. 2014. № 4. С. 67–73.
4. Странгуль О.Н., Тарасенко В.П. Корреляционно-экстремальные системы навигации и локации подвижных объектов // Автоматика и телемеханика. 2001. № 7. С. 201–210.
5. Гальперин Е.И. Поляризационный метод сейсмических исследований. М.: Недра, 1977. 277 с.
6. Гальперин Е.И., Иванов Л.И., Мирзоян Ю.Д. Поляризационный метод – общий метод сейсмической разведки // Нефтегазовая геология и геофизика: реф. научн.-техн. сборник / ВНИИОЭНГ. 1978. № 9. С. 38–43.
7. Alessandrini B., Cattaneo M., Demartin M., Gasperini M., Lanza V.A. Simple P-wave polarization analysis: its application to earthquake location // Annals of Geophysics. 1994. 5(5). Pp. 883–897.
8. Perelberg Azik I., Hornbostel Scott C. Applications of seismic analysis // Geophysics. 1994. 59(1). Pp. 119–130.
9. Григорюк А.П., Ковалевский В.В., Брагинская Л.П. Исследование поляризации сейсмических волн при вибросейсмическом мониторинге // Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» (Интерэкспо ГЕО-Сибирь): сб. материалов XIV Междунар. науч. конгр., 23–27 апреля 2018 г., г. Новосибирск. Новосибирск: СГУГиТ, 2018. В 2 т. Т. 2. С. 10–16.
10. Каханер Д., Моулер К., Нэш С. Численные методы и программное обеспечение: пер. с англ. 2-е изд., стер. М.: Мир, 2001. 575 с.

Статья поступила в редакцию 22 октября 2021 года