

# Методы повышения точности пассивной локации импульсных источников геоакустических колебаний

Оксана Копылова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, пр. акад. Лаврентьева, 6, 630090, Новосибирск, Россия*

## Аннотация

Рассматривается проблема геофизического мониторинга импульсных источников, несущих геоэкологические угрозы для окружающей социальной инфраструктуры. В качестве таких источников могут выступать карьерные и промышленные взрывы, падающие на землю осколки космических тел и др., являющиеся мощными источниками сейсмических и акустических волн – далее сейсмоакустических волн. Основными задачами здесь являются обнаружение, определение мощности и местоположения источников. Рассматриваются вопросы повышения точности и дальности обнаружения и локации импульсных источников с учетом параметров геометрии расстановки регистрирующих датчиков и измерения параметров сейсмоакустических волн. Предложенные теоретические подходы к решению задач реализованы в условиях натурного эксперимента.

## Keywords

Импульсные колебания, сейсмоакустическая локация, поляризационный метод, полевой эксперимент.

## 1. Введение

Проблема геофизического мониторинга окружающей среды в мире связана с изучением экологической проблемы – влияния разного класса источников, порождающих мощные вибрации (сейсмические волны) в земле и акустические в атмосфере, на окружающую социальную среду и на человека. В качестве таких источников могут выступать карьерные и промышленные взрывы, падающие на землю тела при спутниковых запусках, осколки космических тел и др. [1-3]. Основными задачами здесь являются обнаружение, определение местоположения и мощности источников.

В решении задачи геолокации одним из основных является понятие фазового фронта и подобия волн в среде их распространения от источника. Подобие сигналов при этом оценивается функцией когерентности сигналов на выходах регистрирующих датчиков. В частности, на этих принципах базируется подход к определению направления на активные источники по их преобладающим спектральным составляющим шумов [4]. Другой подход к решению рассматриваемой задачи связан с теорией корреляционно-экстремальных систем [5], в основе которых лежит вычисление функции взаимной корреляции случайных процессов и определения координат главного экстремума этой функции, характеризующих положение лоцируемого источника. В работе [6] положение источника колебаний определяется по временам прихода поперечной и продольной волн. Способ гипербола, предложенный в [7] связан с получением разностей времен прихода Р-волны относительно опорного сейсмоприемника. В работе [6] для определения координат приводится вариант реализации метода гипербола с использованием данных от четырех пространственно разнесенных датчиков. Авторами патента [8] для повышения точности пеленгации объектов по данным сейсмических колебаний предлагается устройство с предварительной адаптивной фильтрацией

<sup>6</sup> International Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments (ICCS-DE 2024), July 01–05, 2024, Irkutsk, Russia

EMAIL: oksana@opg.sccc.ru (A. 1)



© 2024 Copyright for this paper by its authors. Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

ICCS-DE 2024 Workshop Proceedings

DOI: 10.47350/ICCS-DE.2024.30

сигналов, состоящей из фильтров нижних частот и сглаживающего фильтра. Отфильтрованные сигналы поступают на вход многоканального корреляционного измерителя разности временных запаздываний.

В настоящей работе предлагаются подходы к решению задач повышения дальности обнаружения и точности локации импульсных источников с одновременным учетом сейсмических и акустических волн и принципа их подобия. Высокая эффективность предложенных подходов доказана результатами натурных экспериментов.

## 2. Постановка задачи геолокации

С помощью линейки пространственно-распределенных векторно-фазовых датчиков в земле и атмосфере регистрируется волновое поле, представляемое в виде векторной функции:

$$\bar{A}(x, y, z, t) = \left\{ \bar{A}_k [x_k(t_i), y_k(t_i), z_k(t_i)] \right\}, \quad (1)$$

где  $i=1..N$  – множество дискретных значений функций,  $k=1..M$  – число датчиков в линейке  $[x_k(t_i), y_k(t_i), z_k(t_i)]$ .

В качестве начального на ориентацию датчиков накладывается условие: компонента  $X$  ориентируется на север,  $Y$  – на восток,  $Z$  – вертикальная компонента.

Координатные функции как результат регистрации сейсмических колебаний в земле с учетом характеристик регистраторов описываются в виде:

$$x_k(t_i) = A_x(k) h_k L[s(t_i - \Delta t_k) + n_k(t_i)]. \quad (2)$$

Здесь  $A_x$  – амплитуда колебания по компоненте  $X$  на  $k$ -ом датчике,  $h_k$  – чувствительность датчика,  $L$  – оператор фильтрации сигнала,  $s(t_i - \Delta t_k)$  – полезный сигнал,  $n_k(t)$  – внешний шум с корреляционной функцией  $r_k(\tau)$ .

Решение задачи локации распадается на решение задач определения пеленга и на вычисления расстояния до него.

Дан вектор  $\bar{C}$ , определяющий расстановку сейсмических и акустических датчиков на плоскости. Необходимо определить времена вступлений сейсмических  $\bar{t}_s$  и акустических  $\bar{t}_a$  волн. На основе вычисленных времен определить координаты источников. Уравнение минимизации невязки имеет вид:

$$\Delta(x_c, y_c) = \left| \left\{ \bar{x}_{c\_ист}, \bar{y}_{c\_ист} \right\} - \left\{ \bar{x}_{c\_изм}, \bar{y}_{c\_изм} \right\} \right| \rightarrow \min, \quad (3)$$

где  $\left\{ \bar{x}_{c\_ист}, \bar{y}_{c\_ист} \right\}$  – вектор истинных значений координат,  $\left\{ \bar{x}_{c\_изм}, \bar{y}_{c\_изм} \right\}$  – вектор вычисленных значений координат.

## 3. Методика решения задачи

### 3.1. Предобработка данных и выделение информативных признаков

Одна из задач – обнаружение – связана с повышением соотношения «сигнал/шум», характеризующего точность алгоритмов обнаружения. Для этого необходима предварительная обработка данных на основе использования спектральных характеристик от заданных источников. Импульсные источники порождают в среде волны, модель которых описывается затухающей функцией времени, на которую, к тому же накладываются внешние шумы. Это определяет необходимость использования характеристик колебаний на основе оконного спектрального анализа Фурье для прослеживания динамики изменения спектра во времени.

Другой подход к выделению информативных признаков и уменьшению уровня фоновых шумов связан с использованием вейвлет-преобразования. Обработка сейсмических данных осуществляется с применением вейвлет-фильтрации, основанной на дискретном вейвлет-разложении сигнала по слоям детализации, что позволяет повысить отношение сигнал-шум в режиме обработки по одиночному каналу. Порядок и уровни вейвлет-коэффициентов

выбираются на основе анализа функции распределения энергии анализируемого сигнала по уровням разложения с учётом порядка вейвлета [9].

Обнаружение сигнала осуществляется на основе использования порогового энергетического критерия.

### 3.2. Локация с использованием линейки пространственно распределенных однокомпонентных датчиков

Локация с использованием линейки пространственно распределенных однокомпонентных датчиков при их линейной расстановке осуществляется на основе построения диаграммы коэффициента направленного действия (КНД). Зависимость КНД сейсмической антенны из  $n$  равномерно расставленных датчиков от временной задержки прихода волны между двумя соседними датчиками вычисляется согласно [10].

Вычисление коэффициента направленного действия производится по формуле:

$$К.Н.Д. = E_{сум} / E_{max} . \quad (4)$$

Рассматривается модификация алгоритма, основанная на взаимном перемножении соответствующий отсчетов сейсмограмм:

$$E_{сум} = \sum_n (f_1(t_n) * f_2(t_n + \Delta t) * \dots * f_k(f_n + \Delta t \cdot (k-1)))^2 . \quad (5)$$

Пример расчета диаграммы КНД в случае использования одной линейки из 3 датчиков с шагом расстановки 105 метров на данных модельного эксперимента с использованием импульса Берлаге приведен на рис. 1 (а), в случае одной линейки из 5 датчиков с шагом 35 метров – на рис. 1 (б). Соотношение «сигнал/шум» задавалось равным 40, угол – 45 градусов, основная частота – 12 Гц. Из рисунков видно, что в первом случае точность определения направления на источник оказалась выше на 0,07°. Точность определения направления на источник в зависимости от шага расстановки и количества точек регистрации коррелирует с результатами анализа данных полевых исследований.

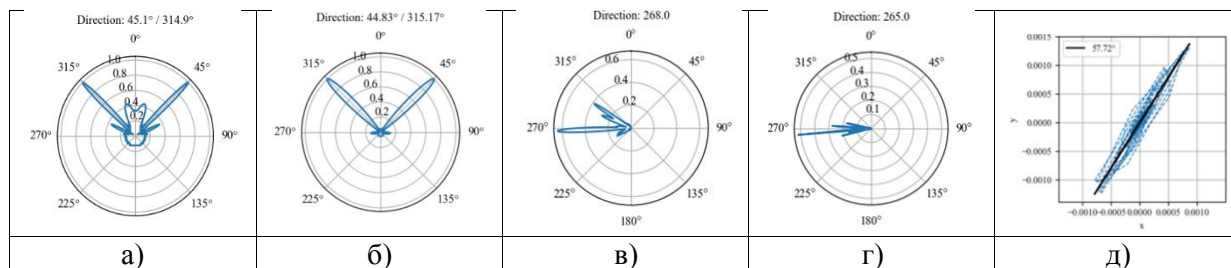
Совместный учет результатов вычислений согласно [10] и по формуле (5) при использовании двух взаимоперпендикулярных линеек пространственно разнесенных датчиков с общей серединной точкой позволяет определять направление на источник. Пример работы алгоритма для случая обработки данных от 5 датчиков, расположенных на взаимно перпендикулярных линейках по 3 датчика в каждой, представлен на рис. 1 (в, г). Датчики в линейках располагались на расстоянии около 103.5 метров друг от друга. Источник располагался на расстоянии около 800 метров от центра расстановки датчиков.

На рис. 1 (в) показан пример вычисленной диаграммы направленности по сейсмической волне, на рис. 1 (г) – по поверхностной акустической волне. Истинное значение угла составляет 269°. Видно, что на основе сейсмических колебаний точность определения направления на источник выше (отклонение составляет 1°), чем на основе акустических (отклонение составляет 4°), что объясняется дополнительным влиянием метеофакторов, в частности ветра, на распространение акустических колебаний.

### 3.3. Сейсмическая локация на основе трехкомпонентной векторной поляризации

В основе решения лежит поляризационный метод определения пеленга на источник [11]. В прямоугольной системе координат траектории колебаний (1) описываются полным вектором колебаний  $A$  с проекциями на горизонтальные и вертикальную составляющие  $A_x, A_y, A_z$  по осям  $x, y, z$ . Данные измерений представляются в виде набора точек, пространственное положение каждой из которых характеризуется радиус-вектором  $\vec{A}_i \equiv (x_i, y_i, z_i)$ . Ставится задача определения направления, задаваемого единичным вектором  $\vec{p} \equiv (p_x, p_y, p_z)$  поляризации так, чтобы сумма квадратов расстояний всех точек от прямой, проведенной в этом направлении,

была минимальна. Для автоматизации процедуры решение предлагается искать с применением метода наименьших квадратов. Пример результата работы алгоритма в виде полярограммы приведен на рисунке 1 (д). Расстояние до источника составляло около 1 километра.



**Рисунок 1:** а) результат расчета КНД на модельных данных по одной линейке, состоящей из 3 датчиков с шагом 105 метров; б) результат расчета КНД на модельных данных по одной линейке, состоящей из 5 датчиков с шагом 35 метров; в, г) определение направления на источник по сейсмическим (в) и акустическим (г) колебаниям по двум линейкам. Шаг расстановки датчиков равен 103,5 метров; д) пример полярограммы

## 4. Заключение

В работе рассмотрена проблема, связанная с геоакустическим мониторингом разного класса импульсных источников - карьерных и полигонных взрывов, промышленных взрывов и др. Рассмотрена задача повышения дальности обнаружения и локации таких источников. Проведен сравнительный анализ точности работы алгоритма на данных сейсмических и акустических колебаний. Исследована зависимость точности работы алгоритма на модельных данных и данных реального эксперимента от количества используемых в линейке датчиков и от шага их расстановки. По результатам натурных экспериментов показана высокая эффективность предложенных подходов.

## 5. Благодарности

Работа выполнена в рамках госзадания FWNM–2022–0004.

## 6. Литература

- [1] Thomas B Afeni, Stephen K Osasan. Assessment of noise and ground vibration induced during blasting operations in an open pit mine — A case study on Ewekoro limestone quarry, Nigeria. Mining Science and Technology (China), Volume 19, Issue 4, 2009, Pages 420–424, ISSN 1674-5264. URL: [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60078-8](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60078-8).
- [2] Зыков В.С. Состояние вопроса по проблеме влияния промышленных взрывов при открытой разработке угольных месторождений на охраняемые объекты и окружающую среду. Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности, № 3, 2018. С. 51–56.
- [3] Пименов И.К., Дементьев Н.А., Кузнецова А.Д. Оценка шума от взрывных работ в карьере. // Защита от повышенного шума и вибрации. Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Под редакцией Н.И. Иванова. Санкт-Петербург, 2021. С. 87–97.
- [4] Карлтон П.Н., Фидлер Р.У. Определение положения источника сейсмических колебаний методом пассивного эксперимента. В кн. «Анализ и выделение сейсмических сигналов». М.: «Мир». С.158–175.
- [5] Странгуль О.Н., Тарасенко В.П. Корреляционно-экстремальные системы навигации и локации подвижных объектов // Автоматика и телемеханика, № 7, 2001. С. 201–210.