

Методы повышения точности пассивной локации импульсных источников геоакустических колебаний

Оксана Копылова¹

¹ 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 гипербол, предложенный в [7] связан с получением разностей времен прихода Р-волны относительно опорного сейсмоприемника. В работе [6] для определения координат приводится вариант реализации метода гипербол 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

6th International Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments (ICCS-DE 2024), July 01–05, 2024, Irkutsk, Russia
EMAIL: oksana@opg.sscc.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).

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:

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

где $\{\bar{x}_{c_ucm}, \bar{y}_{c_ucm}\}$ – вектор истинных значений координат, $\{\bar{x}_{c_uzm}, \bar{y}_{c_uzm}\}$ – 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 п равномерно расставленных датчиков от временной задержки прихода волны между двумя соседними датчиками вычисляется согласно [10].

Вычисление коэффициента направленного действия производится по формуле:

$$K.H.D. = E_{\text{cym}} / E_{\max}. \quad (4)$$

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

$$E_{\text{cym}} = \sum_n (f1(t_n) * f2(t_n + \Delta t) * \dots * f_k(f_n + \Delta t \cdot (k - 1)))^2. \quad (5)$$

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 \vec{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, проведённой 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.

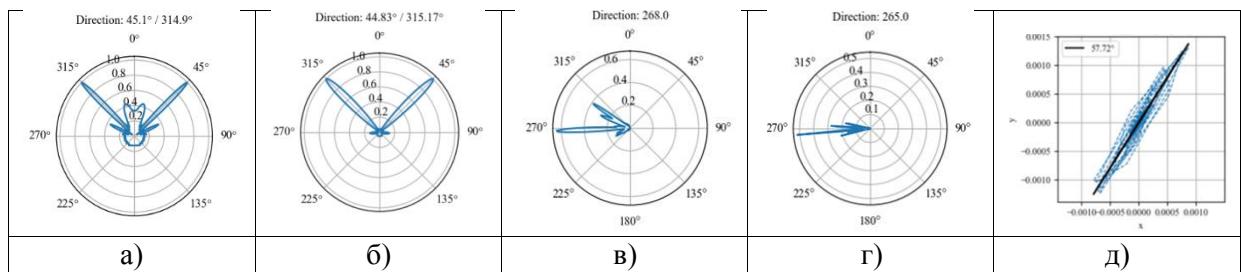


Рисунок 1: а) результат расчета КНД на модельных данных по одной линейке, состоящей из 3 датчиком с шагом 105 метров; б) результат расчета КНД на модельных данных по одной линейке, состоящей из 5 датчиком с шагом 35 метров; в, г) определение направления на источник по сейсмическим (в) и акустическим (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.