

Б. Р. РАКИШЕВ, Л. В. ВИНОКУРОВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ СИГНАЛОВ

Для исследования источника различных сигналов необходимо, прежде всего, знать его местонахождение. Определение координат источника возможно по сигналам, характеризующим его существование. Сигналы могут быть разовые, кратковременные (взрыв) и бесконечно длительные (небесные светила). В статье рассматриваются сейсмические сигналы, излучаемые при землетрясениях и мощных подземных взрывах.

Известно, что сейсмические волны Р-продольные и S-поперечные, возникшие в очаге землетрясения, распространяются с разной скоростью, поэтому они регистрируются сейсмостанцией в разное время [1]. Точное время прихода каждой волны определяется по отметкам времени, имеющимся на сейсмограмме. Скорости волн в сейсмоопасных регионах известны с высокой точностью. Используя разность скоростей v_p -продольный и v_s -поперечной

волн, не трудно определить расстояние d от сейсмо-станции до эпицентра источника по формуле

$$d = Tv_p \cdot v_s / (v_p - v_s), \quad (1)$$

где T – интервал времени между вступлениями волн P и S , измеренный на сейсмограмме.

После того как для нескольких станций (не менее трех) определено расстояние до эпицентра, его местонахождение на плоскости находят путем пересечения окружностей с известными радиусами.

Определение глубины очага землетрясения представляется гораздо сложной задачей. Однако при наличии сейсмограмм с записями землетрясений или мощных подземных взрывов близкими и далекими станциями по сходимости их данных можно оценить местоположение гипоцентра.

Нами разработан и опробован новый, более точный метод определения координат природных и техногенных источников излучения [2–4]. В его основе лежит сформулированная и доказанная теорема о прямой, вращающейся вокруг центра равностороннего треугольника, гласящая: если некоторая прямая UV , первоначально совпадающая с биссектрисой AD , равностороннего треугольника ABC со стороной l , вращается против часовой стрелки в плоскости треугольника вокруг его центра O (рис. 1), то проекции S_1, S_2, S_3 сторон треугольника на эту прямую изменяются по законам:

$$\begin{aligned} B'C' &= S_2 = l \sin \varphi, \\ A'B' &= S_3 = l \sin (60^\circ - \varphi), \\ A'C' &= S_1 = l \sin (60^\circ + \varphi), \end{aligned} \quad (2)$$

где φ – угол поворота прямой UV вокруг O от AD .

Из этой теоремы следует, что, если проекции сторон равностороннего треугольника каким-либо

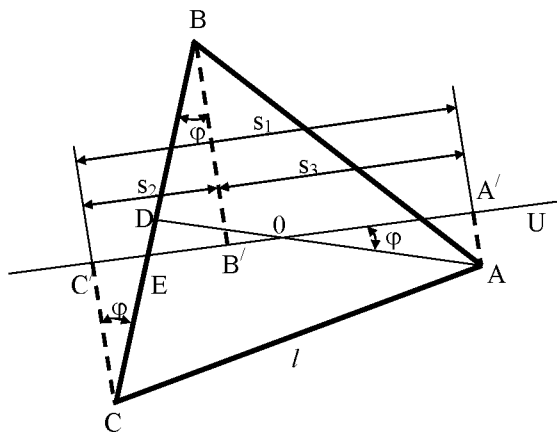


Рис. 1. Схема к определению проекций S_1, S_2, S_3 сторон треугольника ABC на прямую UV

образом определены, то положение прямой UV относительно заданного начала отсчета AD определяется однозначно путем использования обратных тригонометрических функций.

В целях определения направления (пеленга или азимута) на источник излучения сейсмических сигналов целесообразно принять, что любое фиксированное положение вращающейся прямой UV – это пеленг на источник излучения. Для удобства на практике используют не рассмотренные проекции, а величины, пропорциональные этим линейным размерам, – временные задержки t_1, t_2 и t_3 прихода сейсмического сигнала в вершины равностороннего треугольника [4].

Переход от закона изменения проекций сторон равностороннего треугольника на прямую, вращающуюся вокруг центра треугольника, к закону изменения временных задержек в зависимости от направления прихода сейсмического сигнала к равностороннему треугольнику ABC , в вершинах которого установлены сейсмоприемники, осуществляется по аналогии (рис. 2). Здесь t_1 и t_3 – временные задержки прихода сигнала к сейсмоприемникам относительно сейсмоприемника, принимающего сигнал первым, а t_2 – временная задержка между временем прихода сигнала ко второму и дальнему сейсмоприемникам. O – центр равностороннего треугольника, φ – угол между направлением прихода сигнала и началом отсчета, AD – биссектриса.

Если учесть, что сеймосигнал к равностороннему треугольнику может приходить в плоскости с любого направления, то по аналогии с формулой (2) выражения для временных задержек запишутся в виде:

$$t_1 = l/v \sin(60^\circ + \varphi), \quad t_2 = l/v \sin \varphi, \quad t_3 = l/v \sin(60^\circ - \varphi). \quad (3)$$

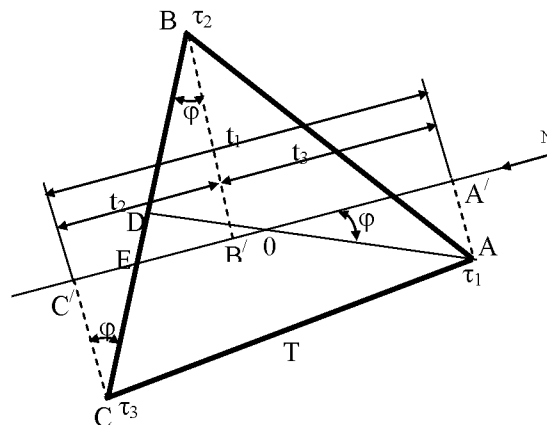


Рис. 2. Схема к определению временных задержек t_1, t_2, t_3 по аналогии с проекциями S_1, S_2, S_3

Если временные задержки каким-либо методом измерены, то φ однозначно определяется по формулам:

$$\begin{aligned} \varphi &= 60^\circ + \arcsin(t_1/T), \quad \varphi = \arcsin(t_1/T), \\ \varphi &= 60^\circ - \arcsin(t_3/T), \end{aligned} \quad (4)$$

где $T = l/v$ – время, в течение которого сейсмический сигнал пройдет путь, равный длине стороны равностороннего треугольника l .

Таким образом, промежутки времени, измеренные в двух вершинах, кроме дальней от источника, являются временными задержками, которые пропорциональны проекциям сторон треугольника на нормаль фронта сейсмической волны. По измеренным задержкам времени можно определить пеленг на источник излучения сейсмической волны. Однако для большей точности определения пеленга целесообразно использовать меньшую задержку, так как малые значения синусоидальной функции при незначительном изменении аргумента имеют большую скорость роста и хорошую линейность.

На основе приведенных рассуждений был разработан алгоритм для ЭВМ, который позволяет по единственному сейсмическому сигналу (импульсу) определить пеленг на источник этого сигнала в реальном времени [4].

При рассмотрении примеров определения пеленга φ на источник сейсмического импульса в полупространстве было выявлено наличие ошибки для φ . Причем, чем больше угол места β (угол между плоскостью расположения равностороннего треугольника и прямой, проходящей через источник и центр равностороннего треугольника), тем больше абсолютная величина ошибки $\Delta\varphi$. Так, при $\beta=20^\circ$ ошибка $\Delta\varphi=6^\circ$. В связи с этим нами были разработаны методы определения пеленга φ на источник сейсмического сигнала, устраняющие ошибку $\Delta\varphi$.

В основу первого метода положены графики зависимости изменения проекций сторон равностороннего треугольника от пеленга φ с учетом того, что при изменении угла места β изменения проекций сторон равностороннего треугольника подчиняются определенным закономерностям. Например, с увеличением угла места β все проекции сторон треугольника на вращающуюся прямую UV соответственно уменьшаются. Уменьшение обеих малых проекций сторон треугольника влечет за собой изменение пеленга. При этом уменьшение одной из них (S_3) влечет уменьшение пеленга (φ_2), а уменьшение второй (S_1) увеличение пеленга (φ_1). Установлено, что величина уменьшения пеленга φ_2 , найденного по одной проекции (S_3), равна величине

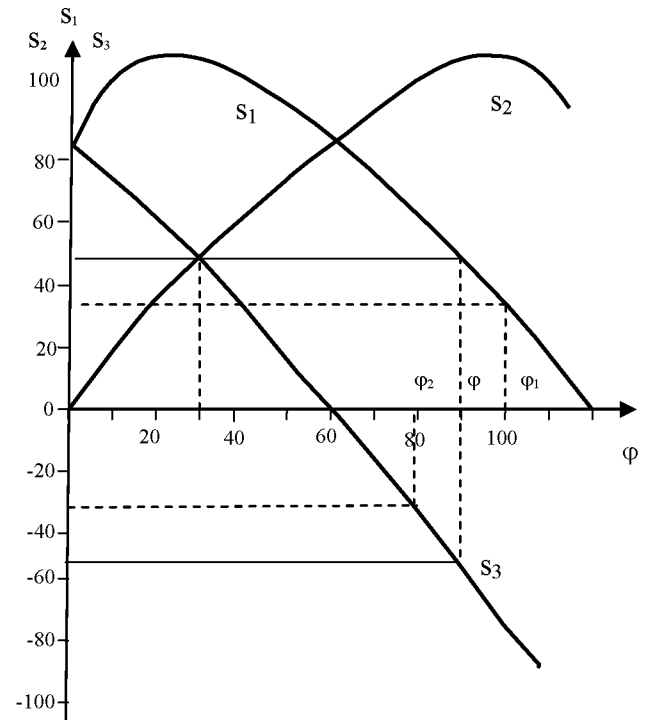


Рис. 3. Изменение проекций сторон равностороннего треугольника в зависимости от угла φ

увеличения пеленга φ_1 , найденного по другой проекции (S_1) (рис. 3). Отсюда следует, что действительный (уточненный) пеленг на источник может быть определен по формуле [4]

$$\varphi = (\varphi_1 + \varphi_2)/2. \quad (5)$$

Второй метод базируется на том, что при изменении угла места β при неизменном пеленге φ все временные задержки изменяются пропорционально своим первоначальным величинам. Это позволило предположить, а затем и доказать, что при постоянном φ и изменении угла места β от 0 до 90° отношение меньшей временной задержки к средней задержке есть величина постоянная. В связи с этим относительно заданного начала отсчета построена зависимость

$$\varphi = f(\sigma), \quad (6)$$

где σ выражает отношение меньшей временной задержки к средней временной задержке.

На основании построенного графика найдены экспериментальные формулы, которые по измеренным временным задержкам позволяют определить пеленг φ :

$$\varphi = 30^\circ(n - e^{-1.2\sigma}) + 10\sigma, \quad (7)$$

$$\varphi = 30^\circ[n - (1 - e^{-1.2\sigma})] - 10\sigma, \quad (8)$$

где n – порядковый номер 30-градусного сектора круга, центр которого совпадает с центром равно-стороннего треугольника, а отсчет порядковых номеров производится от биссектрисы начала отсчета против часовой стрелки.

В формуле (7) используются нечетные порядковые номера секторов, а в формуле (8) – четные номера.

Нахождение порядкового номера 30-градусного сектора по измеренным временным задержкам выполняется в соответствии с разработанным алгоритмом [4].

Точность определения пеленга φ по второму методу не ниже 2% при любых соотношениях значений временных задержек.

Таким образом, в пределах от 0 до 360° при известных временных задержках и известном порядковом номере сектора n может быть определено значение пеленга φ на источник излучения по одному из разработанных методов с высокой степенью точности.

Если источник сигналов и равно-сторонний треугольник расположены в разных плоскостях (угол места $\beta \neq 0$), то встает новая, очень важная задача – определение направления на источник излучения (в сейсмологии – очаг землетрясения). С использованием теоремы о проекциях сторон равно-стороннего треугольника на прямую, вращающуюся вокруг его центра, был разработан метод определения угла места β на источник сигнала. На рис. 4 представлен пояснительный чертеж к определению угла места β , координат эпицентра (ЭЦ), координат гипоцентра (ГЦ) в трехмерном пространстве, не взирая на ориентацию треугольника относительно местоположения источника излучения.

Рассмотрим пример по определению координат источника по 2-му методу. При этом предположим,

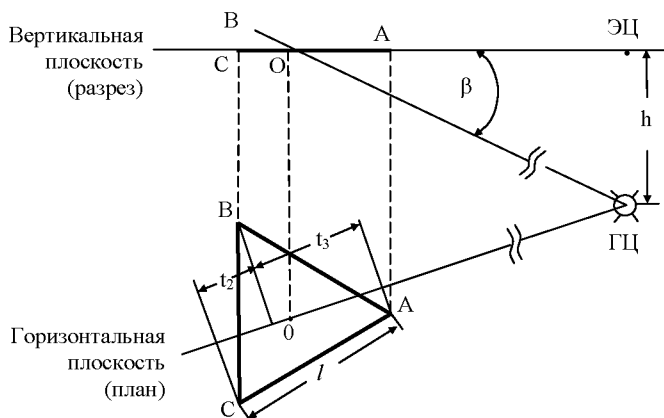


Рис. 4. Схема к определению координат эпицентра и гипоцентра в трехмерном пространстве

что сторона равно-стороннего треугольника равна 50 см, он установлен горизонтально на коренных породах земной коры. Имеется 3-канальная система регистрации сейсмического сигнала, подключенная к ЭВМ и измеряющая временные задержки. Для определения искомым координат необходимо выполнить следующие операции:

1. Определить скорость продольной волны v_p в объеме горного массива под треугольником.

2. Определить скорость поперечной волны v_s (можно вычислить из соотношения $v_p = 1,7v_s$).

3. Измерить малую и среднюю временные задержки при регистрации сейсмосигнала от источника излучения t_m и t_c .

4. Определить $\sigma = t_m / t_c$.

5. Определить по алгоритму номер n 30-градусного сектора.

6. Определить по формулам (7) или (8) (в зависимости от четности n) азимутальный угол φ .

7. Определить временные задержки t'_m и t'_c для горизонтальной плоскости.

8. Определить угол места β гипоцентра по одной из формул $\beta = \arccos t'_m / t'_c$; $\beta = \arccos t'_c / t'_m$.

9. Определить дальность до гипоцентра $d_{гц} = T_c v_p v_s / (v_p - v_s)$.

10. Определить дальность до эпицентра (ЭЦ) $d_{эц} = d_{гц} \cos \beta$.

11. Определить глубину гипоцентра $z = h = d_{гц} \sin \beta$.

В заключение следует подчеркнуть, что разработанные теоретические основы могут использоваться для определения координат источников излучения любых сигналов: звуковых, световых, тепловых, электромагнитных, радиационных, гравитационных и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Саваренский Е. Ф. Сейсмические волны. М.: Недра, 1972. 291с.
2. Ракишев Б.Р., Винокуров Л.В. Автоматизированный контроль взрывов на карьерах // Тезисы докладов на всесоюзном науч.-техн. совещании «Разработка и применение АСУ в горном производстве». Алма-Ата, 1987. С. 52-54.
3. А. с. 120571 СССР. Устройство для оценки сейсмической энергии взрыва // Винокуров Л.В., Ракишев Б.Р., Горчакова Л.В. / БИ №32, 1988.
4. Ракишев Б.Р., Винокуров Л.В. Пеленгация источников возмущения в массиве горных пород. Алматы: НИЦ «Гылым», 2002. 236 с.

УДК 534.647:622

Казахский национальный технический университет им. К. И. Сатпаева

Поступила 10.02.06г.