

Ю. И. СПИЦЫН

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ТОЧЕК
И ПАРАМЕТРОВ ИХ ВЗАЙМНОГО ПОЛОЖЕНИЯ
С ПОМОЩЬЮ ПОВЕРХНОСТНОГО
СЕЙСМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

В период научно-технической революции процесс совершенствования методологии исследований и приборостроения охватил также геодезию. Классические методы и способы геодезических измерений в большинстве не позволяют получать результаты с необходимой быстротой, хотя многие направления прикладной геодезии требуют этого.

За последние 4—5 лет арсенал приборов и аппаратуры, применяемых в геодезии, пополнился рядом цифровых автоматизированных систем, позволяющих измерять расстояния на поверхности земли и в воздухе, а также определять координаты точек и объектов.

Одной из важнейших задач прикладной геодезии является определение параметров взаимного положения точек на земной поверхности, а именно модуля и направления вектора между двумя точками, когда координаты второй из них неизвестны.

Остановимся на способах определения координат точек на земной поверхности, использующих поверхностный сейсмический эффект. В работе [8] кратко описан способ определения координат эпицентра сейсмического взрыва относительно пунктов, заданных условными координатами в единой системе, образованной сторонами квадрата, длина которых 500 м.

В его вершинах расположены четыре приемные устройства импульсов горизонтальной составляющей ударной волны. По результатам измерений моментов прихода этих импульсов к приемным устройствам производят графические построения гипербол, точка пересечения которых определяет положение эпицентра взрыва относительно вершин квадрата, являющихся полюсами гипербол. Математическая модель этого способа определения координат точек по разностям расстояний базируется на формулах работы А. П. Ющенко и А. В. Буткевича [1].

Другая сейсмическая система, кратко описанная в работе [7], функционирует на принципе фазового сравнения моментов прихода к приемным устройствам импульсов ударного возбуждения относительно начального импульса инфракрасного излучения от взрываемого заряда. Приемные устройства располагаются на местности в вершинах геодезического четырехугольника. Математическая модель обработки измерительной информации базируется на известных формулах фазового метода, описанного в работе [5].

Эти способы получения координат точек на земной поверхности применяются в прикладной и морской геодезии, сейсмометрии и других областях наук.

В предлагаемом способе определения координат точек и их взаимного положения на земной поверхности, как и в изложенных выше, используется эффект распространения вдоль поверхностного слоя грунта горизонтальной составляющей ударной волны, вызываемой искусственным сейсмическим взрывом. Способ геодезический, поскольку целью измерений является определение координат эпицентра взрыва относительно одного или нескольких приемных устройств, находящихся в ближней зоне сейсмического взрыва (два — четыре километра). Одновременно он фазометрический, потому что исходной измерительной информацией является разность моментов прихода импульсов ударного возбуждения к соответствующим приемным устройствам (ПУ).

Как известно, для определения времени распространения любого колебания, необходимо сопоставить фазу принятого колебания ϕ_i с фазой ϕ_1 колебания, полученного от некоторого опорного источника сигналов. Следовательно, разность фаз двух сигналов [5] равна

$$\Delta\varphi_i = \varphi_i - \varphi_0 = \omega(t'_i - t_0) + \varphi_0 - \omega(t'_i - t_0) + \\ + \omega\tau_i - \varphi_0 = \omega\tau_i, \quad (1)$$

где ω — частота колебаний; t'_i — текущий момент времени на приемном устройстве ПУ_i; t_0 — начальный (отсчетный) момент времени; τ_i — время распространения колебания; φ_0 — начальная фаза опорного сигнала.

Разность фаз двух колебаний может рассматриваться как мера запаздывания одного колебания по отношению к другому и выражаться в долях периода колебания, т. е. в единицах времени.

Ударные волны в ближней зоне сейсмического взрыва могут рассчитываться в акустическом приближении, поскольку при ударных волнах большой интенсивности плотность грунта и скорость распространения изменяются по месту и времени незначительно [2].

При определенном положении на местности четырех электромеханических систем, используемых в качестве датчиков первичной информации, с устройствами формирования информационного импульса, определяющего своим передним фронтом момент прихода ударной волны в данную точку, можно определить положение на местности эпицентра взрыва в условных или гауссовых прямоугольных координатах.

Назовем эти электромеханические системы приемными устройствами. Пусть четыре ПУ размещаются на равнинной территории специального полигона в вершинах квадрата со стороной не более четырех км, координаты которых X_i и Y_i определены со среднеквадратической ошибкой ± 3 м в плане.

Для определения координат эпицентра взрывы производятся в пределах площади рабочей зоны, ограниченной сторонами квадрата.

В зависимости от положения точки взрыва фронт ударной волны придет к соответствующим ПУ с неодинаковыми разностями фаз от момента его возникновения. Сформировав с помощью устройств импульсной техники передние фронты информационных импульсов и осуществив их привязку к определенному моменту формирования, можно получить разности времени распространения импульса ударного возбуждения между парами ПУ, например t_{12} , t_{13} , t_{14} (рисунок).

При прямом измерении времени t_i распространения импульса ударного возбуждения от точки взрыва до каждого ПУ достаточно было бы умножить это время на скорость распространения ударной волны v вдоль поверхности грунта, чтобы получить расстояния S_{15} , S_{25} , S_{35} и S_{45} от точки взрыва до каждого ПУ, полагая в первом приближении, что скорости распространения ударной волны по различным направлениям от центра взрыва на приемные устройства одинаковы.

Но такой способ, именуемый способом круговой линейной засечки, применим лишь в том случае, если известно положение во времени начала отсчета фазы первичного сигнала, т. е. момента возникновения ударной волны [7, 8].

Определение этого момента прямymi измерениями — превышайно сложная и ответственная задача при любом фазовом способе, и тем более сложная, поскольку она решается в поле в различных климатических и метеорологических условиях.

Задачу можно решить косвенными способами, приняв момент начала формирования импульса отклика одного из ПУ на ударное возбуждение за начало отсчета времени. При этом с моментом прихода импульса ударного возбуждения на данное ПУ попарно сравни-

Геометрическая интерпретация способа определения координат точек и параметров их взаимного положения с помощью поверхностного сейсмического эффекта.

ваются моменты прихода импульсов ударной волны к остальным трем ПУ, т. е. определяются три разности фаз.

По измеренным разностям фаз определяются разности расстояний ($S_{25} - S_{15}$), ($S_{35} - S_{15}$) и ($S_{45} - S_{15}$) как произведения скорости v распространения ударной волны на измеренные временные интервалы τ_{12} , τ_{13} и τ_{14} .

В соответствии с рисунком рассмотрим вывод расчетных формул для определения координат x_5 и y_5 эпицентра взрыва.

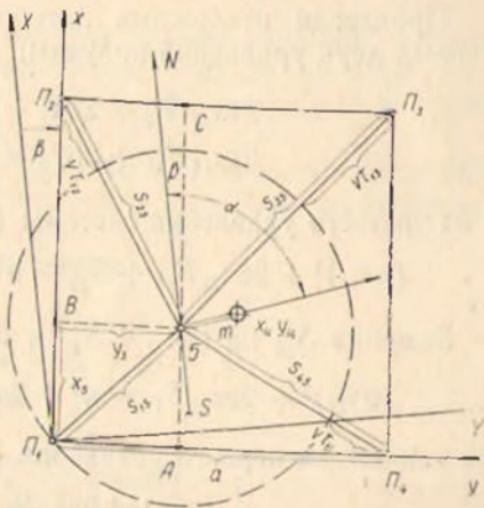
Из треугольников ($A\bar{P}_45$ и $A\bar{P}_15$), ($B\bar{P}_25$ и $B\bar{P}_15$) и ($C\bar{P}_35$ и $C\bar{P}_15$) имеем формулы:

$$\left. \begin{aligned} S_{25}^2 - (a - x_5)^2 &= S_{15}^2 - x_5^2; \\ S_{35}^2 - (a - y_5)^2 &= S_{15}^2 - y_5^2; \\ S_{45}^2 - (a - y_5)^2 &= S_{25}^2 - y_5^2, \end{aligned} \right| \quad (2)$$

где a — сторона базового квадрата, причем

$$\left. \begin{aligned} S_{25} &= v\tau_{12} + S_{15}; \\ S_{35} &= v\tau_{13} + S_{15}; \\ S_{45} &= v\tau_{14} + S_{15}; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где v — скорость распространения ударной волны.



Заменив в уравнениях системы (2) значения S_{25} , S_{35} и S_{45} через их величины из формул (3), будем иметь:

$$\left. \begin{array}{l} (v\tau_{12} + S_{15})^2 - (a - x_5)^2 = S_{15}^2 - y_5^2; \\ (v\tau_{14} + S_{15})^2 - (a - y_5)^2 = S_{15}^2 - y_5^2; \\ (v\tau_{13} + S_{15})^2 - (a - y_5)^2 = S_{25}^2 - y_5^2. \end{array} \right\} \quad (4)$$

Произведя несложные алгебраические преобразования, из первых двух уравнений получим:

$$\left. \begin{array}{l} 2v\tau_{12}S_{15} + 2ax_5 = a^2 - (v\tau_{12})^2; \\ 2v\tau_{14}S_{15} + 2ay_5 = a^2 - (v\tau_{14})^2, \end{array} \right\} \quad (5)$$

а из третьего уравнения системы (4)

$$(v\tau_{13})^2 + 2v\tau_{13}S_{15} + S_{15}^2 - a^2 + 2ay_5 - y_5^2 = S_{25}^2 - y_5^2.$$

Заменив S_{25}^2 на $(v\tau_{12} + S_{15})^2$, напишем

$$(v\tau_{13})^2 + 2v\tau_{13}S_{15} - a^2 + 2ay_5 = (v\tau_{12})^2 + 2v\tau_{12}S_{15}.$$

Но так как из первого уравнения (4)

$$(v\tau_{12})^2 + 2v\tau_{12}S_{15} = a^2 - 2ax_5,$$

то

$$(v\tau_{13})^2 + 2v\tau_{13}S_{15} - a^2 + 2ay_5 = a^2 - 2ax_5,$$

откуда

$$2v\tau_{13}S_{15} + 2ax_5 + 2ay_5 = 2a^2 - (v\tau_{13})^2. \quad (6)$$

Таким образом преобразованное третье уравнение из системы (4) содержит три неизвестных S_{15} , x_5 и y_5 , выраженные через известные величины a , v и τ_{1i} . Аналогично этому, в соответствии с выражениями (5) и (6), получим систему уравнений:

$$\left. \begin{array}{l} 2v\tau_{12}S_{15} + 2ax_5 = a^2 - (v\tau_{12})^2; \\ 2v\tau_{14}S_{15} + 2ay_5 = a^2 - (v\tau_{14})^2; \\ 2v\tau_{13}S_{15} + 2ax_5 + 2ay_5 = 2a^2 - (v\tau_{13})^2, \end{array} \right\} \quad (7)$$

где v — усредненная скорость распространения горизонтальной составляющей ударной волны.

Эта система уравнений легко решается в матричном виде на мини-ЭВМ по типовым программам решения уравнений или методом подстановки значения S_{15} в остальные уравнения системы (7).

Произведя несложные алгебраические преобразования, получим формулы для расчета координат эпицентра без коррекции на ЭВМ

$$x = \frac{a}{2} - \frac{(N_{12} N_{14}^2 + N_{14} N_{12}^2 + N_{13} N_{12}^2 - N_{14} N_{12}^2 - N_{11} N_{13}^2)}{2a(N_{13} - N_{14} - N_{12})}; \quad (8)$$

$$y = \frac{a}{2} - \frac{(N_{13} N_{14}^2 + N_{14} N_{12}^2 - N_{12} N_{14}^2 - N_{14} N_{14}^2)}{2a(N_{13} - N_{14} - N_{12})}, \quad (9)$$

где

$$N_{12} = V\tau_{12}; \quad N_{13} = V\tau_{13}; \quad N_{14} = V\tau_{14}.$$

Вычисление координат эпицентра взрыва вручную на микрокалькуляторах требует значительных затрат времени и не обеспечивает автоматизации обработки результатов измерений.

Поэтому для расчета x_5 и y_5 удобно применять мини-ЭВМ типа «Электроника—Д3-28» или «Искра—1256» и вычислять на ней матричные определители Δ , Δ_x и Δ_y .

В соответствии с [1] и уравнениями (7)

$$\Delta = \begin{vmatrix} 2v\tau_{12} & 2a & 0 \\ 2v\tau_{14} & 0 & 2a \\ 2v\tau_{13} & 2a & 2a \end{vmatrix},$$

$$\Delta_x = \begin{vmatrix} 2v\tau_{12} [a^2 - (v\tau_{12})^2] 0 \\ 2v\tau_{14} [a^2 - (v\tau_{14})^2] 2a \\ 2v\tau_{13} [2a^2 - (v\tau_{13})^2] 2a \end{vmatrix},$$

$$\Delta_y = \begin{vmatrix} 2v\tau_{12} & 2a & [a^2 - (v\tau_{12})^2] \\ 2v\tau_{14} & 0 & [a^2 - (v\tau_{14})^2] \\ 2v\tau_{13} & 2a & [2a^2 - (v\tau_{13})^2] \end{vmatrix}.$$

Тогда по формулам Крамера

$$x_5 = \frac{\Delta_x}{\Delta} \text{ и } y_5 = \frac{\Delta_y}{\Delta}.$$

Положение информационных импульсов на числовой оси определяется знаком τ_{1i} в зависимости от того, какой из четырех попарно сравниваемых во времени импульсов будет стартовым для счисления временных интервалов, а какой импульсом «стоп». Знак разности фаз определяется логическими узлами аналого-цифрового преобразователя автоматизированной геодезической системы, преобразующего разности фаз τ_{1i} в разности расстояний $v\tau_{1i}$, по которым и решается система уравнений (7).

Формулы (7) работают и за пределами площади квадрата, однако технические возможности чувствительности приемных устройств не позволяют производить измерения за пределами рабочей зоны, да в этом и нет надобности.

Положение приемных устройств в вершинах квадрата мотивировано простотой реализации идеи коррекции погрешностей в определении скорости распространения ударной волны как в техническом, так и в математическом аспектах; другие положения ПУ не позволяют сделать этого.

Территория специальных полигонов, как правило, равнинная, слабо пересеченная, с уклонами рельефа не более 1—2°, а измеренные разности расстояний ut_{ij} не более одного километра. При заданной точности определения координат эпицентра взрыва ± 10 м поправка за наклон линий на один-два порядка меньше заданной точности (в пределах метра), а поправками за приведение линий длиной не более 1 км на плоскость проекции Гаусса—Крюгера также можно пренебречь. Поправка в измеренные разности расстояний ut_{ij} за их приведение к уровню моря не вводится, так как измерения проводятся в условной системе координат, за начало высот рельефа которой выбирается средняя отметка рабочей зоны.

Используя для расчета координат мини-ЭВМ типа «Электроника ДЗ-28» или специальный микропроцессор, можно этим способом определять координаты эпицентра взрыва от каждого из четырех ПУ в раздельных каналах измерений, принимая за начало отсчета времени в каждом канале начало формирования переднего фронта импульса отклика ПУ на ударное воздействие. Тогда средние значения координат будут равны

$$x'_5 = \frac{\sum_{i=1}^{i=4} x_5}{4}; \quad y'_5 = \frac{\sum_{i=1}^{i=4} y_5}{4}.$$

Задача уравнивания результатов измерений при заданной точности определения координат ± 10 м не возникает.

При определении этим способом положения эпицентра взрыва в проекции Гаусса—Крюгера необходимо вычислить угол в поворота координатных осей условной системы относительно осей системы координат Гаусса—Крюгера, рассчитать и ввести поправки в координаты x'_5 и y'_5 . Для определения параметров взаимного положения эпицентра взрыва и точки, заданной координатами в рабочей зоне, модуль и направление вектора между ними вычисляют из решения обратной геодезической задачи.

Эта математическая модель принята в качестве основы в разработанной нами автоматизированной геодезической системе определения модуля и направления вектора между двумя точками на специальном полигоне с использованием поверхностного сейсмического эффекта и хорошо реализуется в программе расчета этих параметров на мини-ЭВМ и ЭВМ типа ЕС с регистрацией результатов расчета на внешних устройствах отображения измерительной информации.

При выводе рабочих формул (7) нами было поставлено в первом приближении условие равенства скоростей распространения ударной волны по всем направлениям, чего в реальных условиях никогда не бывает, кроме случая абсолютной однородности физических свойств грунта на всей площади рабочей зоны. Для минимизации погрешностей в измеренных разностях расстояний σt_{1i} за счет неоднозначности скорости v необходимо, во-первых, определять среднюю скорость распространения ударной волны для площади рабочей зоны и, во-вторых, производить ее коррекцию между парами ПУ, определяющих t_{1i} .

Список литературы: 1. Буткевич А. В. Исследования по решению вычислительных задач сфероидической геодезии. — М.: Недра, 1964. 2. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. — М.: Физматгиз, 1968. 3. Кинкулькин И. Е., Рубцов В. Д., Фабрин М. А. Фазовый метод определения координат. — М.: Советское радио, 1979. 4. Ленк А. Электромеханические системы. — М.: Мир, 1978. 5. Полевой В. А. Основы математической обработки результатов радиогеодезических измерений. — М.: Недра, 1971. 6. Сигорский В. П. Математический аппарат инженера. 2-е изд. — М.; Киев: Техника, 1977. 7. Способ определения положения источника сигнала. Пат. 1539522 (Великобритания). — Изобретения в СССР и за рубежом, 1979, № 18. 8. Титов И. В. Способ определения параметров ударной волны. — Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки, 1977.