

## МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ РАДІОТЕХНІЧНОЮ СИСТЕМОЮ СЕЙСМОЛОКАЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ ПРИ ВИКЛЮЧЕННІ ПАРАМЕТРА ШВИДКОСТІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ СЕЙСМОХВИЛІ З РОЗРАХУНКІВ

О. М. ШИНКАРУК, І. В. ГУРМАН

Сутність методу полягає у точному визначенні пеленга та наближеного дальності до об'єкта тріадою ненаправлених пасивних датчиків і відрізняється тим, що шукані координати визначаються як координати точки перетину ліній гіперболи і пеленга, які є лініями положення об'єкта, при забезпеченні інваріантності розрахунків до топології датчиків і до використання параметра швидкості розповсюдження хвилі.

*Ключові слова:* визначення координат, швидкість хвилі.

### ВСТУП

Результати аналізу патентних джерел інформації дозволяють відзначити, що за останні 5–7 років нові технічні рішення сейсмічних систем контролю набули нового напрямку розвитку, пов'язаного з реалізацією функції локації такими системами. Зростання інтересу, як відзначається у [1], до пасивної сейсмолокації обумовлене тим, що її використання дозволить суттєво підвищити завадостійкість і розширити функціональні можливості радіотехнічною системою сейсмолокаційного контролю, які визнаються зараз одним з найперспективніших напрямків розвитку сучасних технологій безпеки.

Практична реалізація принципів пасивної сейсмолокації для супроводження об'єктів, які рухаються по поверхні землі, пов'язана з необхідністю точного визначення різниці часу прийому сигналів сейсмодатчиками, розташованими на відстані 4–6 м [1], а також визначення швидкості розповсюдження сейсмохвилі для розрахунку різниць дальностей від датчиків до об'єкта. В роботі [2] розглянуто метод визначення швидкості сейсмохвилі в реальному масштабі часу, проте при перетині об'єктом чутливої зони в місці встановлення тріади сейсмічних датчиків можливе незабезпечення визначення швидкості сейсмохвилі, а отже і координат з компенсацією систематичної похибки. Також основною складністю в розробці сейсмолокатора є усунення впливу параметрів ґрунту як середовища розповсюдження пружних коливань на швидкість поширення сейсмічної хвилі. На відмінну від радіолокації, де швидкість розповсюдження вважається практично фіксованою через однорідність середовища, в сейсмолокації швидкість залежить від нашарування ґрунту, щільності, вологості і неоднорідності шарів [3] і може змінюватись в 1,5 і більше рази для певної ділянки місцевості. Зазначене робить актуальним розробку методу визначення координат із виключенням параметра швидкості з розрахунків, що становить мету роботи.

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Основними положеннями діючого методу з виключенням швидкості з розрахунків є [4]:

- визначення наближеного пеленга об'єкта локації;
- визначення наближеного значення відстані від точки спостереження до об'єкта локації;
- відбраковки хибних координат.

Як відзначається у [5], похибка визначення пеленга збільшується зі збільшенням дальності до об'єкта і не перевищує  $\pm 5^\circ$ . Отже, на дальності більшій за 50 м похибка визначення координат може становити 7–8 м, що суттєво знижує достовірність виявлення об'єкта. Причинами достатньо значимої похибки із застосуванням діючих методів є:

1. Не враховується сферичність фронту розповсюдження хвилі та спрощення процесу отримання математичних моделей визначення пеленгу.
2. Не достатньо чітко обґрунтовано вибір топології тріади сейсмодатчиків для реалізації сейсмолокації (точка спостереження завжди відповідає центру системи координат).
3. Не приділяється увага вибору точки спостереження, відносно якої здійснюється пеленгування при заданій топології сейсмодатчиків.

З метою усунення зазначених причин розробимо метод із виключенням параметра швидкості з розрахунків при врахуванні сферичності фронту розповсюдження сейсмохвилі. В основу метода покладено порядок функціонування пеленгатора Сайбеля [6]. Враховуючи те, що різниці дальностей можна виразити через швидкості розповсюдження сейсмохвилі, подамо визначення кута пеленга об'єкта (див. табл. 2.1) у вигляді моделі

$$\gamma = \arctg\left(\frac{2at_{AC} - (a + x_3)t_{AB}}{(y_3 t_{AB})}\right), \quad (1)$$

де  $t_{AB}$ ,  $t_{AC}$  — час затримки розповсюдження сейсмічної хвилі між датчиками, які розміщені у точках  $A(x_A, y_A)$ ,  $B(x_B, y_B)$ ,  $C(x_C, y_C)$ .

Формула (1) щодо рівносторонньої і рівнобазової прямокутної топології сейсмодатчиків, з точністю до позначення індексів при параметрах часу затримки, збігається з формулою пеленга, розглянутого в [5], при отриманні якої не враховано сферичність фронту розповсюдження сейсмохвилі. Отже, виявлено протиріччя у

поясненні фізичної суті моделі пеленга об'єкта. Однакові математичні вирази отримані різними авторами, з одного боку, при врахуванні сферичності розповсюдження хвилі, а з іншого боку — зазначається про протилежне. Це потребувало дослідження властивостей пеленгатора Сайбеля.

Пеленгатор Сайбеля, згідно з виразом (1), забезпечує визначення пеленга із виключенням параметра швидкості при врахуванні сферичності розповсюдження хвилі. Але координата точки спостереження  $Y_0(0, y_0)$  на перетині лінії пеленга і осі  $OY$  буде змінюватись при зміні місцеположення об'єкта, рис. 1.

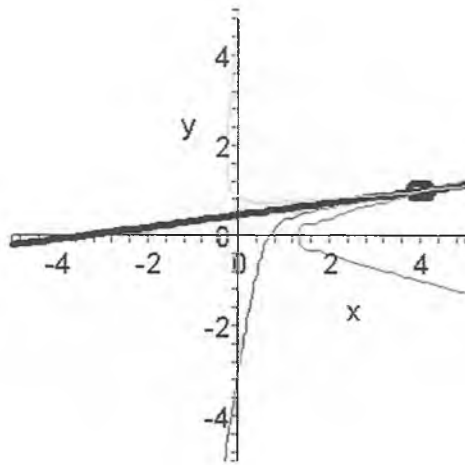


Рис. 1. Визначення точки спостереження при пеленгуванні об'єкта із врахування сферичності фронту розповсюдження сейсмохвилі:  
1 — лінія пеленга; 2 — лінії гіпербол;  
 $Y_0(0, y_0)$  — точка перетину лінією пеленга осі ординат;  $X_0(x_0, 0)$  — точка перетину лінією пеленга осі абсцис;  $D$  — точка місцеположення об'єкта  $D(x_D, y_D)$

Координати точок  $Y_0(0, y_0)$ ,  $X_0(x_0, 0)$ ,  $D(x_D, y_D)$  визначаються тільки при відомому значенні швидкості [6]. У результаті аналізу рис. 1 встановлено властивості лінії пеленга:

1) лінія пеленга перетинає вісь абсцис в будь-якій точці, а вісь ординат в певних межах, що не перевищують значення бази датчиків;

2) межі зміни ординати точки перетину пеленгом осі ординат не змінюються при зміні швидкості хвилі.

Це дозволило висунути гіпотезу щодо наявності раціональної топології триади сейсмодатчиків для наближеного визначення координат об'єкта із врахуванням сферичності фронту розповсюдження сейсмохвилі.

Гіпотеза про раціональність топології триади датчиків. Раціональною топологією триади сейсмодатчиків для наближеного визначення координат об'єкта із врахуванням сферичності фронту розповсюдження сейсмохвилі і виключенням параметра швидкості з розрахунків буде така, що характеризується мінімальним розмахом варіації точки спостереження як точки перетину пеленгом осі ординат.

З метою підтвердження висунутої гіпотези розглянемо сутність визначення координат системою контролю при виключенні параметра швидкості хвилі з розрахунків. На рис. 2 подана топологія датчиків та пеленг об'єкта, що визначений за методом Сайбеля при застосуванні формули (1).

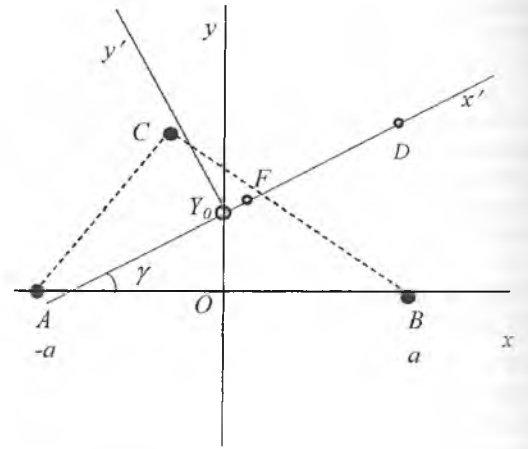


Рис. 2. Визначення координат об'єкта в точці  $D$ :  $A, B, C$  — точки розміщення датчиків

Незалежними параметрами, що контролюються, є дві різниці дальностей. Складемо два рівняння для розрахунку координат об'єкта при врахуванні параметра швидкості

$$\begin{cases} R_{AC} = \sqrt{(x_D - x_A)^2 + (y_D - y_A)^2} - \\ - \sqrt{(x_D - x_C)^2 + (y_D - y_C)^2} \\ R_{AB} = \sqrt{(x_D - x_A)^2 + (y_D - y_A)^2} - \\ - \sqrt{(x_D - x_B)^2 + (y_D - y_B)^2} \end{cases}, \quad (2)$$

де  $D(x_D, y_D)$  — точка розміщення об'єкта з відповідними координатами.

З метою виключення параметра швидкості з розрахунків поділимо праві і ліві частини рівнянь системи (2). Перепишемо рівняння (2) у системі координат  $x'O'y'$  з заміною координат

$$\begin{cases} x = x' \cos \gamma - y' \sin \gamma; \\ y = y_0 + x' \sin \gamma - y' \cos \gamma, \\ y' = 0, \end{cases}$$

що забезпечить заміну лінійних координат на полярні, одна з яких — пеленг відомий. При цьому враховують, що точки топології і бази датчиків становлять:

$$A(-a, 0), B(a, 0), C(x_C, y_C);$$

$$a = \frac{|AB|}{2}, b = \frac{|AC|}{2}, c = \frac{|BC|}{2}.$$

Очевидним є тотожність  $L \equiv x'$  (див. рис. 2), тобто для визначення шуканої відстані до об'єкта  $L$  необхідно визначити ординату перетину пеленгом осі  $OY$   $Y_0(0, y_0)$ . Тоді, при  $x_A = -a$ ;  $x_B = a$ ;  $y_A = y_B = 0$  отримаємо:

$$\frac{t_{AC}}{t_{AB}} = \frac{-\sqrt{(L\cos\gamma - x_C)^2 + (y_0 + L\sin\gamma - y_C)^2}}{\sqrt{(L\cos\gamma + a)^2 + (y_0 + L\sin\gamma)^2} - \sqrt{(L\cos\gamma - a)^2 + (y_0 + L\sin\gamma)^2}}, \quad (3)$$

де  $L$  — відстань від точки спостереження (точки перетину пеленгом осі ординат  $Y_0(0, y_0)$ ) до об'єкта.

Відмінність даної моделі від відомої [5] полягає у врахуванні параметра  $y_0$ , що впливає на точність визначення координат. Параметр  $C_0$  визначається, в свою чергу, через  $t_{AB}$ ,  $t_{AC}$  — час затримки розповсюдження сейсмічної хвилі між датчиками, які розміщені у точках  $A$ ,  $B$ ,  $C$  і  $V_C$  — середнє значення швидкості розповсюдження сейсмохвилі. В результаті моделювання роботи пеленгатора Сайбеля встановлено, що ордината точки спостереження або межі зміни ординати точки перетину лінією пеленга осі ординат не перевищують базу датчиків і знаходяться у межах  $Y_0 \in [0, a]$  навіть при зміні швидкості хвилі. Отже, для наближеного визначення відстані до об'єкта  $L$  при виключенні параметра швидкості зробимо допущення, що  $Y_0 \in [0, a]$ .

Також встановлено, що для визначеної топології триади датчиків існує максимальне і мінімальне значення ординати точки перетину пеленгом осі ординат (точки спостереження)  $Y_{0\max}$ ,  $Y_{0\min}$ , які не залежать від параметра швидкості хвилі. Тому, при відомому середньому значенні швидкості розповсюдження сейсмохвилі  $V_C$ , якщо значення ординати лежить у межах  $Y_0 \in [Y_{0\max}, Y_{0\min}]$ , тоді його визначають за формулою

$$y_0 = y_F - x_F \operatorname{tg} \gamma, \quad (4)$$

де  $y_F, x_F$  — координати точки спостереження  $F$  [6].

Показник  $y_0$  враховує сферичність розповсюдження сейсмохвилі, що відповідає даним дослідження [1], де зазначено, що максимальна похибка при умові, що  $y_0 = 0$ , не перевищує  $8^\circ$ . Якщо значення ординати лежить за межами розмаху варіації  $y_0 \notin [y_{0\max}, y_{0\min}]$ , тоді значення ординати визначають як середнє з розмаху варіації параметра ординати точки перетину лінією пеленга осі ординат

$$y_0 = y_{cp} = \frac{y_{0\max} + y_{0\min}}{2}, \quad (5)$$

де  $y_{0\max}$ ,  $y_{0\min}$  — максимальне і мінімальне значення ординати точки перетину лінією пеленга осі ординат відповідно;  $y_{cp}$  — середнє арифметичне максимального і мінімального значення ординати точки перетину лінією пеленга осі ординат (ордината точки спостереження за розробленим методом).

При застосуванні формули (3) визначають відстань до об'єкта  $L$  як функцію від наближено

визначеної ординати перетину пеленгом осі  $OY$   $y_0$  і точного значення пеленга  $\gamma$

$$L = F(y_0, \gamma). \quad (6)$$

Математичний вираз показника відстані  $L$  як функції зазначених параметрів отримано при застосуванні програмного середовища MAPLE.

При складанні рівняння для розрахунку відстані до об'єкта  $L$ , як довжини відрізка  $L = [Y_0 D]$ , слід враховувати те, що для рівнобедреної прямокутної топології ( $y_C = a, x_C = 0$ ) характерне мінімальне значення розмаху варіації точки спостереження  $y_{p\min} = y_{0\max} - y_{0\min}$ , що мінімізує похибку визначення координат. При цьому точка спостереження практично збігається з центром системи координат  $xOy$ ,  $Y_0(0, y_0) \equiv O(0, 0)$ . Тому раціональним для даної топології є значення ординати  $y_0 = 0$ .

Розмах варіації відстані до об'єкта  $L \in [L_{\min}, L_{\max}]$  для відповідних значень  $y_0 \in [y_{0\max}, y_{0\min}]$  визначено також за формулою (6). При цьому допускають, що межі зміни ординати точки перетину лінією пеленга осі ординат не перевищують базу датчиків і знаходяться у межах  $y_0 \in [0, a]$ , рис. 3.

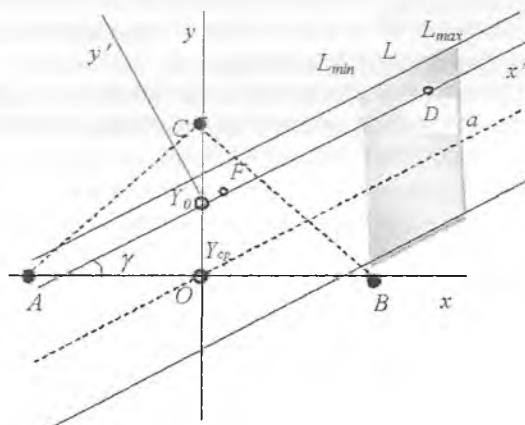


Рис. 3. Визначення координат об'єкта із виключенням параметра швидкості з розрахунків:

- $|Y_0 D|$  — лінія пеленга, як результат роботи пеленгатора Сайбеля;  $Y_{cp}$  — середнє арифметичне максимального і мінімального значення ординати точки перетину лінією пеленга осі ординат (ордината точки спостереження за розробленим методом);
- $D(\gamma, L, y_0)$  — точка місцеположення об'єкта

Отже, пеленг об'єкта при виключенні параметра швидкості хвилі з розрахунків визначають точно, а дальність і ординату точки спостереження наближено. Площа сектора наближеного визначення місцеположення об'єкта становить  $S_0 \approx aL$ .

Сутність методу визначення координат радіотехнічною системою сейсмолокаційного контролю на основі триад ненаправлених датчиків довільної топології при виключенні параметра швидкості розповсюдження сейсмохвилі з розрахунків полягає у точному визначенні пеленга та наближеному дальності до об'єкта триадою

ненаправлених пасивних датчиків і відрізняється тим, що шукані координати визначаються як координати точки перстину ліній гіперболи і пеленга, які є лініями положення об'єкта, при забезпеченні інваріантності розрахунків до топології датчиків і до використання параметра швидкості розповсюдження хвилі. Зазначене спрощує інженерне обладнання радіотехнічною системою сейсмолокаційного контролю ділянки місцевості, а також зменшує систематичну похибку визначення координат через недостовірність апріорних даних щодо значення швидкості хвилі.

### ВИСНОВОК

1. Рациональным типом топологии триады сейсмодатчиков при назначении координат объекта из исключением параметра скорости из расчетов след считать равнобедренную прямоугольную. При этом угол пеленга определяется точно, а дальность приближена.

2. При назначении координат из исключением параметра скорости распространения сейсмохвиль из расчетов важным этапом является выбор топологии триады сейсмодатчиков, учета координаты точки наблюдения и сферичности фронта распространения сейсмохвиль, что позволяет компенсировать соответствующую систематическую погрешность определения дальности.

Подавшим направлением исследования является определение погрешности расчета координат объекта локацией радиотехнической системой.

### Література

1. Шевченко В. П. Анализ фазовых методов пассивной сейсмической локации / В.П. Шевченко // Современные технологии безопасности / под. ред. М. В. Рейсбах. — М. : ЗАО НИКИРЭТ, 2004. — № 3. — С. 23–26.
2. Устройство обнаружения классификации сейсмических сигналов с адаптацией по электропроводности. Заявка на изобретение. RU № 2003118052 А, МПК G01V 1/00. Крюков И. Н., Иванов В. А., Дюгованец А. П., Онуфриев Н. В., Шуалов А. Г.; Опубл. 20.12.2004.
3. Царьов Ю.О. Оцінка похибки визначення місцеположення об'єкта пасивним сейсмолокаційним засобом // 36. наук. пр. «Труди академії» / за ред. І. С. Руснака. — К. : НАОУ, 2009. — № 7 (93). — С. 133–139.
4. Дудкин В. А. Вариант построения пассивных сейсмических локаторов, основанных на измерении временных задержек // Современные технологии безопасности. — 2005. — № 4. — С. 24–29.

5. Прокина Н.В. Пеленгация наземных объектов с использованием сейсмических датчиков / Н.В. Прокина, В.А. Дудкин. // Датчики и системы / под. ред. Кнеллер В. Ю. — М. : ИПУ РАН, 2010. — № 1. — С. 24–29.

6. Сайбель А.Г. Разностно-дальномерный метод радиопеленгования / Сайбель А. Г. // Радиотехника / под ред. Ю. В. Гуляева. — М. : «Радиотехника», 2003. — № 4. — С. 39–41.

Надійшла до редколегії 04.09.2012

**Шинкарук Олег Миколайович**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри радіотехніки і телекомунікацій Хмельницького національного університету. Наукові інтереси пов'язані з розробкою теоретичних і практичних засад забезпечення надійності радіотехнічних систем, математичним моделюванням й оптимізацією технічних рішень, когерентної обробки сигналів в імпульсній радіолокації.

**Гурман Іван Васильович**, завідувач лабораторією кафедри комп'ютерних систем та мереж Хмельницького національного університету, наукові інтереси пов'язані з розробкою методів пасивної координатометрії.



УДК 621.372

**Метод определения координат радиотехнической системой сейсмолокационного контроля при исключении параметра скорости распространения сейсмической волны из расчетов** / О. Н. Шинкарук, И.В. Гурман // Прикладная радиоэлектроника: науч.-техн. журнал. — 2012. — Том 11. № 3. — С. 413–416.

В статье раскрыта сущность метода определения пеленга и приближенно дальности к объекту триадой ненаправленных пассивных датчиков.

*Ключевые слова:* определение координат, скорость волны.

Ил. 03. Библиогр.: 06 назв.

UDC 621.372

**Method of determining coordinates by a radio engineering seismic location checking system at the elimination of parameter of seismic wave propagation speed from calculations** / O.N. Shinkaruk, I.V. Gurman // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. — 2012. Vol. 11. № 3. — P. 413–416.

The paper considers the essence of the method of determining a bearing and approximately distance to the object by a triad of undirected passive sensors.

*Keywords:* determination of coordinates, speed of wave.

Fig. 03. Ref.: 06 items.