

УДК 621.372.5

М.І. Лисий

Національна академія Державної прикордонної служби України ім. Б. Хмельницького,  
Хмельницький

## МЕТОД КОМПЕНСАЦІЇ СИСТЕМАТИЧНОЇ ПОХИБКИ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕПОЛОЖЕННЯ ОБ'ЄКТА ЛОКАЦІЇ

*Розроблено метод компенсації систематичної похибки визначення місцеположення об'єкта локації при використанні у топології системи розподіленого сейсмічного волоконно-оптичного датчика.*

**Ключові слова:** місцеположення, систематична похибка, швидкість сейсмохвилі.

### Вступ

Із упровадженням сучасної моделі охорони кордону, згідно якій одним із етапів її створення є технічна розбудова сухопутного кордону, особливої ваги набуває процес отримання інформації про перетин кордону правопорушниками у масштабі реального часу. Дослідження вказують на те, що потенційну можливість щодо визначення місцеположення на сухопутній ділянці кордону з різними географічними умовами мають сейсмічні засоби охорони. Аналіз робіт [1 – 3] у галузі сейсмолокаційних засобів охорони дозволив виділити такі основні задачі, вирішення яких забезпечить реалізацію функцій виявлення і визначення місцеположення правопорушників: усунення неоднозначності під час точного визначення місцеположення, що виникає при рішенні системи ірраціональних рівнянь, за якою визначають координати; компенсація систематичної похибки визначення місцеположення, яка виникає при невідповідності розрахункового значення швидкості сейсмохвилі її істинному значенню, вирішення останньої становить мету роботи.

### Дослідження напрямків компенсації систематичної похибки швидкості розповсюдження сейсмічної хвилі

Суттєвою проблемою побудови топології сейсмічної локаційної системи охорони є компенсація систематичної похибки розрахунків у процесі визначення місцеположення порушника, яка виникає при не співпаданні істинної швидкості розповсюдження сейсмічної хвилі та розрахункової, [1, 2]. Відомо такі напрямки компенсації зазначеної похибки [1]:

використання методів, у яких параметр швидкості виключається із обчислень; використання;

методів автоматичної корекції розрахунку координат.

Основою методів, у яких швидкість виключається із системи рівнянь розрахунку координат є введення додаткових рівнянь з функціональною залежністю між координатами порушника і швидкістю розповсюдження сейсмічної хвилі. Технічна реалізація таких методів виражається у збільшенні кількості дискретних сейсмодатчиків у одному сеймоприймачі. Різниця часу приходу фронту сейсмічної хвилі до

двох датчиків є параметром, по якому оцінюються координати порушника із застосуванням різницево-дальномірного методу локації.

Для виключення швидкості із обчислення, тобто реалізації першого напрямку компенсації похибки швидкості розповсюдження сейсмічної хвилі, необхідно скласти систему рівнянь (1) у випадку вирішення її методом підстановки і систему (2) у випадку вирішення її методом ділення

$$\begin{cases} R_1 \ x, y = V_c t_{12}; \\ R_1 \ x, y = V_c t_{13}; \\ R_1 \ x, y = V_c t_{14}; \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{R_1 \ x, y}{R_2 \ x, y} = \frac{V_c t_{13}}{V_c t_{23}}; \\ \frac{R_3 \ x, y}{R_4 \ x, y} = \frac{V_c t_{43}}{V_c t_{53}}; \end{cases} \quad (2)$$

де  $R \ x, y$  – функція, яка описує залежність координат порушника  $x, y$  від параметру, що вимірюється;  $t_{mn}$  – час затримки надходження сейсмічного сигналу між  $m$  та  $n$  датчиками;  $V_c$  – швидкість сейсмічної хвилі у напрямку на датчики сейсмоприймача.

При цьому допускають, що  $V_c$  для напрямків на датчики  $m$  та  $n$  однакова. У системах рівнянь (1), (2) після підстановки або ділення швидкість виключається із подальших обчислень. Технічне рішення реалізації математичної моделі сейсмічного локатора, який функціонує за системою (1) базується на використанні 4 сейсмодатчиків, системи (2) – 5 сейсмодатчиків [1, 4, 5]. Екстенсивність рішення проблеми компенсації систематичної похибки, на основі методу із виключенням параметру швидкості із обчислень, збільшує вартість системи у 1,5 – 2 рази.

Іншим напрямком є використання методу автоматичної корекції розрахунку координат. При установці і налагодженні системи використовують вимірювання затримки між сейсмічною і акустичною хвилями, остання розповсюджується у всіх напрямках, на відміну від сейсмічної, з однаковою швидкістю, що дозволяє адаптувати роботу сейсмічних датчиків. Технічне рішення такого методу потребує проведення підриву заряду вибухівки у точці з відомими координатами [6]. Зрозуміло, що у масштабі реального часу впливу порушника на сейсмічні датчики такий метод недоцільно застосовувати, а отже похибка визначення швидкості буде мати місце під час природних змін властивостей ґрунту.

Перспективним є адаптація значення швидкості сейсмічної хвилі відповідно до зміни електропровідності ґрунту, значення якої корелює до зміни швидкості. Недоліком такого методу є також екстенсивність розв'язання проблеми компенсації похибки швидкості, що виражається у необхідності дообладнання сейсмічної системи локації системою телеконтролю датчиків електропровідності ґрунту [7, 8].

## Дослідження обмежень і припущень, які приймаються у моделях визначення місцеположення

Для забезпечення кругової зони виявлення сейсмічним приймачем (СП), останній повинен складатися не менше ніж з трьох датчиків, які розташовуються не на одній лінії. Місцеположення порушника визначається як точка перетину трьох окружностей з центрами у місцях розташування датчиків, або двох пар гіпербол, фокуси яких також співпадають з координатами датчиків.

Для усіх розглянутих методів компенсації швидкості розповсюдження сейсмічної хвилі приймається припущення щодо однаковості швидкості сейсмохвилі у напрямках на датчики. Розглянемо детальніше сутність даного припущення.

Фронт сейсмічної хвилі розповсюджується радіально у всіх напрямках відносно координат джерела збудження коливань ґрунту. Викривлення фронту сейсмічної хвилі внаслідок неоднорідності властивостей ґрунту еквівалентно зміні радіальної швидкості в межах кута, під яким із місцеположення об'єкта видно базу датчиків СП.

Умовно розділимо швидкість розповсюдження на  $V_c$  – швидкість розповсюдження сейсмічної хвилі у зоні розміщення СП і  $V_p, V_{p1}, V_{p2}$  – радіальні швидкості розповсюдження сейсмічної хвилі у зоні, яка є зовнішньою по відношенню до зони розміщення СП. Використання вузькобазових СП дозволяє зробити припущення щодо  $V_p = V_{p1} = V_{p2}$ , тобто радіальна швидкість розповсюдження поза зоною розміщення СП однакова у межах сектору, який визначається кутом  $\varphi$ . Вона може змінюватися, але лише у радіальному напрямку в межах від місцеположення порушника і до зони розміщення СП, яка наближено обмежується окружністю, що проходить через точки встановлення датчиків. Зроблене припущення диференціює обмеження щодо постійності швидкості сейсмохвилі і дозволяє обмежитися лише розглядом швидкості у місці розміщення СП. Аналогічно і для точки  $H_2$ ,  $V_{c2}^1 = V_{c2}^2 = V_{c2}$  (рис. 1).

Вектора швидкостей  $V_{c1}, V_{c2}, V_{ci}$  для множини точок  $H_1, H_2, H_i$  будуть перетинатися. Тоді для зони розміщення СП швидкість розповсюдження сейсмічної хвилі у будь-якому напрямку має бути постійною,  $V_{c1} = V_{c2} = V_{ci} = V_c$ .

Зроблений висновок, на основі уточнення загальноприйнятого припущення, дозволив визначити у загальному виді шукану швидкість. Із рис. 1 маємо

$$|H_1 D_1| - |H_1 D_2| = a,$$

де  $a$  – різниця відстаней від точки  $H_1$  і до точок  $D_1, D_2$ .

Тоді з урахуванням раніше прийнятого припущення

$$V_p t_1 - V_p t_2 = V_p t_{12} = a, \quad (3)$$

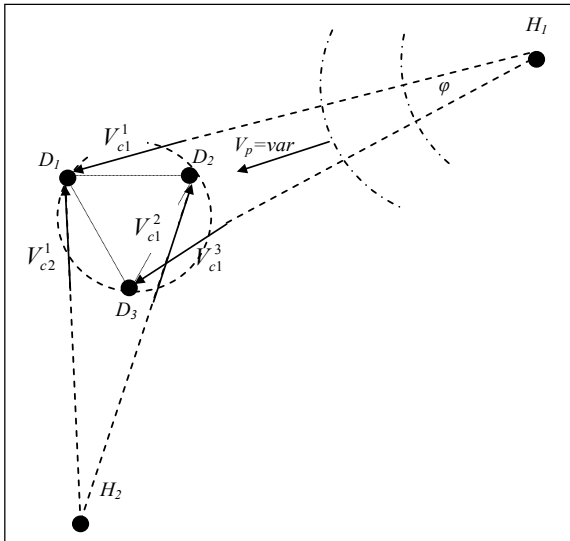


Рис. 1. Швидкість розповсюдження сейсмічної хвилі у зоні розміщення СП:  $V_{c1}^1, V_{c1}^3$  – скаляр швидкості сейсмохвилі у напрямку від точки  $H_1$  і до точок  $D_1, D_3$  відповідно;  $V_{c1}^2, V_{c2}^2$  – скаляр швидкості сейсмохвилі у напрямку від точки  $H_2$  і до точок  $D_1, D_2$  відповідно.

де  $t_1, t_2$  – час розповсюдження сейсмохвилі від точки  $H_1$  і до точок  $D_1, D_2$  відповідно;  $t_{12}$  – різниця часу розповсюдження сейсмохвилі точками розміщення датчиків  $D_1, D_2$  відповідно.

Із урахуванням уточненого припущення

$$V_p t_2 + V_c t_2 - t_1 - V_p t_2 = V_c t_{12} = a. \quad (4)$$

Порівняння виразів (3), (4) дозволяє відзначити, що обмеження й допущення щодо функціонування пасивної системи сейсмічної локації з уточненнями будуть такі:

1. Постійність швидкості розповсюдження сейсмічної хвилі у всіх напрямках зони встановлення СП.

2. У межах кута видимості бази датчиків з точки місцезнаходження порушника радіальна швидкість розповсюдження сейсмічної хвилі може одночасно змінюватися, але тільки до зони розміщення СП.

Наслідком зроблених обмежень і допущень є достатність визначення значення швидкості сейсмічної хвилі, яка розповсюджується у будь-якому одному напрямку у межах зони встановлення СП, постійно або періодично при змінах навколишнього середовища для забезпечення реалізації методу автоматичної корекції розрахунку координат, основою якого є модель дискретного визначення швидкості сейсмохвилі.

### Модель дискретного визначення швидкості сейсмохвилі при застосуванні розподіленого волоконно-оптичного датчика

Варіант визначення істинної швидкості при впливі об'єкта на розподілений волоконно-оптичний

датчик (ВОД), що розміщується вздовж лінії гіперболи, асимптота якої паралельна лінії рівносигнальної зони показано на рис. 2.

При використанні розподіленого ВОД лінія його встановлення у чутливій зоні СП буде характерною лінією топології пасивної системи локації, оскільки вплив об'єкта на розподілений ВОД вказує на факт його місцезнаходження на цій лінії.

Якщо лінія розміщення ВОД відповідає гіперболі, тоді довжини параметрів гіперболи будуть відомими величинами. Нехай асимптота гіперболи паралельно проходить вісі  $Oy$ , тобто рівносигнальної зоні датчиків  $D_1, D_2$ , рис. 2. Виходячи із властивостей гіперболи і даних рис. 2 отримаємо

$$\operatorname{tg}30^\circ = \frac{\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - a^2}}{a}. \quad (5)$$

Звідси

$$a = \frac{\sqrt{3}}{4} d. \quad (6)$$

При знаходженні порушника у будь-якій точці ВОД параметр  $a$  буде постійним, а різниця відстаней між порушником і сейсмотатчиками

$$\Delta S = 2a. \quad (7)$$

Тоді істинна швидкість становитиме

$$V_{ir} = \frac{\Delta S}{t_{13}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{d}{t_{13}}. \quad (8)$$

де  $V_{ir}$  – істинна швидкість при знаходженні порушника на лінії гіперболи.

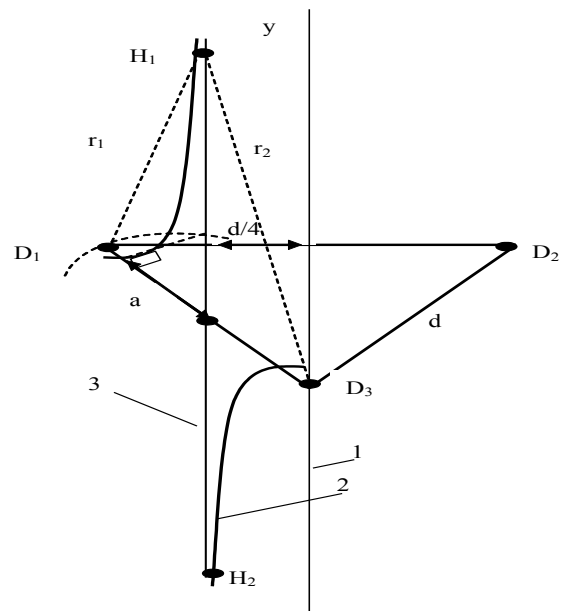


Рис. 2. Визначення швидкості розповсюдження сейсмохвилі при застосуванні розподіленого ВОД:  $a$  – параметр гіперболи;  $r_1, r_2$  – відстані між місцезнаходженням порушника і датчиками  $D_1, D_2$  відповідно; 1 – лінія рівносигнальної зони; 2 – лінія гіперболи; 3 – асимптота гіперболи

Момент впливу порушника на ВОД буде вказувати, що затримка  $t_{13}$  відповідає відомій величині параметра  $a$ . Виведемо рівняння визначення різниці відстаней між об'єктом і сейсмодатчиками при встановленні ВОД вздовж асимптоти гіперболи. Згідно даних рис. 2 маємо

$$\Delta S_a = r_2 - r_1 = \sqrt{y + \frac{\sqrt{3}}{3} d^2 + \left(\frac{d}{4}\right)^2} - \sqrt{y - \frac{\sqrt{3}}{3} d^2 + \left(\frac{d}{4}\right)^2}, \quad (9)$$

де  $y$  – ордината місцеположення порушника.

Знайдемо границю виразу (9). При цьому невідзначеність виразу вирішено шляхом множення і ділення на суму коренів, після спрощення отримаємо:

$$\lim_{y \rightarrow \infty} \Delta S_a = \frac{\sqrt{3}}{2} d. \quad (10)$$

Підставимо (6) у (7) і порівняємо з (10), тоді

$$\Delta S_a = \Delta S \Big|_{y \rightarrow \infty}. \quad (11)$$

Отже характеристика  $\Delta S_a$  як і  $\Delta S$  є подвоєним параметром гіперболи, фокуси якої співпадають з точками  $D_1, D_2$ , а вираз (9) істинний. Оцінимо похибку визначення  $V_{ia}$  від заміни лінії положення гіперболи її асимптотою. Аналогічно (8) маємо:

$$V_{ia} = \Delta S_a / t_{13}. \quad (12)$$

Тоді відношення швидкостей

$$n_t = \frac{V_{ir}}{V_{ia}} = \frac{\Delta S}{\Delta S_a}. \quad (13)$$

де  $n_t$  – коефіцієнт точності.

Вищевикладене дозволяє відзначити:

1. Відношення швидкостей, а отже і коефіцієнт точності більшим за 1,1 приводить до отримання похибок визначення координат у п'ять і більше метрів, що значно зменшує ефективність наведення групи оперативного реагування на порушника.

2. Для віддаленості місцеположення порушника від датчиків на відстані рівній базі датчиків коефіцієнт точності практично рівний одиниці, а значить і різниця відстаней розрахованих за (7) і (9) будуть однаковими.

3. Похибки визначення швидкостей будуть суттєвими лише на відстані меншій за базу датчиків СП.

Загалом розроблений метод дозволяє компенсувати систематичну похибку швидкості розповсюдження сейсмічної швидкості за рахунок застосування у структурі системи волоконно-оптичних приладів.

## Список літератури

1. Дудкин В.А. Вариант построения пассивных сейсмических локаторов, основанных на измерении временных задержек // *Современные технологии безопасности*. – 2005. – № 4. – С. 24-29.
2. Иванов В.А. Решение задачи определения местоположения нарушителя на охраняемой площадке по сейсмическому каналу в прямоугольной системе координат // *Радиотехника*. – 2004. – № 2. – С. 85-88.
3. Дудкин В.А., Вольсков А.А. Методы определения пеленга объекта, основанные на измерении временных задержек сейсмических сигналов // *Современные технологии безопасности*. – 2007. – №1. – С. 12-19.
4. Сейсмическое устройство определения координат объектов. Пат. RU №2273867 C1, МПК G01V 1/16. Крюков И.Н., Иванов В.А., Козинный А.К., Матвеев В.В.; Опубл. 10.04.2006.
5. Способ обнаружения и определения текущего местоположения нарушителя охраняемой зоны. Пат. RU №2311686 C2, МПК G08V 13/00 Колигаев С. О.; Опубл. 27.04.2007.
6. Способ привязки и адаптации сейсмодатчиков к местности. Пат. RU №2202810 C1, МПК G01V 1/16. Крюков И.Н., Иванов В.А., Дюгованец А.П., Афанасенко А.В.; Опубл. 20.04.2003.
7. 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.
8. Иванов В.А., Онуфриев Н.В. Развитие принципов адаптации сейсмических средств охраны участков местности // *Радиотехника*. – 2005. – № 2. – С. 85-88.
9. Разностно-дальномерный способ пеленгования источника радиоизлучения и реализующее его устройство. Пат. RU №2258242 C2, МПК G01S3/46, 11/02. Сайбель А. Г.; Опубл. 20.02.2005.

Надійшла до редколегії 2.10.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. І. С. Катеринчук, Національна академія Державної прикордонної служби України, Хмельницький.

## МЕТОД КОМПЕНСАЦИИ СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТА ЛОКАЦИИ

Н.И. Лысый

*Разработан метод компенсации систематической погрешности определения местоположения объекта локации при использовании в топологии системы распределенного сейсмического волоконно-оптического датчика.*

**Ключевые слова:** местоположение, систематическая погрешность, скорость сейсмоволны.

## METHOD OF SYSTEMATIC ERROR INDEMNIFICATION OF DETERMINATION SITE THE OBJECT OF LOCATION

N.I. Lisy

*The method of systematic error indemnification of determination site the object of location is developed at the use in the topology of the system of the distributed seismic fiber-optic sensor.*

**Keywords:** location, systematic error, speed of seismic waves.