

УДК 621.3

О.Б. Лантвойт<sup>1</sup>, М.І. Лисий<sup>2</sup>, І.М. Плосконос<sup>3</sup><sup>1</sup>Адміністрація Державної прикордонної служби України, Київ<sup>2</sup>Національна академія Державної прикордонної служби України, Хмельницький<sup>3</sup>Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ І РОЗРОБКА НОВОГО ТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕПОЛОЖЕННЯ ОБ'ЄКТА ПАСИВНИМИ ЗАСОБАМИ ЛОКАЦІЇ

*Розроблено нове технічне рішення визначення місцеположення об'єкта трьома пасивними датчиками з круговою зоною виявлення і при виключенні параметра швидкості розповсюдження хвилі з розрахунків*

**Ключові слова:** місцеположення, пасивна локація, сейсмічний засіб.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Останнім часом спостерігається ріст інтересу до пасивної сейсмічної локації (далі локації), що дозволяє суттєво підвищити завадостійкість і розширити функціональні можливості сейсмічних засобів виявлення, які є перспективним напрямком розвитку сучасних технологій безпеки [1, 2].

До такого типу засобів можна віднести вітчизняну розробку «Периметр-3», «Форшлаг» і «Азимут» – засоби російських виробників. Зазначені засоби забезпечують визначення місцеположення об'єкта за рахунок обробки сигналу сейсмічними приймачами. Проте, необхідна локаційна функція в засобі «Периметр-3» досягається на основі векторно-фазового методу визначення координат, що потребує деяку структурну надлишковість приймачів, а отже впливає на вартість виробу, що становить не менше 300 грн./м. Дещо меншу вартість має засіб «Форшлаг», проте точність визначення координат забезпечується на рівні 40% від дальності дії, що, очевидно, потребує суттєвого покращення.

**Формулювання мети статті.** Основною складністю в розробці локатора є усунення впливу параметрів ґрунта, як середовища розповсюдження пружних коливань, на швидкість поширення сейсмічної хвилі [3]. 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 і може змінюватись в 1,5 і більше рази для певної ділянки місцевості. Зазначене робить **актуальним** розробку нового технічного рішення визначення місцеположення (ВМП) об'єкта при виключенні параметра швидкості з розрахунків, що є **метою роботи**, для досягнення якої проведемо аналіз методів пасивної локації.

### Виклад основного матеріалу

З метою розробки нового технічного рішення щодо ВМП, дамо порівняльну характеристику існуючих методів, табл. 1.

Недоліки існуючих методів ВМП:

1. Відсутня модель з аналітичним визначенням координат об'єкта для довільної топології 3-х датчиків, а застосування чисельного методу розрахунку координат дає наближений результат і потребує проведення ітераційних розрахунків (послідовних наближень), що унеможлиблює обробку значного потоку даних в масштабі реального часу.

2. При виключенні параметру швидкості з розрахунків математичні моделі або не враховують сферичність розповсюдження фронту хвилі (топологія приймача з 3-х датчиків), що збільшує систематичну похибку зі збільшенням відстані до цілі, або модель визначається для більшої кількості датчиків (топологія приймача з 5-ти датчиків), що збільшує вартість системи контролю на третину, або застосовують чисельний метод розрахунку координат (топологія приймача з 4-х датчиків) що дає наближений результат і потребує проведення ітераційних розрахунків.

3. Метою усунення зазначених недоліків розробимо, нове технічне рішення ВМП із виключенням параметра швидкості з розрахунків при врахуванні сферичності фронту розповсюдження сейсмохвилі, в основу якого покладено порядок функціонування пеленгатора Сайбеля [7]. Пеленгатор Сайбеля забезпечує визначення пеленга із виключенням параметра швидкості при врахуванні сферичності розповсюдження сейсмохвилі. Але, координата точки спостереження, як перетин лінії пеленга і осі ОУ, буде змінюватись при зміні місцеположення об'єкта.

У результаті аналізу функціонування пеленгатора Сайбеля встановлено властивість лінії пеленга: вона перетинає вісь абсцис в будь-якій точці, а вісь ординат в певних межах. Це дозволило висунути гіпотезу щодо наявності раціональної топології тріади сейсмотатчиків для наближеного визначення пеленга об'єкта із врахуванням сферичності фронту розповсюдження сейсмохвилі.

**Гіпотеза.** Раціональною топологією тріади сейсмотатчиків для наближеного визначення пелен-

га об'єкта із врахуванням сферичності фронту розповсюдження сейсмохвилі і виключенням параметра швидкості з розрахунків буде такою, що характери-

зується мінімальним розмахом варіації точки спостереження, як точки перетину пеленгом вісі ординат.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика методів визначення місцеположення пасивними ненаправленими датчиками

Тип топології, кількість датчиків	Місцеположення об'єкта	Параметр швидкості	Сферичність фронту хвилі	Метод розрахунку координат	Автор, застосування, джерело
Рівностороння, 3	Координати X, Y	враховується	враховується	точний аналітичний	Іванов В. А. сейсмолокація [4]
Рівностороння, 3	Координати X, Y	не враховується	не враховується	наближений аналітичний	Дудкін В. О. сейсмолокація [3]
Лінійна довільна, 3	Координати X, Y	враховується	враховується	точний аналітичний	Антонюк В.П. радіолокація [5]
Рівнобедрена, 3	Координати X, Y	враховується	враховується	точний аналітичний	Єфремов А. С. радіолокація [6]
Довільна, 3	Лінія пеленга	враховується	враховується	точний аналітичний	Сайбель О. Г. сейсмолокація [7]
Довільна, 3	Координати X, Y	враховується	враховується	послідовних наближень	радіогеодезія [8]
Квадрат, 4	Координати X, Y	враховується	враховується	точний аналітичний	Дудкін В. О. сейсмолокація [3]
Довільна, 4	Координати X, Y	враховується	враховується	точний аналітичний	Шевченко В. П. сейсмолокація [9]
Довільна, 4	Координати X, Y	не враховується	враховується	послідовних наближень	Шевченко В. П. сейсмолокація [9]
Конверт, 5	Координати X, Y	не враховується	враховується	наближений аналітичний	Дудкін В. О. сейсмолокація [3]
Довільна, 3	Координати X, Y	враховується	враховується	точний аналітичний	досліджується у роботі

Розглянемо ВМП, що дозволить підтвердити висунуту гіпотезу. Нехай ВМП здійснюється трьома сейсмічними пасивними датчиками з круговою чутливою зоною, причому топологія їх може бути довільною, а проведення розрахунків не потребує використання параметра швидкості розповсюдження сейсмічної хвилі (рис. 1).

Згідно даних рис. 1 сутність нового технічного рішення ВМП об'єкта при виключення параметра швидкості розповсюдження хвилі з розрахунків буде такою:

1. Розраховують кут пеленга за формулою

$$\gamma = \arctg\left(\frac{2at_{AC} - (a + x_3)t_{AB}}{y_3t_{AB}}\right), \quad (1)$$

де  $\gamma$  – кут пеленга об'єкта, визначення якого подано в [7];

$t_{AB}, t_{AC}$ , – час затримки розповсюдження сейсмічної хвилі між датчиками, які розміщені у точках А, В, С;

$A(-a, 0), B(a, 0), C(x_3, y_3)$  – координати датчиків;

$$a = \frac{|AB|}{2}, \quad b = \frac{|AC|}{2}, \quad c = \frac{|BC|}{2} \text{ – бази датчиків.}$$

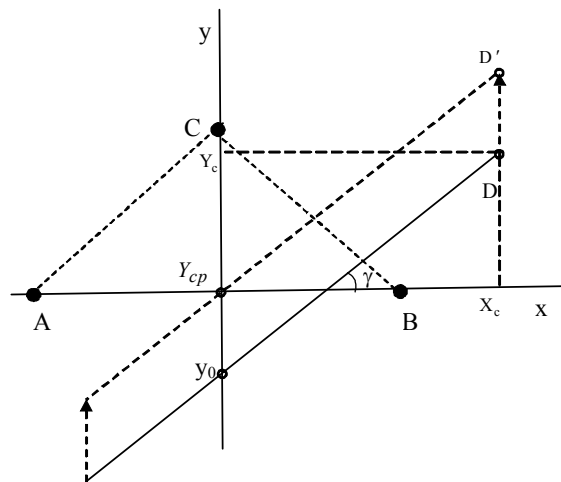


Рис. 1. Визначення місцеположення об'єкта із виключенням параметру швидкості з розрахунків:  $|Y_0D|$  – лінія пеленга, як результат роботи пеленгатора Сайбеля;  $|Y_{cp}D'|$  – лінія, яка паралельна лінії пеленга;  $Y_{cp}$  – середнє арифметичне максимального і мінімального значення координати точки перетину лінією пеленга вісі ординат (ордината точки спостереження за розробленим методом);  $D(Y_c, X_c)$  – координата місцеположення

2. Здійснюють умовно паралельне перенесення лінії пеленга  $|Y_0D|$  в точку  $Y_{cp}$ , і отримують наближено лінію пеленга об'єкта  $|Y_{cp}D'|$ .

3. Складають рівняння для розрахунку відстані до об'єкта, як довжини відрізка  $L = [Y_{cp}D']$

$$\frac{t_{AC}}{t_{AB}} = \frac{B - \sqrt{a^2 + L^2 - 2aL \cos(90 - \gamma)}}{B - \sqrt{a^2 + L^2 - 2aL \cos(\gamma)}}, \quad (2)$$

де  $L$  – відстань від точки спостереження до об'єкта;

$$B = \sqrt{a^2 + L^2 - 2aL \cos(180 - \gamma)}.$$

4. Розраховують координати місцеположення об'єкта

$$X_c = L \cos \gamma, \quad Y_c = L \sin \gamma - Y_{nc}, \quad (3)$$

де  $Y_{nc}$  – похибка визначення ординати об'єкта.

Уточнення місцеположення зводиться до мінімізації похибки  $Y_{nc}$ .

З цією метою проведемо моделювання варіації точки спостереження в залежності від місцеположення об'єкта та топології сейсмотатчиків при застосуванні програми аналітичних розрахунків MAPLE (рис. 2).

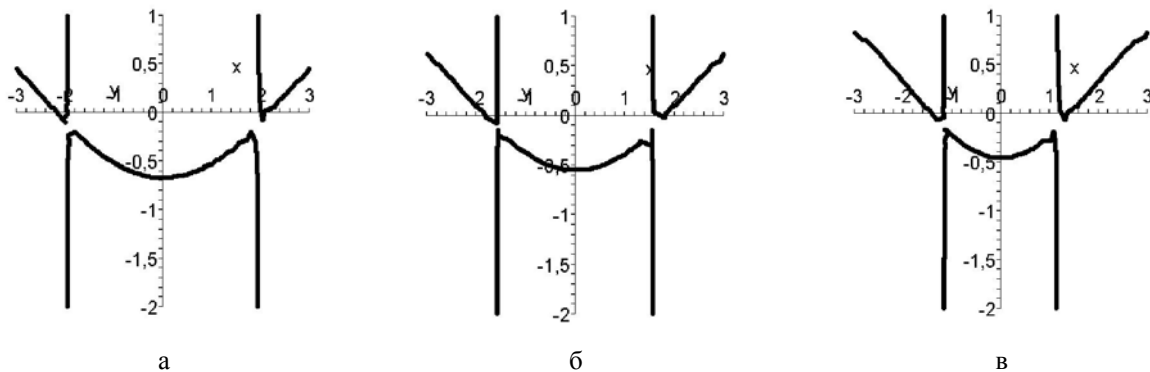


Рис. 2. Графіки зміни координати точки перетину осі ОУ лінією пеленга в залежності від віддаленості об'єкта від центра системи координат для різної топології триади датчиків: база  $2a = 2$  м; лінією можливого місцеположення об'єкта є коло із радіусом 3 а ; а – прямокутна рівнобедренна топологія датчиків; б – рівнобедренна топологія датчиків; в – рівностороння топологія датчиків

Початкові дані для моделювання такі:

1)  $2a = 2$  м – база сейсмотатчиків які розміщуються вздовж осі абсцис;

2) місцеположення об'єкта задається у вигляді радіус-вектора з центром в початку системи координат і довжиною  $L = \{3a, 10a, 30a\}$ ;

3) ордината сейсмотатчика С приймає значення  $y_3 = \{0,4a; 0,7a; 1,0a; 1,3a; 1,7a; 2,4a\}$ ;

4) абсциса сейсмотатчика С приймає значення  $x_3 = \{0; 0,3a; 1,7a; 2,4a\}$ .

Проведемо аналіз отриманих графіків рис. 2. Встановлено, що в межах значень  $y_3 = \overline{1,0 \dots 1,3}$  спостерігається симетричність мінімального  $Y_{0min}$  і максимального  $Y_{0max}$  значення відносно осі абсцис, а також мінімізується розмах варіації  $Y_p = Y_{0max} - Y_{0min}$  (рис. 2). Відхилення від рівнобазової топології приводить до збільшення різниці  $Y_p = Y_{0max} - Y_{0min}$ .

Також, перенесення початку радіус-вектора місцеположення об'єкта з точки (0; 0) в точку, яка є центром описаного кола навколо триади датчиків, суттєво не змінює характеристики пеленгування.

З метою оптимізації вибору топології для забезпечення ВМП оцінимо характеристики точки спостереження (табл. 2).

В таблиці прийняті такі позначення:

$Y_{0max}$ ,  $Y_{0min}$  – максимальне і мінімальне значення координати точки перетину лінією пеленга вісі ординат відповідно;

$Y_p$  – різниця варіації максимального і мінімального значення координати точки перетину лінією пеленга вісі ординат;

$Y_{cp}$  – середнє арифметичне максимального і мінімального значення координати точки перетину лінією пеленга вісі ординат (ордината точки спостереження за розробленим методом);

$Y_{tc}$  – ордината точки спостереження для визначення пеленга за діючим методом;

$Y_{nc}$  – похибка визначення ординати об'єкта.

З використанням даних табл. 1 і результатів аналізу різних методів ВМП, розглянутих в [2; 3], проведемо порівняльну характеристику розробленого і діючих методів (табл. 3).

Адекватність проведених розрахунків підтверджується співпаданням результатів з даними, отриманими для діючого методу [2].

Таблиця 2

Характеристики точки спостереження при різних топологіях тріади сейсмодатчиків

Координата $u_3$ датчика $C$ ( $a=1$ )	0,4 а	0,7 а	1,0 а	1,3 а	1,7 а	2,4 а	
$L = 3a$	$Y_{0\max}$	0,2	0,35	0,49	0,62	0,79	1,06
	$Y_{0\min}$	-1,44	-0,89	-0,67	-0,55	-0,46	-0,37
	$Y_p = Y_{0\max} - Y_{0\min}$	1,64	1,24	1,16	1,17	1,25	1,43
	$Y_{cp} = \frac{Y_{0\max} + Y_{0\min}}{2}$	-0,62	-0,27	-0,09	0,04	0,17	0,34
	$Y_{tc}$	–	–	0	–	0,6	–
	$Y_{\Pi} = \frac{Y_p}{2} +  Y_{tc} - Y_{cp} $	–	–	0,67 (0,58 при $Y_{tc} = Y_{cp}$ )	–	1,06 (0,63 при $Y_{tc} = Y_{cp}$ )	–
$L = 10a$	$Y_{\Pi} = \frac{1,19}{2} +  0,6 - 0,25 $	–	–	–	–	0,95 (0,6 при $Y_{tc} = Y_{cp}$ )	–
$L = 30a$	$Y_{\Pi} = \frac{1,16}{2} +  0,6 - 0,27 $	–	–	–	–	0,91 (0,58 при $Y_{tc} = Y_{cp}$ )	–

Таблиця 3

Порівняльна характеристика точнісних характеристик методів ВМП при виключення параметра швидкості розповсюдження сейсмохвилі з розрахунків

Метод визначення місцеположення	Похибка визначення ординати місцеположення об'єкта для двох типів топологій тріади сейсмодатчиків, м (в дужках подано збільшення похибки діючого методу по відношенню до розробленого)	
	прямокутна рівнобедренна	рівностороння
при не врахуванні сферичності фронту сейсмохвилі	3,5 (6 раз)	7 (10 раз)
при не врахуванні топології точки спостереження (сферичність фронту сейсмохвилі враховано)	0,67 а (на 9 %)	1,0 а (на 37 %)
при врахуванні топології точки спостереження і сферичності фронту сейсмохвилі (розроблений метод)	0,58 а	0,63 а

Так, за даними [2] похибка пеленга об'єкта для дальності 50 м становить  $1^0$ , тобто похибка визначення ординати становить 0,87 м, що відповідає методу ВМП при не врахуванні топології точки спостереження (табл. 2). Саме так можна класифікувати діючий метод [2]. Результати аналізу даних табл. 1 і 2 дозволили підтвердити висунуту гіпотезу і відзначити наступне:

для рівнобедреної прямокутної топології ( $u_3 = a$ ,  $x_3 = 0$ ) характерне мінімальне значення розмаху варіації  $Y_p = Y_{0\max} - Y_{0\min}$ , а середнє значення ординати точки спостереження практично співпадає з ординатою центра системи координат, тобто точки (0; 0), що відповідає мінімальній похи-

бці визначення ординати  $Y_c$  місцеположення об'єкта. Тому, таку топологію слід вважати раціональною;

для рівносторонньої топології середнє арифметичне максимального і мінімального значення координати точки перетину лінією пеленга вісі ординат не співпадає з ординатою точки спостереження для визначення пеленга за діючим методом, що вносить додаткову похибку ВМП, яка компенсується при врахуванні перенесення ординати точки спостереження;

зі збільшенням відстані від точки спостереження до об'єкта, похибка визначення ординати об'єкта зменшується, що пояснюється вирівнюванням фронту розповсюдження сейсмохвилі.

**Висновок**

1. Раціональним типом топології триади сейсмодатчиків при ВМП із виключенням параметра швидкості із розрахунків слід вважати рівнобедрену прямокутну. При цьому абсциса місцеположення об'єкта визначається точно, а ордината із похибкою, що не перевищує 0,6а.

2. При використанні діючого методу ВМП на основі рівносторонньої топології сейсмодатчиків і застосуванню метода визначення пеленга із врахуванням сферичності фронту розповсюдження сейсмохвилі, отримують похибку визначення координат на рівні, що не перевищує довжину бази датчиків. Зазначена похибка може бути зменшена до рівня 0,6а за умови вибору точки спостереження як середнього арифметичного максимального і мінімального значення координати точки перетину лінією пеленга вісі ординат, при цьому значення похибки на порядок менше для дальньої зони сейсмолокації чим для діючого методу, в якому не враховується сферичність розповсюдження сейсмохвилі, а також на чверть базової відстані менше похибка визначення ординати об'єкта, за умови розрахунку пеленга згідно методу [2].

3. При ВМП локатором з виключенням параметра швидкості розповсюдження сейсмохвилі з розрахунків важливим етапом є вибір топології триади сейсмодатчиків, врахування координати точки спостереження і сферичності фронту розповсюдження сейсмохвилі, що дозволяє компенсувати відповідну систематичну похибку визначення абсциси місцеположення об'єкта і зменшити до рівня половини базової відстані похибку визначення ординати місцеположення об'єкта.

4. В середньому похибка визначення ординати зменшена на 23 % і в 8 раз, в залежності від діючого методу, з яким порівнюється розроблений.

**Список літератури**

1. Шевченко В. П. Анализ фазовых методов пассивной сейсмической локации / В.П. Шевченко // Современные технологии безопасности / под. ред. М.В. Рейсбих. – М.: ЗАО НИКИРЭТ, 2004. – № 3. – С. 23-26.
2. Прокина Н. В. Пеленгация наземных объектов с использованием сейсмических датчиков / Н.В. Прокина, В.А. Дудкин. // Датчики и системы / под. ред. В.Ю. Кнеллер/ – М.: ИПУ РАН, 2010. – № 1. – С. 24-29.
3. Дудкин В.А. Варианты построения пассивных сейсмических локаторов, основанных на измерении временных задержек / В.А. Дудкин // Современные технологии безопасности / под. ред. М.В. Рейсбих. – М.: ЗАО НИКИРЭТ, 2005. – № 4. – С. 24-29.
4. Звезжинский С.С. Средства обнаружения и системы охранной сигнализации : Уч. пособ. для студ. высш. уч. зав. / С.С.Звезжинский, В.А. Иванов / под ред. А.В. Петракова. – М.: МГУСИ, 2008. – 260 с.
5. Антонюк В.П. Шляхи підвищення ефективності пасивних гіперболічних систем / В.П. Антонюк // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» / за ред. З. Г. Піхи. – Львів: НУ «ЛП», 2009. – № 645. – С. 30-37.
6. Ефремов А.С. Система сбора и обработки данных с пространственно разнесенных пунктов / А.С. Ефремов, А.Ю. Молотова, И.В. Роголин // Системотехника, 2004. – № 2/ [Электронный ресурс]. – Режим доступа 09.11.2009: www.systech.miem.edu.ru. – Заголовок з екрану.
7. Сайбель А.Г. Разностно-дальномерный метод радиопеленгования / А.Г. Сайбель // Радиотехника / под ред. Ю.В. Гуляева. – М.: Радиотехника, 2003. – № 4. – С. 39-41.
8. Большаков В.Д. Радиогеодезические и электрооптические измерения : Учебник для вузов / В.Д. Большаков, Ф. Деймлик, А.Н.Голубев, В.П. Васильев – М.: Недра, 1985. – 303 с.
9. Шевченко В.П. Анализ фазовых методов пассивной сейсмической локации / В.П. Шевченко // Современные технологии безопасности / под. ред. М.В. Рейсбих. – М.: ЗАО НИКИРЭТ, 2004. – № 3. – С. 23-26.

Надійшла до редколегії 3.03.2010

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

**АНАЛИЗ МЕТОДОВ И РАЗРАБОТКА НОВОГО ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТА ПАССИВНЫМИ СРЕДСТВАМИ ЛОКАЦИИ**

О.Б. Лантвойт, Н.И. Лысий, И.Н. Плосконос

*Разработано новое техническое решение определения местоположения объекта тремя пассивными датчиками с круговой зоной обнаружения и при исключении параметра скорости распространения волны из расчетов.*

**Ключевые слова:** местоположение, пассивная локация, сейсмическое средство.

**THE ANALYSIS OF METHODS AND DEVELOPMENT OF THE NEW TECHNICAL DECISION OF DEFINITION OF A SITE OF OBJECT BY PASSIVE MEANS OF A LOCATION**

O.B. Lantvoit, M.I. Lysyi, I.M. Ploskonos

*The new technical decision of definition of a site of object by three passive gauges with a circular zone of detection is developed and at an exception of parametre of speed of distribution of a wave of calculations.*

**Keywords:** location, passive location, seismic mean.