

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СЕЙСМОАКУСТИЧНОЇ ЛОКАЦІЇ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ

Робота пов'язана з дослідження поверхових хвиль в рішенні задач сейсмоакустичної локації під час переміщення рухомих об'єктів, та в оцінюванні точності визначення координат рухомих об'єктів різного походження. В розв'язанні зворотних задач сейсмоакустичної локації досліджуються поверхні хвилі, які виникають на поверхні Землі під час руху об'єкту що переміщується. Точність розв'язку оберненої задачі безпосередньо залежить від помилок це: визначення часу вступу сейсмічної акустичної хвилі, швидкісної характеристики середовища, шумів різного походження, вибору геометрії розстановки датчиків.

Обґрунтована необхідність в дослідженні поверхневих хвиль, а саме Хвиль Релея і хвиль Лява, тому що вони поширюються по поверхні Землі. Площина коливань релеєвських хвиль вертикальна до поверхні Землі та напрямку поширення, а хвилі Лява мають горизонтальну площину коливань. В якості однієї з розглядаємих задач сейсмоакустичної локації за джерело енергії рухомого об'єкту ми приймаємо сейсмічну енергію, яка виникає під час крокування людини. Крокування людини є періодичним. Воно збуджує імпульси зміщення у геологічному середовищі. За відомим коефіцієнтом жорсткості середовища можна визначити, яким буде максимальне відхилення сейсморприймача.

В роботі досліджені поверхові хвилі, Релея та Лява в рішенні задач сейсмоакустичної локації під час переміщення людини, та визначені фактори що впливають на точності визначення координат рухомого об'єкту. З погляду використання поверхневих хвиль для вирішення задач сейсмоакустичної локації для визначення рухомих об'єктів вони мають такі переваги: енергія цих хвиль не зникає у глибині Землі, а поширюється під її поверхнею; на їх утворення йде більш ніж 60 % енергії джерела, а на утворення глибинних хвиль тільки 8 %, то такі хвилі мають набагато більшу енергію;

З цього зроблено висновок, що навіть за незначних енергій джерела збудження поверхові хвилі можуть бути використані для рішення задач сейсмоакустичної локації під час переміщення рухомих об'єктів та в оцінюванні точності визначення координат цих об'єктів.

Ключові слова: поверхові хвилі, сейсмоакустична локація, рухомий об'єкт, сейсморприймач.

Вступ. З початком військових дій в Україні різко зросла загроза тероризму. Ця загроза стосується як великих підприємств, так і тих, що займаються забезпеченням життєдіяльності людей (ТЕЦ, електростанції, зокрема атомні, газові трубопроводи та розподільні пункти тощо). На сьогодні криза з мігрантами на кордоні Білорусі та Польщі стає гострішою з дня у день, що приводить до зростання загрози несанкціонованого перетину кордону України. На певних ділянках Україна почала впорядковувати свій кордон так, щоб ускладнити його перехід як окремим особам, так і цілим групам порушників. Тому актуальним є створення таких систем охоронної сигналізації, які можуть працювати цілодобово, в автоматичному режимі, передаючи інформацію про координати порушника до єдиного центру.

Аналіз останніх досліджень, виділення не вирішених раніше частин проблеми. Одним із актуальних напрямків розвитку інтелектуальних сейсмічних систем охорони периметра є підвищення достовірності виявлення та класифікації типу порушника (людина, група людей, наземна техніка) в умовах впливу численних завадових факторів природно-кліматичного, біологічного та техногенного характеру [1].

При русі людини чи техніки з'являються сейсмічні хвилі, які можна умовно розділити на дві складові – вертикальну та горизонтальну. Горизонтальна сейсмічна хвиля (поверхнева хвиля, релієвська хвиля) поширюється вздовж межі розділу ґрунту та повітря. Саме вона реєструється сейсмічними сенсорами і надалі обробляється. Поширення хвилі вздовж межі розділу середовищ обумовлює її характеристики, які залежать від багатьох факторів: виду ґрунту та його стану, анізотропії, стану підстилаючої поверхні та інших факторів. При аналізі таких сигналів необхідно враховувати наявність природних мікросейсмів (будівництво, дерева, ЛЕП, дороги). Таким чином, корисний сигнал від порушника виникає в умовах численних завадових факторів [2, 3]. Причому діапазони основних характеристик корисних сигналів та перешкод, як правило, перекриваються.

Сейсмічні сигнали містять інформацію про факт переміщення, про місцезнаходження об'єкта, що рухається, про його тип. Виходячи з цього, обробка сейсмічних сигналів має бути спрямована на вирішення задач виявлення об'єкта, що рухається, визначення його типу (класифікація), поточну оцінку його координат. Істотне значення мають вимоги обробки сигналів у реальному часі та малого енергоспоживання, що забезпечує значний час роботи в автономному режимі, а також високий рівень сигналів, що заважають, обумовлених присутністю сейсмічного фону [4-7].

Питання дослідження проблем геофізичного моніторингу, сейсмоакустичної локації, визначення просторових координат і потужності джерел сейсмоакустичних хвиль розглядалися в наукових працях: Дудкін, С.С. Звезинський, В.А. Іванов, І.М. Крюков, Є.С. Нежевенко, М.А. Райфельд, А.А. Спектор, Г.К. Чистова, Цибульчіка Г.М., Романова В.Г., Яновська Т.Б., Dziewonski AM, Anderson DI, Nolet G. G.L. Goodman, R.A. Gramann, Z. Liang, A. Pakhomov, L. Peck, A. Sicignano, G. Succi, та ін.

У доступних опублікованих дослідженнях науковців не достатньо зверталась увага дослідженню питань в оцінюванні точності визначення координат рухомих об'єктів різного походження до розв'язання оберненої задачі сейсмоакустичної локації. Крім того, не завжди враховується вимога стабілізації ймовірності хибної тривоги, а також той факт, що системи охорони відносяться до систем реального часу, де затримки у прийнятті рішення неприпустимі. Точність розв'язку оберненої задачі безпосередньо залежить від помилок це: визначення часу вступу сейсмічної акустичної хвилі, швидкісної характеристики середовища, шумів різного походження, вибору геометрії розстановки датчиків. З результатів аналізу опублікованих робіт слід, що практично невивченим є потенційно більш точний підхід до вирішення завдання визначення моментів вступу хвиль із застосуванням методів комбінаторної оптимізації.

Мета статті. Дослідження поверхових хвиль в рішенні задач сейсмоакустичної локації під час переміщення рухомих об'єктів та в оцінюванні точності визначення координат рухомих об'єктів різного походження.

Виклад основного матеріалу. Сьогодні у системах охоронної сигналізації використовують сейсмоакустичні датчики, які встановлюють на поверхні Землі. Сучасні датчики можуть працювати цілодобово, в автоматичному режимі. В розв'язанні зворотних задач сейсмоакустичної локації в роботі пропонується дослідити поверхні хвилі, які виникають на поверхні Землі під час крокування людини та переміщення автомобільного транспорту.

Є чотири типи сейсмічних хвиль: первинні хвилі (primary waves), вторинні хвилі (secondary waves), хвилі Релея та хвилі Лява. Перші два типи ще називають глибинними, тому що вони проникають у глибини Землі. Хвилі Релея і хвилі Лява ще називають поверхневими хвилями тому, що вони поширюються по поверхні Землі. Теорія розповсюдження сейсмічних волн в реальних середовищах базується, в основному, на лінійній теорії упругості. Для упругої середовища или любой среды при нагрузках, меньших предела упругости, справедлив закон Гука, устанавливающий прямо пропорциональную зависимость между нагрузкой и деформацией.

Площина коливань релеєвських хвиль вертикальна до поверхні Землі та напрямку поширення, а хвилі Лява мають горизонтальну площину коливань. Швидкості S-хвиль та P-хвиль зв'язані таким співвідношенням [1,2]:

$$\gamma = \frac{V_S}{V_P} = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} \quad (1)$$

де V_S – швидкість S-хвилі; V_P – швидкість P-хвилі; ν – коефіцієнт Пуансона.

Знаючи V_S та γ , легко визначити коефіцієнт Пуансона та швидкість хвиль Релея:

$$V_P = \frac{0,87+1,12\nu}{1+\nu} \cdot V_S \quad (2)$$

де V_P – швидкість хвиль Релея.

P-хвилі та S-хвилі є об'ємними. Їх енергія поширюється сферично. Концентрація цієї енергії залежно від відстані r до джерела через геометричне розходження буде зменшуватися відповідно до $1/4\pi r^2$. Крім того, енергія хвиль буде втрачатися на тертя через неідеальну пружність середовища. Таке ослаблення можна виразити множником $e^{-2\alpha r}$. Отже, енергія об'ємної сейсмічної хвилі в геологічному середовищі одночасно розсіюється внаслідок геометричного розходження і поглинається через неідеальну пружність. Залежність цієї енергії від відстані до джерела дорівнюватиме:

$$E(r) = \frac{E_0}{2\pi r} \cdot e^{-2\alpha r} \quad (3)$$

Хвиля Релея пов'язана з вільною поверхнею і є результатом накладання поздовжніх і поперечних хвиль SH. Частинки середовища у хвилі рухаються по еліптичних орбітах у вертикальній площині, паралельній поширенню хвилі. Вертикальна вісь еліпса приблизно 1,5 разу перевищує горизонтальну. Швидкість поширення хвилі Релея V_R змінюється від 0,874 до 0,956 значення V_S , що наданні в табл. 1.

Таблиця 1

Ґрунти	V_P	V_S	V_P/V_S	Діапазон частот
Ліси та лесоподібні суглинки	0,4 - 0,5	0,32 - 0,5	1,25 - 1,0	Сейсмічний
	0,41 - 9,5	-	-	Ультразвуковий
Суглинки морені	3,72 - 4,87	-	-	"-
Супесь	0,48 - 0,76	0,62 - 0,65	0,77 - 1,17	Сейсмічний
Суглинки покривні	0,66 - 4,87	-	-	Ультразвуковий
Ґлини	0,14 - 0,64	0,28 - 0,49	0,5 - 1,3	Сейсмічний
	1,15 - 4,25	-	-	Ультразвуковий
Водо насичені глини	0,02 - 0,06	0,08 - 0,22	0,36 - 0,38	Сейсмічний

При шаруватому характері середовища у верхній частині розрізу утворюється так звана псевдо-релеївська хвиля подібна до хвилі Релея в однорідному середовищі. Швидкість псевдо-релеївської хвилі залежить від її довжини R , тобто. має місце дисперсія швидкості.

Останнє спостерігається за умови, що $R > \Delta h$, де Δh – потужність окремого шару ґрунту.

Хвиля Лява утворюється тільки в шарі (або пачці шарів) зі зниженою швидкістю поперечних хвиль $VS1$, під товщею товщею більш високошвидкісних порід $VS2$.

Хвиля Лява є інтерференційною хвилею типу SH та поляризована горизонтально. Швидкість поширення хвиль Лява VL залежить від частоти коливань та змінюється в межах

$$V_{S1} < V_L < V_{S2} \quad (4)$$

У ряді випадків на межі середовищ утворюються обмінні хвилі (відбиті та заломлені), пов'язані зі зміною типу хвилі.

На вільній поверхні шаруватого середовища можуть реєструватися такі типи хвиль: поздовжні - прямі, відбиті і заломлені (від різних кордонів), і навіть різні види багаторазово відбитих і заломлених хвиль;

поперечні - тих самих класів, що поздовжні;

обмінні - відбиті, заломлені та різні комбінації відбито-заломлених хвиль;

поверхневі хвилі Релея та Лява [1,2].

За джерело енергії рухомого об'єкту ми приймаємо сейсмічну енергію, яка виникає під час крокування людини. Під час кожного кроку центр мас людини переміщується по циклоїді [4], коливаючись відносно середньої лінії на ± 4 см. Отже, загальна висота піднімання 8 см. Коли центр мас у найвищій точці, то його потенціальна енергія є найбільшою. Під час кожного кроку ця енергія передається землі, в результаті чого виникають як об'ємні, так і поверхневі сейсмічні хвилі.

Енергію хвиль Релея E_0 , які виникають під час крокування людини, можна записати

$$E_0 = (m_{\text{л}} g H) \cdot k, \quad (5)$$

де $m_{\text{л}}$ – маса людини $m_{\text{л}}=80$ кг; g – прискорення вільного падіння; -висота $H = 0,08$ м; k - емпіричний коефіцієнт, що враховує, яка частина енергії кроку переходить у енергію хвиль Релея. З глибиною енергія хвилі Релея зменшується експоненціально і на відстані довжини хвилі λ у 10 разів менша, ніж на поверхні. Для визначення коефіцієнта згасання енергії хвиль з глибиною запишемо

$$E_{\lambda} = E_0 \cdot e^{\alpha_{\lambda} \lambda}, \quad (6)$$

де E_{λ} – енергія хвиль Релея на глибині λ ; α_{λ} – коефіцієнт згасання хвиль з глибиною. Визначено відношенням

$$\frac{E_{\lambda}}{E_0} = \frac{E_0 \cdot e^{\alpha_{\lambda} \lambda}}{E_0} = 0,1. \quad (7)$$

Для глини [1] $\lambda = 190$ м. З (7) визначимо, $\alpha_{\lambda} = -0,012$.

Фронти хвилі Релея поширюються квазі-циліндрично. Енергія цих хвиль зменшується як з глибиною, так і зі зростанням радіуса поширення по поверхні. Вісь циліндричного фронту перпендикулярна до поверхні й розміщена там, де і джерело. Знаючи коефіцієнт згасання енергії з глибиною, визначимо середнє значення енергії $E_{\text{сп}}$ на глибині осі від 0,4 до 0,5 м. На цій глибині буде встановлено сейсмореймач. Він займає об'єм куба з розміром ребра 0,1 м:

$$E_{\text{сп}} = \frac{E_0}{0,1} \int_{0,4}^{0,5} e^{-\alpha_{\lambda} z} dz, \quad (8)$$

де z - глибина.

Енергія від джерела, падає на площу S де розташований сейсмореймач. З урахуванням коефіцієнта поглинання α та відстані до сейсмореймача x енергія, яка доходить до сейсмореймача $E_{\text{сп}}$, дорівнюватиме

$$E_{\text{сп}}(x) = \frac{E_{\text{сп}} \cdot e^{-2\alpha \cdot x}}{10 \cdot s} = \frac{E_{\text{сп}} \cdot e^{-2\alpha \cdot x}}{10 \cdot 2\pi \cdot x}, \quad (9)$$

Оскільки x ми підставляємо у метрах, а α у м^{-1} , то для того, щоб визначити, скільки енергії падає на грань куба розміром $0,1 \cdot 0,1$ м, необхідно енергію, що падає на площу циліндра S , зменшити у десять разів (рис. 1).

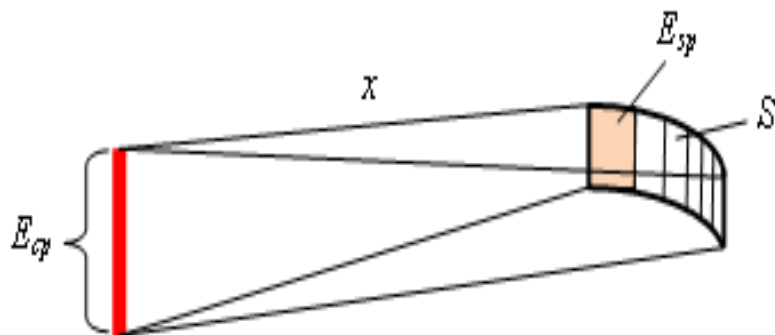


Рисунок 1 – Циліндричний розподіл енергії хвиль Релея по глибині

У хвилях Релея коливання здійснюються у вертикальній площині перпендикулярно до напрямку променя [1,2]. Коли до куба, де в геологічному середовищі розміщено сейсмоприймач, доходить енергія E_{sp} , то під час проходження хвиль ця енергія по чергово перетворюється з потенціальної на кінетичну. Для того, щоб знайти максимальну швидкість переміщення заданого об'єму геологічного матеріалу у вертикальній площині, необхідно записати

$$V_m(x) = \sqrt{\frac{2E_k(x)}{m}}, \quad (10)$$

де V_m - максимальна швидкість коливань геологічного матеріалу; m – маса геологічного матеріалу; E_k – кінетична енергія, якої набуде певний об'єм геологічного матеріалу, $E_k = E_{sp}$.

Знаючи максимальну швидкість матеріалу та частоту кроків f , можна визначити, як змінюється швидкість матеріалу $V(t)$ у часі

$$V(t) = V_m(x) \cdot \sin(2\pi f \cdot t), \quad (11)$$

У нашому випадку $f = 2$ Гц. Середнє значення швидкості за чверть періоду T дорівнюватиме

$$V_{cer}(x) = \frac{4}{T} \int_0^{T/4} V_m(x) \cdot \sin(2\pi f \cdot t) dt. \quad (12)$$

Для потенціальної енергії певного об'єму геологічного матеріалу визначимо:

$$E_p(x) = K \cdot z_m^2(x), \quad (13)$$

де K – коефіцієнт жорсткості середовища, H/m ; z_m – максимальне вертикальне зміщення геологічного матеріалу в місці встановлення сейсмоприймача.

Проінтегрувавши (11) за половину періоду, можна визначити максимальне зміщення z_m

$$z_m(x) = \int_0^{T/2} V_m(x) \cdot \sin(2\pi f \cdot t) dt, \quad (14)$$

Підставивши z_m у (13), визначимо коефіцієнт жорсткості середовища K

$$K = \frac{E_p(x)}{z_m^2(x)}. \quad (15)$$

За відомим коефіцієнтом жорсткості середовища можна визначити, яким буде максимальне відхилення сейсмоприймача, розміщеного у геологічному середовищі на глибині від 0,4 до 0,5 м у кубі з розміром ребра 0,1 м, залежно від відстані x від джерела сейсмічних коливань

$$z_m(x) = \sqrt{\frac{E_p(x)}{K}}. \quad (16)$$

Напряга вихідного сигналу існуючих сейсмоприймачів є функцією їх швидкості, а не переміщення (амплітуди коливань). Тому на значення вихідного сигналу впливатиме не тільки амплітуда коливань, а і їх частота, що створюватиме неоднозначність вихідного сигналу. За чутливості від 0,3 до 0,7 В/мс⁻¹ [2, 4] та зміщення геологічного середовища на 1 – 10⁻⁷ м вихідний сигнал такого сейсмоприймача матиме значення від 0,4 до 0,9 мкВ. Виділити такий сигнал на фоні шумів дуже важко.

При побудові характеристик виявлення об'єктів з імпульсним впливом на ґрунт (людина, група людей, тварини) необхідно враховувати, що сигнали цих об'єктів мають імпульсний характер: на аналізованому інтервалі сигнал що спостерігається змінює свої властивості і є або суміш корисного сигналу з сейсмічним фоном, або тільки сейсмічний фон. З погляду використання поверхневих хвиль для вирішення задач систем охоронної сигналізації вони мають такі переваги [2]:

1. Енергія цих хвиль не зникає у глибині Землі, а поширюється під її поверхнею;
2. Оскільки на їх утворення йде більш ніж 60 % енергії джерела, а на утворення глибинних хвиль тільки 8 %, то такі хвилі мають набагато більшу енергію;
3. Зі зростанням відстані r від джерела їх енергія зменшується пропорційно до $1/r$, а не до $1/r^2$.

За даними з [8] для рихлих осадових порід (глина) коефіцієнт поглинання може мати значення від 10⁻³ м⁻¹ до 0,5 м⁻¹. Крокування людини є періодичним. Воно збуджує імпульси зміщення у геологічному середовищі. Ці імпульси можна розкласти у спектр частот. Оскільки перша гармоніка такого спектра має найбільшу енергію, то для оцінки відстані зроблено допущення, що саме ця гармоніка несе всю енергію спектра. Також у літературних джерелах [2, 9, 10], вказано, що від 60 до 65 відсотків енергії джерела забирають поверхневі хвилі, однак ніде не вдалося знайти розподілу енергії між цими хвилями. Тому зроблено допущення, що у малопотужних джерелах поверхневі хвилі забирають 20 % відсотків енергії і ця енергія розподіляється між хвилями Релея та хвилями Лява порівну.

З метою визначення характеристик сигналу більш доцільно розглянути наступну математичну модель [11, 12] з значення критерію у точці глобального мінімуму. Фізично змістовну цінність мають перш за все значення частот і логарифмічних декрементів осциляторів моделі зареєстрованого сигналу. Фізичні уявлення про природу і характер осциляцій корисного сигналу і облік многомодальним його спектра, дозволяють висунути гіпотезу про можливість моделювати його суперпозицією осциляторів з демпфуванням. В цьому випадку сигнал в фіксованій точці реєстрації можна представити в вигляді:

$$y_k(t) = \sum_{s=1}^S A_{ks} \exp\{-\alpha_{ks}t\} \sin(\omega_{ks}t + \Psi_{ks}) + n_k(t). \quad (17)$$

Тут k - номер сенсора, який реєструє коливання, K - кількість сенсорів, в нашому випадку $K=2$, ($k=1$ у вертикальній площині і $k=2$ у горизонтальній площині). $A_{ks}, \alpha_{ks}, \omega_{ks}, \Psi_{ks}$ - вільні параметри моделі, $n_k(t)$ - адитивний шум у вимірах k -го сенсора. S - безліч розглянутих однотипних підмоделей, суперпозиція яких моделює процес, $y_k(t)$, $s \in S$.

Завдання полягає в оптимальному визначенні вільних параметрів моделі. Критерієм оптимальності вибирається ступінь близькості моделі до даних що досліджуються в обраній метриці.

У метриці L_2 критерій являє собою функціонал для кожної з компонент виду:

$$F_k(\Pi_k) = \left\| \left(\sum_{s=1}^S A_{ks} \exp\{\alpha_{ks} t\} \sin(\omega_{ks}(t - \psi_{ks})) \right) - y_k(t) \right\|_{L_2}; k = \overline{1, K} . \quad (18)$$

Оптимальне рішення – це точка глобального мінімуму функціоналу (18). Глобальний екстремум знаходиться на множині локальних, які обчислювалися на околиці «викинутих» шляхом Монте-Карло, за апіорними розподілами, параметрів.

Існування рішення (18) приведено в [14], а саме рішення надано в [15]. Фізично змістовну цінність мають насамперед значення частот та логарифмічного декременту об'єкта дослідження. Особливо важливі останні. Для наведеного на рис. 3, сингала при вирішенні задачі (18) вектор логарифмічних декремент має значення $\{0.194, 0.115, 0.675\}$, а вектор частот $\{0.559, 0.783, 2.015\}$. Вектор значень частот надано в Герцах, а логарифмічний декремент в безрозмірних одиницях. Розглянемо модель (17) = 3.

На рис. 2 представлена модель (17) (крива червоного кольору, більш згладжена крива) і сигнал, (крива синього кольору).

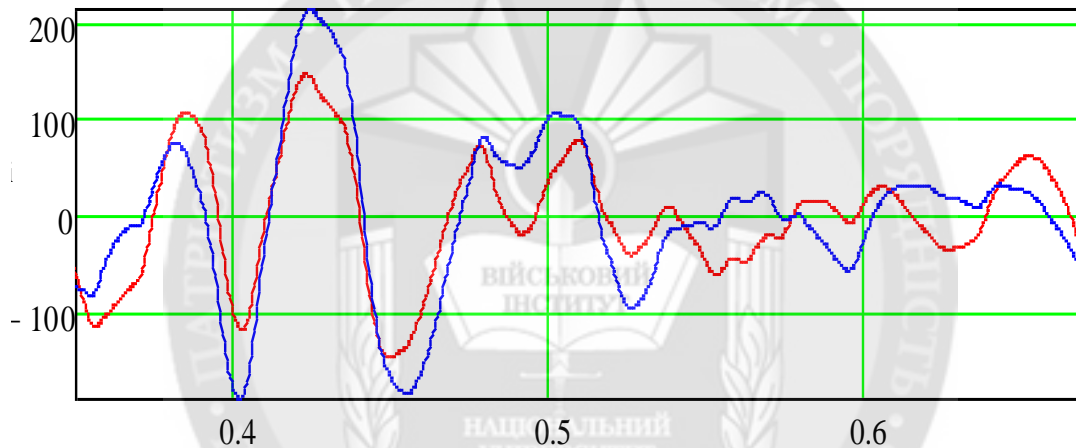


Рисунок 2 – модель (17) (крива червоного кольору, більш згладжена крива) і сигнал, (крива синього кольору)

Таким чином представляється моделі з дванадцятьма вільними параметрами. Оцінкою якості моделі є значення критерію у точці глобального мінімуму. Фізично змістовну цінність мають перш за все значення частот і логарифмічних декрементів осциляторів моделі зареєстрованого сигналу .

Знаючи поріг чутливості, за поданими вище математичними моделями з урахуванням всіх допущень можна оцінити відстань, з якої ємнісний сейсмоприймач з чутливістю $1\text{Гц}/1.2 \cdot 10^{-7}\text{ м}$ відчує сейсмічні хвилі, збуджені крокуванням людини.

За відсутності об'єкта, що рухається, на виході сейсмічного сенсора присутні випадкові сигнали (сейсмічні шуми), які накладаються на квазіперіодичні імпульсні сигнали, що виникають під час руху людини. Збільшення та спад амплітуди оригінальної послідовності імпульсів у міру наближення людини до сенсора та при віддаленні від нього здійснюються за законом, близькому до експонентного. Швидкість наростання та зменшення сейсмічного сигналу, що виникає при русі наземної техніки, набагато повільніше, ніж під час руху людини чи групи людей. У цьому корисний сигнал характеризується відсутністю яскраво вираженої періодичності. Спектр сигналу визначається типом об'єкта, швидкістю руху, відстанню між об'єктом, що рухається, і місцем установки сейсмічного сенсора, зоною виявлення (чутливістю) сейсмоприймача [4, 13]. Спектральні складові сигналу в діапазоні частот від 0 до

80 Гц обумовлені впливом на ґрунт поодинокого порушника. При русі групи людей спектр сигналу сейсмічного сенсора розширюється високочастотну область. Спектр сигналу, спричиненого рухом наземної техніки, що перекриває всю область корисних сигналів без характерних максимумів. Спектральні складові понад 200–300 Гц, практично мало розрізняються і натомість природних мікросейсмів, оскільки при поверхневий шар ґрунту грає роль фільтра низьких частот, тобто, сильніше поглинає високі частоти.

Аналіз характеристик сейсмічних сигналів дозволяє визначити ознаковий простір для класифікації об'єктів, що рухаються. Для розпізнавання класів об'єктів – людина, група людей, легковий автомобіль – доцільно використати спектральний опис у частотному діапазоні до 300 Гц, і характеристики періодичності сигналу – кількісну оцінку та значення періоду проходження імпульсів сейсмічних сигналів, що фіксуються при русі людини в зоні виявлення.

Висновки

1. Досліджені поверхові хвилі, Релея та Лява в рішенні задач сейсмоакустичної локації, під час переміщення людини, та визначені фактори що впливають на вирішення задачі виявлення сигналу на фоні мікросейсмічного шуму.

2. Визначено що навіть за незначних енергій джерела збудження, поверхові хвилі можуть поширюватися на значно більші відстані, та можуть бути використані для рішення задач сейсмоакустичної локації під час переміщення рухомих об'єктів та в оцінюванні точності визначення координат цих об'єктів.

3. Запропоновано, з метою визначення координат та характеристик сигналу розглянути математичну модель з визначення критерію у точці глобального мінімуму.

4. Обробка даних моніторингу об'єкта зі змінними характеристиками за запропонованим алгоритмом дозволила виявити інформативні параметри, які характеризують специфіку об'єкта дослідження, що відображено в просторі вільних параметрів моделі.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Манштейн А. К. Малоглубинная геофизика: пособие по спецкурсу. – Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2002. –135 с.

2. Рак В.С. Про використання сейсмічних хвиль Релея в системах безпеки. Національний університет “Львівська політехніка”. Вимірювальна техніка та метрологія, № 76, 2015 р. С 156–161.

3. Онуфриев Н.В., А.В. Скридловский, В.В. Матвеев. Уточнение статистических моделей биологических объектов для сейсмического принципа обнаружения // Радиотехника, 2011. - №2. -С. 101 - 104.

4. Райфельд М.А., Коробов В.В., Мартухович И.О., Сосновский А.В. Квазиоптимальный алгоритм классификации «одиночный человек, группа людей» в сейсмической системе охраны периметров. Радиотехника, 2012. - №1. - С. 17 - 19.

5. Нікіфоров М.М., Пампуха І.В., Щербіна С.В., Шевцов А.Г., Лоза В.М. Особливості використання автоматизованого сейсмоакустичного комплексу за допомогою комбінованого способу виявлення об'єктів. Геофізичний журнал. Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України. 2018, №6, т. 40, С.150-158.

6. Дудкин В.А., Вольсков А.А. Методы определения пеленга объекта, основанные на измерении временных задержек сейсмических сигналов. Современные технологии безопасности, 2010. – №1.— С. 28-30.

7. Фальшинский В.В. Паралельная обработка данных многокомпонентных сейсмических наблюдений // Кибернетика и системный анализ. – 2011. – № 2. – С 181–186.

8. Табулевич В.Н. Об определении положения источника возбуждения микросейсмических колебаний. Изв. АН СССР, сер. Физика Земли. 1977. № 5. С.89-92.

9. Кугаенко Ю.А, Салтыков В.А., Сеницин В.И., Чебров В.Н. Локация источников сейсмического шума, связанного с проявлением гидротермальной активности, методом эмиссионной томографии // Физика земли. 2004. № 2. С.66-81.

10. Гуляев В.Т., Кузнецов В.В., Плоткин В.В., Хомутов С.Ю. Генерация и распространение инфразвука в атмосфере при работе мощных сеймовибраторов. // Изв. АН СССР: Физика атмосферы и океана. – 2001. – Т.37, №3. – С.303-312

11. Andreev P.R., Grigoruk A.P., Shorokhov M.N.. Systems for reception and recording of vibroseismic signals. // Bull. Nov. Comp. Center, Math. Model. in Geoph., v. 7 (2002), p.1–11.
12. Mostovoy V. S., Mostovyi S. V. Mathematical model of seismic signal, as a flow of physically non realizable single seismic waves // Geophysical Journal– 2016. Vol. 38, № 5, p. 166-169. <http://journals.uran.ua/geofizicheskiy/article/view/107830>.
13. Авроров С.А., Хайретдинов М.С. Распределенная обработка данных в мониторинговых системах и сетях// Научный вестник НГТУ. – 2010. – №1. – С.1-11.
14. Мостовой В.С., Мостовой С.В. О корректности задачи нелинейной регрессии при мониторинге природных и рукотворных объектах. Геофиз. журн. – 2012. – 34, № 2. – С. 140-143.
15. Мостовой В.С. Оптимальное обнаружение сигналов на фоне микросейсмического шума. Доп. НАН Украины. – 2008. – № 1. – С. 106-110.

REFERENCES:

1. Manshtejn A. K. (2002) *Maloghlubynnaja gheofyzyka*. [Shallow geophysics] posobye po speckursu. – Novosybyrsk: Novosybyrskij ghosudarstvennyj unyversytet, 135 p.
2. Rak V.S. (2015) *Pro vykorystannja sejsmichnykh khvylj Releja v systemakh bezpeky*. [On the use of Rayleigh seismic waves in security systems. On the use of Rayleigh seismic waves in security systems.] Nacionaljnij unyversytet “Ljvivjsjka politekhnika”. Vymirjuvaljna tekhnika ta metrologhija, No.76, p.p. 156–161.
3. Onufryev N.V., A.B. Skrydlovskij, V.V. Matveev. (2011) *Utochnenye statystycheskykh modelej byologhycheskykh ob'ektov dlja sejsmycheskogho pryncypa obnaruzhenija* [Clarification of statistical models of biological objects for the seismic detection principle] Radyotekhnika, No.2. p.p. 101 - 104.
4. Rajfeljd M.A., Korobov V.V., Martukhovych Y.O., Sosnovskij A.B. (2012) *Kvazyoptymaljnij alghorytm klasyfikacyu «odynochnyj chelovek, ghruppa ljudej» v sejsmycheskoj systeme okhrany perymetrov*. [Quasi-optimal algorithm for classification "single person, group of people" in the seismic system of perimeter protection.] adyotekhnika, No.1. p.p. 17 - 19.
5. Nikiforov M.M., Pampukha I.V., Shherbina S.V., Shevcov A.Gh., Loza V.M. (2018) *Osoblyvosti vykorystannja avtomatyzovanogho sejsmoakustychnogho kompleksu za dopomoghoju kombinovanogho sposobu vyjavlennja ob'ektiv*. [Features of using an automated seismic acoustic complex using a combined method of object detection.] Gheofizychnyj zhurnal. Instytutu gheofyzyky im. S. I. Subbotina NAN Ukrajinu. No 6, T. 40 pp.150-158.
6. Dudkyn V.A., Voljskov A.A. (2010) *Metody opredelenija pelengha ob'ekta, osnovannye na yzmerenju vremennykh zaderzhek sejsmycheskykh syghnalov*. [Methods for determining the bearing of an object based on the measurement of time delays of seismic signals.] Sovremennye tekhnologhyu bezopasnosti, No.1, p.p. 28-30.
7. Falshynskij V. V. (2011) *Paralelnaja obrabotka dannykh mnogokomponentnykh sejsmycheskykh nabljudenij* [Parallel data processing of multicomponent seismic observations.] Kybernetyka y systemnyj analiz. No. 2, p.p. 181–186.
8. Tabulevych V.N. (1977) *Ob opredelenju polozhenija ystochnyka vzbuzhdenija mykrosejsmycheskykh kolebanyj*. [On determining the position of the source of excitation of microseismic oscillations.] Yzv. AN SSSR, ser. Fyzyka Zemly. No. 5, p.p.89-92.
9. Kughaenko Ju.A, Saltikov V.A., Synycyn V.Y., Chebrov V.N.. (2004) *Lokacyja ystochnykov sejsmycheskogho shuma, svjazannogho s projavlenyem ghydrotermalnoj aktyvnosti, metodom emyssonnoj tomoghrafyy* [Location of sources of seismic noise associated with the manifestation of hydrothermal activity, the method of emission tomography] Fyzyka zemly. No. 2, p.p. 66-81.
10. Ghuljaev V.T., Kuznecov V.V., Plotkyn V.V., Khomutov S.Ju. (2001) *Gheneracyja y rasprostranenye ynfrazvuka v atmosfere pry rabote moshhnykh sejsmovybratorov*. [Generation and propagation of infrasound in the atmosphere during the operation of powerful seismic vibrators.] Yzv. AN SSSR: Fyzyka atmosfery y okeana. T.37, No. 3, p.p.303-312.
11. Andreev P.R., Grigoruk A.P., Shorokhov M.N. (2002) *Systems for reception and recording of vibroseismic signals*. [Reception and recording systems of vibroseismic signals.] Bull. Nov. Comp. Center, Math. Model. in Geoph., No. 7, p.p. 1–11.
12. Mostovoy V. S., Mostovyi S. V. Mathematical model of seismic signal, as a flow of physically non realizable single seismic waves // Geophysical Journal– 2016. Vol. 38, no. 5, p.p. 166-169. <http://journals.uran.ua/geofizicheskiy/article/view/107830>.

13. Avrorov S.A., Khajretdynov M.S. (2010) *Raspredelelnaja obrabotka dannykh v monytorynghovykh systemakh y setjakh.* [Distributed data processing in monitoring systems and networks] Nauchnyj vestnyk NGhTU. n.1, p.p.1-11.

14. Mostovoj V.S., Mostovoj S.V. (2012) *O korrrektnosti zadachy nelynejnoj reghressyy pry monytorynghе pryrodnnykh y rukotvornnykh ob'ektakh.* [On the correctness of the problem of nonlinear regression in monitoring natural and man-made objects.] Gheofyz. zhurn. 34, No. 2. – p.p. 140-143.

15. Mostovoj V.S. (2008) *Optymal'noe obnaruzhenye syghnalov na fone mykrosejsmycheskogho shuma.* [Optimal signal detection against a background of microseismic noise.] Dop. NAN Ukrainy. No. 1. p.p. 106-110.

**Dr. Sci. in physical and mathematical Ichenko V.V.,
PhD Nikiforov M.M., PhD Mostovoy V.S., PhD Popkov B.O., PhD Loza V.M.
PECULIARITIES OF APPLICATION OF SEISMOACOUSTIC LOCATION FOR
DETERMINATION OF MOVING OBJECTS**

The work is related to the study of surface waves in solving seismic acoustic location problems during the movement of moving objects, and in assessing the accuracy of determining the coordinates of moving objects of different origins. In solving the inverse problems of seismic acoustic location, the surfaces of the wave that occur on the Earth's surface during the movement of a moving object are studied. The accuracy of the solution of the inverse problem directly depends on the errors: determination of the time of entry of the seismic acoustic wave, the velocity characteristics of the environment, noise of various origins, the choice of the geometry of the location of sensors.

The need to study surface waves, namely Rayleigh Waves and Lion Waves, is justified because they propagate on the Earth's surface. The plane of oscillation of Rayleigh waves is vertical to the Earth's surface and direction of propagation, and Lev waves have a horizontal plane of oscillation. As one of the considered problems of seismic acoustic location as a source of energy of a moving object, we take seismic energy, which occurs during human walking. Human walking is periodic. It excites impulses of displacement in the geological environment. According to the known coefficient of rigidity of the medium, it is possible to determine what will be the maximum deviation of the seismic receiver.

The paper investigates surface waves, Rayleigh and Lev in solving seismic acoustic location problems during human movement, and identifies factors that affect the accuracy of determining the coordinates of a moving object. In terms of using surface waves to solve seismic location problems to identify moving objects, they have the following advantages: the energy of these waves does not disappear deep into the Earth, but propagates below its surface; their formation takes more than 60% of the energy of the source, and the formation of deep waves only 8%, such waves have much more energy;

From this it can be concluded that even at low energies of the excitation source surface waves can be used to solve seismic location problems during the movement of moving objects and to assess the accuracy of determining the coordinates of these objects.

Keywords: surface waves, seismic location, moving object, seismic receiver.