

АНАЛІЗ ВИМОГ ДО ДАТЧИКІВ ВИЯВЛЕННЯ ВІБРАЦІЙ ВІД РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ У ПОВЕРХНІ ЗЕМЛІ

студент Сербський Г.О., доцент, к.т.н. Зубков О.В.,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
кафедра мікропроцесорних технологій і систем, м.Харків, Україна
e-mail: hlib.serbskyi@nure.ua, oleh.zubkov@nure.ua

Abstract. The relevance of vibration level assessment when detecting the movement of moving objects, such as humans, is demonstrated. A model for calculating vibration attenuation over distance is presented. Calculations are performed for different wave types and attenuation values. The human motion detection range is calculated for existing sensor types.

Ключові слова: акселерометр, вібрації, виявлення, геофон, згасання, сферичні хвилі, циліндричні хвилі.

Вступ. Виявлення та аналіз вібрацій, що поширюються у поверхневих шарах ґрунту внаслідок руху об'єктів, є важливою науково-прикладною задачею в галузях технічної безпеки, геофізичного моніторингу, охоронних систем та інтелектуальних сенсорних мереж [1,2]. Рухомі об'єкти, такі як люди, транспортні засоби або технічні механізми, генерують характерні механічні коливання, які поширюються у вигляді пружних хвиль у ґрунті та можуть бути зафіксовані спеціалізованими датчиками. Аналіз таких сигналів дозволяє здійснювати виявлення, класифікацію та оцінку параметрів руху об'єктів без прямого візуального контакту.

Сучасний розвиток сенсорних технологій сприяв появі широкого спектра датчиків, здатних реєструвати вібраційні впливи з високою чутливістю та часовою роздільною здатністю. До них належать геофони, п'єзоелектричні датчики, MEMS-акселерометри, а також спеціалізовані сейсмічні сенсори [2,3]. Кожен із зазначених типів має власні конструктивні особливості, частотні характеристики, рівень шумів та вимоги до умов встановлення, що суттєво впливає на ефективність їх застосування для виявлення слабких вібрацій від рухомих об'єктів.

Незважаючи на значну кількість публікацій, присвячених сейсмічним і вібраційним вимірюванням, питання вибору оптимального типу датчика для задач поверхневого виявлення руху залишається актуальним. Це зумовлено необхідністю компромісу між чутливістю, енергоспоживанням, вартістю, габаритами та можливістю інтеграції в автономні або вбудовані системи. Особливої уваги потребує аналіз роботи датчиків у реальних ґрунтових умовах, де параметри сигналу значною мірою залежать від типу ґрунту, глибини встановлення сенсора та зовнішніх завад.

Метою даного дослідження є аналіз та порівняння основних типів датчиків, що застосовуються для виявлення вібрацій від рухомих об'єктів

у поверхні землі, з точки зору їх фізичних принципів роботи, частотних характеристик та практичної придатності до використання в автономних системах моніторингу. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні систем вібраційного контролю та охоронно-сигнальних комплексів.

Основна частина.

Вібрації, що виникають унаслідок руху об'єктів по поверхні землі, зумовлюють поширення пружних хвиль у ґрунті. Основний внесок у формування вимірюваного сигналу в поверхневому шарі роблять поверхневі хвилі типу Релея, а також, у меншій мірі, об'ємні поздовжні та поперечні хвилі. Для задач виявлення рухомих об'єктів найбільший практичний інтерес становлять саме хвилі Релея, оскільки вони поширюються вздовж поверхні та мають найбільшу амплітуду в приповерхневих шарах ґрунту.

Амплітуда коливань при поширенні хвиль у ґрунті зменшується внаслідок геометричного розходження та внутрішнього загасання середовища. Для поверхневих хвиль залежність амплітуди від відстані r може бути апроксимована виразом [1]:

$$A(r) = \left(\frac{1}{r}\right)^n A_0 \cdot e^{-\alpha r} \quad (1)$$

A_0 — амплітуда коливань поблизу джерела,

α — коефіцієнт загасання, що залежить від механічних властивостей ґрунту та частоти сигналу,

n — коефіцієнт, що описує тип хвилі. При циліндричних хвилях $n=0.5$, а при сферичних хвилях $n=1$.

Таким чином, дальність виявлення вібрацій істотно залежить від типу ґрунту (піщаний, глинистий, кам'янистий), його вологості та ущільненості, а також від спектрального складу збуджених коливань.

У таблиці 1 наведено результати обчислень амплітуди хвиль для сферичних та циліндричних хвиль від відстані для випадків мінімального згасання (демпфування) $\alpha=0,02$ та сильного згасання $\alpha=0,2$.

Сучасні акселерометри середнього цінового діапазону, такі, як ADXL355, мають чутливість порядку $25 \mu\text{g}/\text{Гц}^{0.5}$. У сучасних геофонів чутливість на частоті 5 Гц буде порядку $96 \mu\text{g}/\text{Гц}^{0.5}$.

Таблиця 1 – Результати розрахунків рівня вібрацій на різних відстанях

г,м	$A_{\text{циліндрич}}, \text{mg}$		$A_{\text{сферич}}, \text{mg}$	
Демпфування	слабке	сильне	слабке	сильне
1	5,1	5,1	5,1	5,1

5	2,08	1,03	2,5	2,08
10	1,33	0,3	0,93	0,46
20	0,79	0,058	0,19	0,014
50	0,25	0,0017	0,051	0,0003

Зазвичай вважається, що якісне виявлення та обробка вібраційних сигналів можлива при відношеннях сигнал/шум від 10 та вище. Отже порівнюючи розрахунки значень вібрацій на різних відстанях для випадків двох типів хвиль та слабого і сильного демпфування можемо зробити висновки:

- при слабкому демпфуванні виявлення руху людини може бути реалізовано до 50м з урахуванням чутливих акселерометрів;
- при сильному демпфуванні дальність виявлення руху людини суттєво знижується до 10-20м.

Висновки. Проведений аналіз розповсюдження вібраційних хвиль у ґрунті показав, що менше загасання мають циліндричні хвилі. Тип ґрунту суттєво впливає на величину загасання і величина цього впливу може досягати 170 разів. Порівнюючи характеристики сучасних чутливих акселерометрів та геофонів можна зробити висновок при їх приблизно однакову чутливість, хоча чутливість акселерометрів дещо вища. На основі розрахунку рівня вібрацій на різних відстанях при русі людини можна зробити висновок, що при слабкому загасанні відстань її виявлення може досягати 50м, а при сильному зменшується до 10м.

Список використаних джерел

3. Xing K., Wang N., Wang W. A Ground Moving Target Detection Method for Seismic and Sound Sensor Based on Evolutionary Neural Networks. 2022. Appl. Sci., Vol.12, Iss.18. P. 1-12
4. Chang C., Kong L., Han L., Li J., Pan S., Wei Y. VibrationAnalysis and Vehicle Detection byMEMS Acceleration SensorsEmbedded in PCC Pavement. 2025. Sensors, Vol.25. P.1-21
5. Valero M., Li F., Zhao L., Zhang C., Garrido J., Han Z. Vibration sensing-based human and infrastructure safety/health monitoring: A survey. 2021. Digital Signal Processing. Vol. 114. P.1-15