

ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛІВ, ЗАРЕЄСТРОВАНИХ НА СЕЙСМІЧНИХ СТАНЦІЯХ УКРАЇНИ, З „ПІКСЕЛЬНОЇ” У ФІЗИЧНУ ФОРМУ

Основна мета роботи – дослідження можливостей перетворення сейсмічних сигналів, з „піксельної” в фізичну форму, для вивчення динамічних характеристик сейсмічних коливань при місцевих землетрусах та землетрусах зони Вранча з метою сейсмічного захисту населення, будинків та споруд.

Ключові слова: регуляризовані розв’язки інтегральних рівнянь; сейсмограми; аналогово-цифрове перетворення; значення зміщень, швидкостей і прискорень в коливаннях.

Вступ

При встановленні рівня сейсмологічної небезпеки будівельних майданчиків, в термінах прискорень сейсмічних коливань ґрунту, виникає необхідність визначення „істинних” значень параметрів сейсмічних коливань (true motion), спостережених на сейсмічних станціях [Кендзера, 1987].

На виході більшості використовуваних в Україні сейсмометрів (крім каналів сейсмологічних станцій Streckeisen-2 на станції „Київ-IRIS”), як правило, є часові функції - результат згортки коливань ґрунту (проекції повного вектора коливань на три взаємно-перпендикулярні напрямки) з комплексною частотною характеристикою (ЧХ) відповідної компоненти реєструючого сейсмологічного тракту [Scherbaum, 1986; Shearer, 2009]. В цифрових сейсмологічних станціях на виході є результат аналогово-цифрового перетворення (АЦП) зареєстрованого сигналу. Амплітуди зареєстрованих сейсмограм задаються дискретними рядами із заданим кроком вимірювання. Для спектрального аналізу записів [Батт, 1980], поляризаційного аналізу спостережених коливань [Александров, 1999], порівнянного аналізу записів, одержаних на декількох станціях, визначення параметрів загасання коливань різних типів [Левшин, 1986] тощо, необхідно оперувати часовими функціями спостережених коливань, заданих у фізичній формі, тобто в зміщеннях частинок середовища, швидкості і прискорення їх руху.

Виклад основного матеріалу дослідження

Задача визначення «істинного» вигляду зареєстрованих коливань в математичному аспекті зводиться до розв’язання рівняння 2-го роду типу згортки:

$$y(t) = A\{u(t)\} = \int_{t_1}^{t_2} f(t - \tau)u(\tau)d\tau + \xi(t) , \quad (1)$$

де $y(t)$ – запис коливань ґрунту при сейсмічній події, $u(t)$ – істинний рух ґрунту в місці реєстрації, A – оператор, який описує вплив реєструючого сейсмологічного тракту, $f(t)$ – передавальна функція реєструючого сейсмологічного тракту по зміщенню, $\xi(t)$ – сейсмічний шум, t_1 і t_2 – час початку і кінця запису аналізованої сейсмограми.

Розв’язок рівняння (1), як відомо, є некоректною задачею (по Адамару) [Тихонов, 1974, Тихонов и др., 1995]. Для її розв’язання, необхідно використовувати методи регуляризації [Тихонов и др., 1974].

Один з можливих регуляризованих розв’язків рівняння (1) приведено в роботі [Кендзера и др, 1979]. Його суть полягає у наступному:

Використовуючи інтегральне перетворення Фур’є, нерегуляризований розв’язок рівняння (1) можна записати у вигляді

$$u(t) = \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \int_0^\infty \frac{Y(i\omega)}{F(i\omega)} e^{i\omega t} d\omega ,$$

де $i = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця, ω – кругова частота, $F(i\omega)$ – комплексна частотна характеристика сейсмографа, $Y(i\omega)$ – комплексний спектр Фур’є сейсмічного запису $y(t)$

$$F(i\omega) = \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \int_{t_1}^{t_2} f(t) e^{-i\omega t} dt ,$$

$$Y(i\omega) = \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \int_{t_1}^{t_2} y(t) e^{-i\omega t} dt .$$

Позначимо відношення $Y(i\omega)/F(i\omega) = \Gamma(i\omega)$.

Регуляризований розв’язок рівняння (1) будемо знаходити у вигляді:

$$u(t) = \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \int_0^{\omega_1} \Gamma(\omega) e^{i\omega t} d\omega + \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \Gamma(\omega) e^{i\omega t} d\omega + \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \int_{\omega_2}^\infty \Gamma(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (2)$$

Параметри ω_1 та ω_2 – границі частотного діапазону існування спектру сейсмічної події можна знайти з умови мінімуму функціоналу, або досягненням ним значення інтегралу від квадрату амплітуд перешкоди (мікросейсмічного шуму) $\xi(t)$, зареєстрованого до запису сейсмічної події в часовому інтервалі (t_0 і t_1) та після неї, в часовому інтервалі (t_2 і t_k):

$$W(\omega_1, \omega_2, \Gamma(\omega)) = \frac{\int_{t_0}^{t_1} u^2(t) dt + \int_{t_2}^{t_k} u^2(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} u^2(t) dt} , \quad (3)$$

де, t_0 і t_k підбираються таким чином, щоб $[t_1, t_2]$ знаходився в середині інтервалу $[t_0, t_k]$. Величина $(t_k - t_0)$ повинна дорівнювати подвоєній різниці $(t_2 - t_1)$.

З фізичних міркувань, описаний вище підхід до регуляризації розв’язку задачі (1) відносно $u(t)$, найпростіше застосовувати до визначення істинної швидкості коливань ґрунту, коли $u(t)=v(t)$.

На телесеїсмічних відстанях від епіцентрів землетрусів (вибухів) спектр швидкості коливань, зареєстрованих на сейсмограмі, можна представити у вигляді:

$$V_r(i\omega) = \int_{t_1}^{t_2} v_r(t) e^{-i\omega t} dt = i\omega S(i\omega) F(i\omega),$$

де $S(i\omega)$ – спектр істинного зміщення у сейсмічних коливаннях. Амплітудний спектр зміщення ґрунту (спектральна густина), а у випадку дискретного представлення коливань і їх спектрів – спектральна щільність:

$$|S(i\omega)| = |S_s(i\omega)| |S_\Delta(i\omega, \Delta)| |S_d(i\omega, \Delta)|, \quad (4)$$

де $S_s(i\omega)$ – комплексний спектр коливань, випромінюваних з вогнища в напрямку реєструючої станції; $S_\Delta(i\omega, \Delta)$ – частотна характеристика середовища між гіпоцентром та точкою спостереження, яка описує розходження хвильового поля та інтерференційні явища; $S_d(i\omega, \Delta)$ – частотна характеристика середовища, яка описує затухання сейсмічних коливань внаслідок поглинання та розсіювання хвиль. За звичай величина спектральної густини $S_s(i\omega)$ у всіх діапазонах частот – обмежена, а значення та положення на осі ω її максимумів залежать від типу, розміру джерела коливань та часової функції їх випромінювання. В низькочастотних областях значення обвідної спектральної густини приблизно постійна для одно полярного імпульсу та зменшуються із зменшенням частоти для знакозмінного. У високочастотних областях завжди спостерігається значне зменшення величини спектральної густини через загасання та розходження сейсмічної енергії. Ослаблення коливань з відстанню можна приблизно оцінити за формулою:

$$S_d(\omega) = e^{-\alpha(\omega)\Delta} \quad (5)$$

де, $\alpha(\omega) = \omega v / 2\pi c$, v – декремент затухання, c – швидкість розповсюдження хвилі. Приймаючи, що в першому приближенні декремент v не залежить від частоти і виконуючи диференціювання в рівнянні (4) одержимо вираз для амплітудного спектру істинної швидкості коливань ґрунту в точці спостережень:

$$|V(\omega)| = \omega |S_s(\omega)| |S_\Delta(\omega, \Delta)| e^{-\frac{\omega v \Delta}{2\pi c}}. \quad (6)$$

Вигляд амплітудного спектру $|V(\omega)|$ залежить від амплітудного спектру випромінювання з вогнища землетрусу $|S_s(\omega)|$, частотної характеристики середовища $|S_\Delta(\omega, \Delta)|$, гіпоцентральної відстані Δ і параметрів c та v . При цьому завжди існують два таких значення частоти ω_1 та ω_2 , що для $\omega \geq \omega_1$ та $\omega \leq \omega_2$ буде справедлива нерівність $|V(\omega)| < \epsilon$, де ϵ – безконечно мала величина.

Запишемо рішення (1), замінюючи $u(t)$ на $v(t)$, отримаємо:

$$v_r(t) = A_v \left\{ \frac{du}{dt} \right\} = A_v \{v(t)\} \quad (7)$$

де A_v – є оператором, який описує вплив реєструючого сейсмологічного тракту по швидкості. Розв'язок рівняння (7) будемо шукати у вигляді:

$$v(t) = \frac{\omega}{\pi} \text{Re} \int_0^{\omega_1} \Gamma(i\omega) e^{i\omega t} d\omega + \quad (8)$$

$$+ \frac{\omega}{\pi} \text{Re} \int_{\omega_2}^{\omega_1} L_1(i\omega) e^{i\omega t} d\omega + \frac{\omega}{\pi} \text{Re} \int_{\omega_2}^{\infty} L_1(i\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

Завдяки особливості обвідної спектру істинної швидкості $V(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} v(t) e^{-i\omega t} dt$, завжди можна

підібрати такі значення частот ω_1 та ω_2 , при яких першим членом в рівнянні (8) можна знехтувати через те, що при малих значеннях ω , $|V(\omega)| \leq \epsilon \leq |V_\epsilon(\omega)|$, де $|V_\epsilon(\omega)|$ – амплітудний спектр мікросейсмічних завад, а третім членом можна знехтувати, так як, при достатньо великих значеннях ω_2 , енергія спостережених високо-частотних коливань, яка є пропорціональна виразу $\int_{\omega_2}^{\infty} (\omega |S_u(\omega)|)^2 d\omega$, завжди буде скінченою і прямувати до нуля.

Для визначення ω_1 та ω_2 використаємо функціонал, спрощений, у порівнянні з співвідношенням (3), так як у ньому немає необхідності вводити функцію $\Gamma(\omega)$, а істинні зміщення $u(t)$ замінено істинною швидкістю $v(t)$:

$$W_v(\omega_1, \omega_2) = \frac{\int_{t_0}^{t_1} v^2(t) dt + \int_{t_2}^{t_k} v^2(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} v^2(t) dt}. \quad (9)$$

Мінімізація (9) відповідає припущенню, що поза зоною запису хвилі $v(t) = 0 + \epsilon(t)$, де сейсмічні завади $\epsilon(t)$ є незначними.

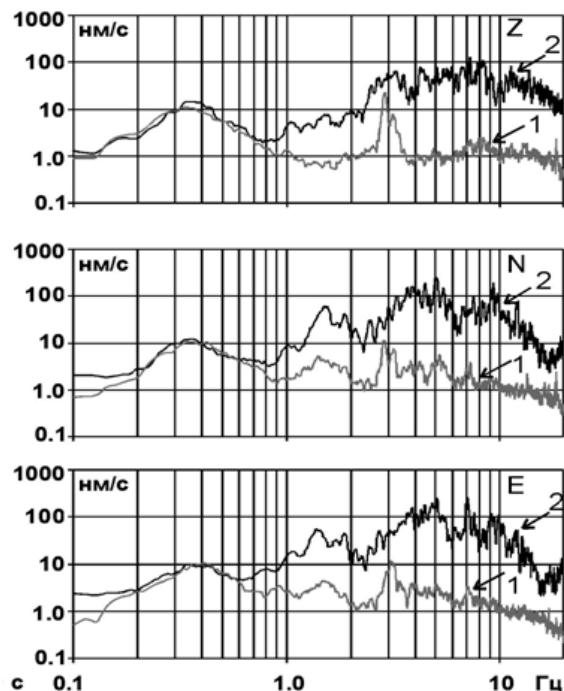


Рис. 1. Амплітудні спектри мікросейсм (1) та запису землетрусу (2), розраховані з сейсмограм локального тектонічного землетрусу 22.11.2009 р. в районі м. Куп'янськ

Потрібно також відмітити, що умова обмеження величини $|S_s(\omega)|$ при $\omega \rightarrow 0$ робить проблематичним

визначення істинної швидкості із записів коливань, в складі яких є залишкове зміщення. Випадок стосується, наприклад, записів одержаних в плестосейсмовій зоні землетрусів. У цьому випадку регуляризований розв'язок рівняння (1) можна одержати лише накладаючи розумні фізичні обмеження на форму і величину функції $\Gamma(\omega)$.

На (рис. 1) цифрою 1 показано амплітудні спектри мікросейсм, розрахованих з сейсмограм локального тектонічного землетрусу 22.11.2009 р. в районі м. Куп'янськ (Харківська обл., Україна), зареєстрованих сейсмічною станцією «Сторожове» Геофізичної служби РАН, розташованої на епіцентральної відстані $\Delta=187$ км., в часових діапазонах (0÷50) с. та (140-180) с. Цифрою 2 позначено амплітудні спектри запису землетрусу.

Розраховані шляхом мінімізації функціоналу (9) значення частот ω_1 та ω_2 , дорівнюють, відповідно, 0,7 та 18 Гц.

Істинні зміщення $u(t)$ і прискорення коливань ґрунту і $a(t)$ можна визначити, відповідно інтегруючи та диференціюючи $v(t)$ по часу [Кендзера і др., 1978]. При цьому слід враховувати особливості інтегрування та диференціювання дискретно заданих функцій.

Висновки

1) Для аналізу динамічних характеристик спостережених сейсмічних коливань необхідно відновлювати істинні значення з цифрових сейсмічних записів, заданих в одиницях АЦП (пікселях), справжні (істинні) значення зміщень, швидкостей і прискорень в коливаннях ґрунту.

2) В статті запропонований алгоритм відновлення фізичних характеристик спостережених сейсмічних коливань за їх записами. Сформульовані умови одержання регуляризованих розв'язків.

3) Бази цифрових сейсмограм землетрусів, із зони Вранча і місцевих сейсмоактивних зон, вибухів і мікросейсм необхідно формувати в фізичних характеристиках коливань.

Література

- Александров С.И. Поляризационный анализ сейсмических волн // С.И. Александров.– М.: ОИФЗ РАН, 1999. – 142 с.
- Бат М. Спектральный анализ в геофизике. – М.: Недра, 1980.
- Кендзера А.В., Косарев Л.Г., Саваренский Е.Ф. Определение величины истинной скорости колебаний почвы из сейсмограммы. – Геофизический журнал. – Киев: Наукова думка, 1979. – Т. 1, – № 1– С. 56-62.
- Кендзера А.В. Способ получения расчетных акселерограмм путем пересчета из сейсмических записей. – Геофизический журнал. – Киев: Наукова думка, 1987. – Т. 9, – № 5, – С. 75-79.
- Левшин, А.Л. Поверхностные сейсмические волны в горизонтально-неоднородной земле // А.Л. Левшин, Т.Б. Яновская, А.В. Ландер. – М.: Наука, 1986. – 278 с.
- Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач // А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. – М.: Наука, 1974. – 224 с.
- Тихонов А.Н., Леонов А.С., Ягола А.Г. Нелинейные некорректные задачи. – М.: Наука, 1995.
- Scherbaum Frank. Of poles and zero. Fundamental of digital seismology. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Boston, London. 1996. – С 253.
- Shearer Peter M. Introduction to seismology second edition. – New York: Cambridge University Press, 2009. – С 396.

ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ НА СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ УКРАИНЫ, ИЗ „ПИКСЕЛЬНОЙ” В ФИЗИЧЕСКУЮ ФОРМУ

А.В. Кендзера, В.А. Ильенко

Основная цель работы: исследование возможностей преобразования сейсмических сигналов, с "пиксельной" в физическую форму, для изучения динамических характеристик сейсмических колебаний при местных землетрясениях и землетрясениях зоны Вранча с целью сейсмической защиты населения, зданий и сооружений.

Ключевые слова: регуляризованное решения интегральных уравнений, сейсмограммы, аналогово-цифровое преобразование, значение смещений, скоростей и ускорений в колебаниях.

TRANSFORMATION OF SIGNALS REGISTERED AT SEISMIC STATIONS OF UKRAINE FROM PIXEL TO PHYSICAL FORM

O.V. Kendzera, V.A. Ilyenko

Main objective of the work consists in evaluation of possibilities of transformation of seismic signals from pixel to physical form, used in study of dynamic characteristics of seismic oscillations from local earthquakes and the earthquakes from the Vrancea zone, with the purpose of securing safety of people, buildings and constructions.

Key words: regularized solutions of integral equations, seismograms, analog-digital conversion, offset values, velocities and accelerations of oscillations.