

УДК 528.481

ПРОГНОЗУВАННЯ ПРОСТОРОВИХ РУХІВ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ЗА ГЕОДЕЗИЧНИМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯМИ

Г. Ішутіна

Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, м. Дніпропетровськ

Ключові слова: модель просторового руху, ряди Фур'є.

Постановка проблеми

Результати геодезичних спостережень за просторовими рухами є хорошою основою для розроблення тих чи інших емпіричних методів швидкого і достатньо надійного прогнозу осідань. Накопичення матеріалів спостережень дає змогу вносити корективи в теоретичні рішення, тим самим підвищуючи надійність прогнозу перебігу деформацій в часі [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій, які стосуються вирішення цієї проблеми

У роботах [2, 4] запропоновано модель просторового руху земної поверхні залежно від зміщень точок вздовж осей x , y та часу t , які беруться з геодезичних спостережень. У компактному вигляді запропонована функція має вигляд:

$$f_i(x, y, t) = \sum_{k=1}^{k_1} \sum_{l=1}^{l_1} \sum_{m=1}^{m_1} A_{klm}^{(i)} x^{k-1} y^{l-1} t^{m-1}. \quad (1)$$

Величини $k = \overline{1, k_1}$, $l = \overline{1, l_1}$, $m = \overline{1, m_1}$ вибирають так, щоб добуток $k_1 \times l_1 \times m_1$ був менший від кількості циклів спостережень. Невідомі коефіцієнти $A_{klm}^{(i)}$ необхідно визначити.

У роботі [6] запропоновано враховувати у моделі (1) вертикальні зміщення z (осідання або підняття). Тоді функцію (1) можна подати так:

$$f_i(x, y, z, t) = \sum_{k=1}^{k_1} \sum_{l=1}^{l_1} \sum_{m=1}^{m_1} \sum_{n=1}^{n_1} A_{klmn}^{(i)} x^{k-1} y^{l-1} z^{m-1} t^{n-1}. \quad (2)$$

Для практичних обчислень умовні координати x , y , z замінюють на зміщення точок відносно першого циклу спостережень – Δx , Δy та Δz . Тоді вирази (1) та (2) можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} \Delta L &= f(\Delta x, \Delta y, t) = \\ &= \sum_{k=1}^{k_1} \sum_{l=1}^{l_1} \sum_{m=1}^{m_1} A_{klm} \Delta x^{k-1} \Delta y^{l-1} t^{m-1} \end{aligned} \quad (3)$$

та

$$\begin{aligned} \Delta L &= f(\Delta x, \Delta y, \Delta z, t) = \\ &= \sum_{k=1}^{k_1} \sum_{l=1}^{l_1} \sum_{m=1}^{m_1} \sum_{n=1}^{n_1} A_{klmn} \Delta x^{k-1} \Delta y^{l-1} \Delta z^{m-1} t^{n-1}, \end{aligned} \quad (4)$$

де ΔL – просторове зміщення на момент часу t .

Невідомі коефіцієнти A_{klmn} визначають з умови мінімуму функції:

$$\begin{aligned} \Phi &= \sum_{s=1}^N \sum_{j=1}^n [f(\Delta x_s, \Delta y_s, \Delta z_s, t_j) - \\ &- f^*(\Delta x_s, \Delta y_s, \Delta z_s, t_j)]^2 \rightarrow \min, \end{aligned} \quad (5)$$

де $f(\Delta x_s, \Delta y_s, \Delta z_s, t_j)$ – просторове зміщення точки $M_s(\Delta x_s, \Delta y_s, \Delta z_s, t_j)$, яке визначається за формулою (4) у момент часу t_j ; $f^*(\Delta x_s, \Delta y_s, \Delta z_s, t_j)$ – просторове зміщення точки, знайдене експериментально.

Постановка завдання проблеми

У статті пропонується уточнити модель просторового руху земної поверхні (4) з урахуванням циклічної складової просторових рухів, описаної за допомогою рядів Фур'є.

Виклад основного матеріалу проблеми

Для цього використаємо відому модель прогнозування осідань [3, 5]:

$$S = S_e + S_y, \quad (6)$$

де S_e – осідання, що виникає під дією основних факторів, які істотно впливають на зміщення споруди або земної поверхні; S_y – осідання за рахунок впливу циклічних факторів, які мають тенденцію до повторення (зміна рівня ґрунтових вод, атмосферні опади, пора року).

У роботах [3, 5] трендову “стержневу” складову S_e подають поліноміальною залежністю виду:

$$S_e = \sum_{i=1}^n a_i t^i, \quad (7)$$

а “циклічну” складову S_y – у вигляді кінцевого ряду Фур'є:

$$S_y = \sum_{j=1}^m [A_j \cos 2\pi(jt) + B_j \sin 2\pi(jt)]. \quad (8)$$

Коефіцієнти a_i ($i = \overline{0, n}$), A_j , B_j ($j = \overline{1, m}$) необхідно визначити, а величини n і m вибрати залежно від точності інтерполяційних формул (7) і (8) та значень осідань, які визначені експериментально.

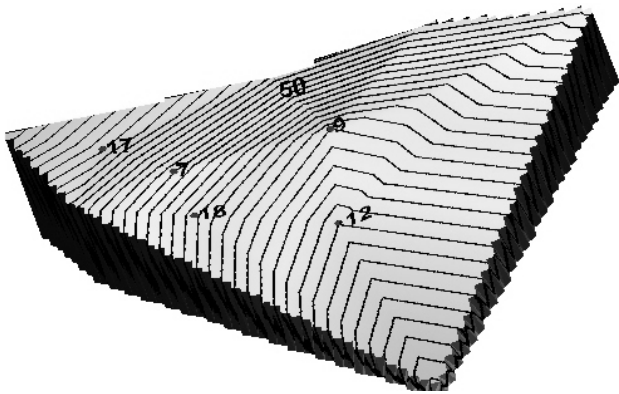
Пропонуємо використовувати формулу (6) для подання просторових зміщень, оскільки вони також залежать від вищезгаданих факторів. В такому випадку вираз (6) набуде вигляду:

$$\Delta L = \Delta L_e + \Delta L_y, \quad (9)$$

де складову ΔL_e запишемо у вигляді (4), а складову ΔL_y – у вигляді кінцевого ряду Фур'є:

$$\Delta L_y = \sum_{j=1}^m [A_j \cos 2\pi(jt) + B_j \sin 2\pi(jt)]. \quad (10)$$

Для перевірки ефективності запропонованої моделі використаємо ті самі дані, що й у роботі [6]. Нагадаємо, що дані геодезичних спостережень містять 20 серій вимірювань, виконаних у період з листопада 1990 р. до липня 1997 р. на ділянці, яка охоплює 6 точок: 7, 9, 12, 17, 18, 50. Схему розташування точок на ділянці спостережень наведено на рисунку.



Ділянка спостережень [6]

Процедуру короткострокового прогнозу можна описати таким алгоритмом:

1. Вибираємо апроксимуючу поверхню виду (4) для всієї ділянки спостережень. Для нашого випадку прийнято, що $k_l=2, l_l=2, m_l=2, n_l=3$ (як у публікації [6]), в результаті чого функція (4) набуває вигляду:

$$\begin{aligned} \Delta L_g = f(\Delta x, \Delta y, \Delta z, t) = & A_{1111} + A_{1112}t + \\ & + A_{1113}t^2 + A_{1121}\Delta z + A_{1122}\Delta zt + A_{1123}\Delta zt^2 + \\ & + A_{1211}\Delta y + A_{1212}\Delta yt + A_{1213}\Delta yt^2 + \\ & + A_{1221}\Delta y\Delta z + A_{1222}\Delta y\Delta zt + A_{1223}\Delta y\Delta zt^2 + \\ & + A_{2111}\Delta x + A_{2112}\Delta xt + A_{2113}\Delta xt^2 + \\ & + A_{2121}\Delta x\Delta z + A_{2122}\Delta x\Delta zt + A_{2123}\Delta x\Delta zt^2 + \\ & + A_{2211}\Delta x\Delta y + A_{2212}\Delta x\Delta yt + A_{2213}\Delta x\Delta yt^2 + \\ & + A_{2221}\Delta x\Delta y\Delta z + A_{2222}\Delta x\Delta y\Delta zt + A_{2223}\Delta x\Delta y\Delta zt^2. \end{aligned} \tag{11}$$

Підставивши дані геодезичних спостережень шесті точок за 18 серіями у формулу (11), ми отримали систему 108 лінійних алгебраїчних рівнянь з 24 невідомими, розв'язавши яку, ми одержали значення невідомих коефіцієнтів (табл. 1).

2. Обчислюємо модельні значення зміщень за формулою (11) з оцінкою точності апроксимації, що становить $m_a = 9$ мм, якщо середня швидкість зміщень – приблизно 70 мм/рік.

3. Уточнюємо модель зміщень кожної точки з урахуванням циклічних складових. Для цього подамо різниці зміщень між фактичними значеннями й обчисленими за формулою (11) рядом Фур'є виду (9) з трьома гармоніками:

$$\begin{aligned} \Delta L_{ij}^i = \Delta L^i - \Delta L_g^i = & A_1^i \cos 2\pi t + \\ & + B_1^i \sin 2\pi t + A_2^i \cos 2\pi 2t + \\ & + B_2^i \sin 2\pi 2t + A_3^i \cos 2\pi 3t + B_3^i \sin 2\pi 3t. \end{aligned} \tag{12}$$

Коефіцієнти A_j^i та B_j^i для кожної i -ї точки знаходимо за методом найменших квадратів (табл. 2).

4. Обчислюємо оцінку точності апроксимації уточненої моделі, яка становить $m_a = 6$ мм.

Дані за останній 20-й цикл вимірювань не оброблялись, а використовувались для незалежної перевірки запропонованої моделі. Спочатку за формулою (11) обчислено прогнозні значення зміщень на липень 1997, а потім виконано їх уточнення на основі (12). Відхилення між прогнозними та фактичними зміщеннями 20-го циклу наведено у табл. 3.

Точність прогнозу в цьому прикладі залишилася приблизно на одному рівні, а точність апроксимації покращилася у півтора рази, що дає змогу, якщо треба, точніше інтерполювати дані на заданий проміжок часу. У випадку вираженішого впливу циклічних факторів точність прогнозу за запропонованою моделлю буде вищою.

Висновки

Резюмуючи вищевикладене, можна сподіватися, що запропонована модель буде реалізована для прогнозування просторових рухів земної поверхні та споруд за певних швидкостей, зокрема під час дослідження зсувів.

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів для апроксимуючої кривої виду (11)

A_{1111}	0.006	A_{1211}	0.635	A_{2111}	0.176	A_{2211}	-9.432
A_{1112}	0.034	A_{1212}	-0.316	A_{2112}	0.222	A_{2212}	3.466
A_{1113}	-0.012	A_{1213}	-0.009	A_{2113}	-0.004	A_{2213}	-0.252
A_{1121}	0.159	A_{1221}	18.922	A_{2121}	-2.745	A_{2221}	-130.342
A_{1122}	-0.384	A_{1222}	-8.477	A_{2122}	1.555	A_{2222}	52.345
A_{1123}	0.023	A_{1223}	0.823	A_{2123}	-0.138	A_{2223}	-5.098

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів для рядів Фур'є виду (12)

№ точок											
7		9		12		17		18		50	
A_1^7	0.000	A_1^9	0.001	A_1^{12}	0.000	A_1^{17}	-0.002	A_1^{18}	-0.001	A_1^{50}	0.005
B_1^7	-0.011	B_1^9	-0.011	B_1^{12}	0.008	B_1^{17}	-0.003	B_1^{18}	0.004	B_1^{50}	-0.001
A_2^7	0.002	A_2^9	0.005	A_2^{12}	-0.007	A_2^{17}	-0.003	A_2^{18}	-0.003	A_2^{50}	0.001
B_2^7	0.001	B_2^9	0.003	B_2^{12}	0.000	B_2^{17}	0.000	B_2^{18}	0.009	B_2^{50}	0.001
A_3^7	-0.004	A_3^9	-0.005	A_3^{12}	0.000	A_3^{17}	0.000	A_3^{18}	0.003	A_3^{50}	-0.007
B_3^7	0.000	B_3^9	0.003	B_3^{12}	-0.007	B_3^{17}	-0.002	B_3^{18}	-0.005	B_3^{50}	0.007

Значення відхилень

№ точки	Прогнозне зміщення за моделлю (11) ΔL_g , мм	Прогнозне зміщення уточнене, за моделлю (12) $\Delta L_g + \Delta L_{\psi}$, мм	Фактичне зміщення ΔL , мм	Відхилення $\Delta L_g - \Delta L$, мм	Відхилення $(\Delta L_g + \Delta L_{\psi}) - \Delta L$, мм
7	579.0	587.0	576.9	2.1	10.1
9	421.9	430.4	432.5	-10.6	-2.1
12	536.4	528.0	529.2	7.2	-1.2
17	386.4	389.9	360.8	25.6	29.1
18	509.7	503.8	508.7	1.0	-4.9
50	434.1	441.2	439.9	-5.8	1.3
				$m_{np}=12.0$ мм	$m_{np}=12.8$ мм

Література

1. Ганьшин В.Н. Геодезические методы измерения вертикальных смещений сооружений и анализ устойчивости реперов / В.Н. Ганьшин, А.Ф. Стороженко, Н.А. Буденков, А.Г. Ильин, В.И. Цюнько. – М.: Недра, 1991. – 192 с.
2. Тригуба О.С. Модель просторового руху земної поверхні / О.С. Тригуба, П.Г. Черняга // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. – 2003. – Вип. 4 (23). – С. 244–250.
3. Учет гидрогеологических условий при исследовании деформаций сооружений АЭС / П.Г. Черняга, А.Г. Касянчук, В.А. Сяський // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. – 1992. – № 54. – С. 61–66.
4. Черняга П.Г. Метод дослідження просторових рухів земної поверхні та інженерних споруд на основі геодезичних спостережень / П.Г. Черняга // Інженерна геодезія. – К.: КНУБА, 1999. – Вип. 41. – С. 179–183.
5. Прогнозирование деформаций сооружений АЭС / П.Г. Черняга, В.А. Сяський, А.Г. Касянчук // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. – 1990. – № 52. – С. 83–87.
6. Черняга П.Г. Вдосконалення моделі просторового руху земної поверхні / П.Г. Черняга, О.Є. Янчук // Інженерна геодезія. – К.: КНУБА, 2008. – Вип. 54. – С. 232–237.

Прогнозування просторових рухів земної поверхні за геодезичними спостереженнями
Г. Ішутіна

Запропоновано модель просторового руху земної поверхні, яка описується двома складовими – зміщенням під дією ваги та зміщенням за рахунок впливу циклічних факторів. Наведено приклад прогнозу на основі цієї моделі.

Прогнозирование пространственных движений земной поверхности по геодезическим наблюдениям
А. Ишутина

Предложено модель пространственного движения земной поверхности, которая описывается двумя составляющими – смещением под действием веса и смещением за счет влияния циклических факторов. Приведен пример прогноза на основе этой модели

Prognostication of earthly surface spatial motions
A. Ishutina

The model of earthly surface spatial motion is proposed which is described by two components – displacement under the effect of weight and displacement due to influence of periodic factors. The example of prognosis is resulted on the basis of this model.

II З'ЇЗД УКРАЇНСЬКОГО ТОВАРИСТВА ГЕОДЕЗІЇ І КАРТОГРАФІЇ

31 жовтня – 1 листопада 2011 р.

м. Київ

www.utgk.com.ua

тел.: +380503706402