

УДК 528.32

ПРО МАКРОМОДЕЛІ ЗМІН ГЕОДЕЗИЧНИХ КООРДИНАТ І СЕЙСМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Л. Янків-Вітковська

Національний університет "Львівська політехніка"

В. Паучок

Тернопільський національний економічний університет

Ключові слова: макромодель, геодезичні координати, сейсмічна активність.

Постановка проблеми

Триває вдосконалення обладнання для визначення координат GNSS-станцій, розвиток засобів дослідження фізичних параметрів земної поверхні й навколоземного простору, що приводить до накопичення різноманітних даних експериментальних вимірювань. У зв'язку з цим постає завдання розробити уніфікований метод моделювання цих даних. Для розв'язання цієї задачі пропонуємо застосувати метод макромодельовання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, які стосуються вирішення цієї проблеми

Зазначимо, що для вирішення цієї проблеми можна використати підхід, запропонований у диференціальних макромоделях. В роботі [1] доведено, що експериментально виміряні дискретні функціональні залежності між (векторними) входом $u(t)$ і виходом $y(t)$

$$u(t_k), y(t_k) \quad (k = \overline{1, m})$$

моделює система звичайних диференціальних рівнянь

$$\frac{dy_i}{dt} = y_{i+1}; \quad (i = \overline{0, n-1});$$

$$\frac{dy_n}{dt} = P(y_0, \dots, y_n; u^{(0)}, \dots, u^{(p)}),$$

де t_k – моменту вимірювання $u(t_k), y(t_k)$; m – кількість вимірювань; P – степеневий поліном від багатьох аргументів; n – кількість рівнянь; p – найвищий порядок похідної від $u(t)$.

Змінна y_0 наближено дорівнює виходу $y_0(t) \approx y(t)$, якщо початковими умовами y_i^0 ($i = \overline{0, n}$) системи (2) вибрати похідні $y_i^0 = y^{(i)}(t_0)$ ($i = \overline{0, n}$) від $y(t_k)$ ($k = \overline{1, m}$) на $t_0 \in [t_1, t_m]$, й аргументами $u^{(i)}$ ($i = \overline{0, p}$) взяти похідні від $u(t_k)$ ($k = \overline{1, m}$) на $t \in [t_1, t_m]$. Алгоритм ідентифікації моделі (1) описано в [2]. Модель застосовано для моделювання радіотехнічних пристроїв, систем і процесів різної природи [3].

Постановка завдання проблеми та виклад основного матеріалу проблеми

Проаналізувавши та апробувавши у попередніх дослідженнях [4–6] запропонований спосіб математичного моделювання, ми поставили такі завдання.

1. Розробити макромодель впливу сонячної активності й припливних сил на сейсмічну активність і на рівень інфразвуку земної поверхні, визначений за спеціальною методикою [7]. Тобто побудувати **модель впливу сонячної активності та припливних сил на сейсмічну активність**. Зв'язки сейсмічної і сонячної активності є досить складними, залежать від регіону і великою мірою неоднозначні. Але для багатьох практичних задач важливо отримувати прогнози сейсмічної активності за даними моніторингу фізичних параметрів земної поверхні й навколоземного простору. Тому ми виконали якісний аналіз методу математичного моделювання та розробили відповідну модель [8]. В наших роботах [6, 9] детальніше описано макромодель залежності сейсмічної активності $g(t)$ й рівня інфразвуку $z(t)$ земної поверхні від сонячної активності $s(t)$. Досі залишається відкритим питання про те, чи сейсмічна активність земної поверхні залежить від припливних сил, викликаних гравітаційним приганням Місяця. Але щоби спробувати врахувати цей вплив, у модель додано кутову висоту Місяця $h(t)$ і величину, що відображає його азимут. Це довжина $\varphi(t)$ проекції на полярну вісь одиничного радіус-вектора, направлено на Місяць з місця на поверхні Землі, де експериментально визначено $g(t), z(t)$.

$h(t_k), \varphi(t_k)$ ($k = \overline{1, m}$) – відомі значення відповідно кутової висоти Місяця та азимутальної проекції на полярну вісь одиничного радіус-вектора, спрямованого на Місяць з точки на поверхні Землі, де експериментально встановлено сейсмічну активність $g(t_k)$ ($k = \overline{1, m}$) і рівень амплітуди інфразвуку біля поверхні Землі $z(t_k)$ ($k = \overline{1, m}$), де m – кількість дискретних вимірювань, виконаних за відповідними методиками. Структурою макромоделі вибрано такі рівняння:

$$\dot{g}_0 = g_1; \dot{g}_1 = g_2; \dot{g}_2 = g_3;$$

$$\dot{z}_0 = z_1; \dot{z}_1 = z_2; \dot{z}_2 = z_3;$$

$$\dot{g}_4 = P_g(s^{(0)}, s^{(1)}, s^{(2)}, s^{(3)}, h^{(0)}, h^{(1)}, h^{(2)}, h^{(3)},$$

$$\varphi^{(0)}, \varphi^{(1)}, \varphi^{(2)}, \varphi^{(3)}, g_0, g_1, g_2);$$

$$\dot{z}_4 = P_z(s^{(0)}, s^{(1)}, s^{(2)}, s^{(3)}, h^{(0)}, h^{(1)}, h^{(2)}, h^{(3)},$$

$$\varphi^{(0)}, \varphi^{(1)}, \varphi^{(2)}, \varphi^{(3)}, g_0, g_1, g_2, z_0, z_1, z_2).$$

За допомогою цієї моделі отримано вдале наближення сейсмічної активності та інфразвуку земної поверхні [6]. Модель зберігає прийнятну точність на відрізки часу тривалістю понад один місяць. Цього достатньо для її застосування в системах моніторингу для опрацювання даних вимірювання та прогнозування.

Вплив сонячної і сейсмічної активності на малі зміни геодезичних координат.

Відомо, що геодезичні координати референцних станцій, визначені за допомогою космічного обладнання, відображають повільний тектонічний рух й містять специфічну швидкозмінну складову, яку пов'язують із систематичною похибкою вимірювання [4, 5, 10]. Щоб вдосконалити визначення змін геодезичних координат, важливо з'ясувати, як на них впливають фізичні процеси, що відбуваються в навколоземному просторі. Тому ми поставили завдання побудувати макромодель впливу сейсмічних процесів, Сонця і Місяця на малі зміни геодезичних координат.

Щоб розв'язати поставлену задачу, для прикладу, ми підібрали річний ряд координат перманентної GNSS-станції JOZE

$\bar{x}(t_k), \bar{y}(t_k), \bar{z}(t_k)$ ($k = \overline{1, \bar{m}}$), де $\bar{m}$ – кількість значень; t_k – моменти визначення координат, які відповідають щоденним значенням за 1999 р. Такий вибір станції пов'язаний з тим, що вона на той час вже пропрацювала 4 роки, а її координати і особливо швидкості їх зміни були достатньо надійно визначені. Цей рік вибрано саме тому, що він був багатим на різні вияви сонячної та сейсмічної активності. Щоб описати вплив сейсмічних процесів, взято значення показника сейсмічної активності й амплітуди інфразвуку земної поверхні, відповідно $\bar{g}(t_k), \bar{v}(t_k)$ ($k = \overline{1, \bar{m}}$). Вплив сонячної активності описано за допомогою щоденної кількості спалахів на Сонці $\bar{s}(t_k)$ ($k = \overline{1, \bar{m}}$). На основі цих щоденних значень за допомогою згладжувальної сплайн-апроксимації розраховано їхні згладжені щогодинні значення:

$$x(t_k), y(t_k), z(t_k), s(t_k), g(t_k), v(t_k) \quad (k = \overline{1, m}),$$

де m – кількість щогодинних значень.

Для моделювання впливу процесів у навколоземному просторі на визначення змін геодезичних координат розроблено макромодель із такою структурою:

$$\begin{aligned} x'_i &= x_{i+1}; (i = \overline{0, 2}); \\ x'_3 &= P_x(x_0, x_1, x_2, x_3, y_2, y_3, z_2, z_3, s, s', g, g', v, v'); \\ y'_i &= y_{i+1}; (i = \overline{0, 2}); \\ y'_3 &= P_y(x_2, x_3, y_0, y_1, y_2, y_3, z_2, z_3, s, s', g, g', v, v'); \\ z'_i &= z_{i+1}; (i = \overline{0, 2}); \\ z'_3 &= P_z(x_2, x_3, y_2, y_3, z_0, z_1, z_2, z_3, s, s', g, g', v, v'), \end{aligned}$$

де P_x, P_y, P_z – поліноми від багатьох аргументів. Достатня точність цієї моделі [6] дає підстави

вважати, що в межах досягнутої точності чинники s, g, v динамічно впливають на зміну координат x, y, z , а всі координати однієї референцної станції динамічно залежні між собою.

Модель змін геодезичних координат близьких референцних станцій. У малих змінах геодезичних координат близьких референцних станцій проявляються характерні синфазні коливання. Щоб дослідити властивості цих коливань, поставлено завдання розробити макромодель коливань складових координат близьких референцних станцій.

Для моделювання коливань складових координат добре підходять GNSS-станції, що розташовані на території Закарпаття і входять у мережу референцних станцій ZAKPOS та мережу EPN (UZH) $x_i(t_k), y_i(t_k), z_i(t_k)$ ($k = \overline{1, m}; i = \overline{1, n}$), координати i -ї станції; n – кількість станцій ($n = 5, i = \text{HUST, MIZG, MUKA, RAKH, UZH, VBER}$); t_k – моменти визначення координат; m – кількість таких вимірювань.

За даними (1) побудовано модель

$$\begin{aligned} (x'_i)^{xust} &= x_{i+1}^{xust}; (i = \overline{0, 4}); \\ (x'_5)^{xust} &= P_{xust}(x_0^{xust}, \dots, x_5^{xust}; x_0^{rakh}, \dots, x_5^{rakh}); \\ (x'_i)^{rakh} &= x_{i+1}^{rakh}; (i = \overline{0, 4}); \\ (x'_5)^{rakh} &= P_{rakh}(x_0^{xust}, \dots, x_5^{xust}; x_0^{rakh}, \dots, x_5^{rakh}), \end{aligned} \quad (2)$$

де P_{xust}, P_{rakh} – степеневі поліноми від багатьох аргументів.

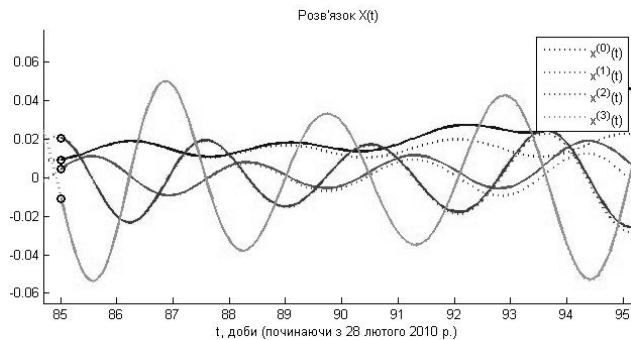
Розв'язки x_0^{xust}, x_0^{rakh} рівнянь (2) моделюють координати x_{xust}, x_{rakh} . Розв'язки моделі (2) мають прийнятну точність приблизно протягом доби.

Тому поставлено завдання – побудувати макромодель змін координат станції MUKA за змінами координат близьких станцій HUST, MIZG, RAKH, UZH, VBER. Для ідентифікації моделі взято дані за 28.02–04.09.2010 р. Зміни координат станції MUKA змодельовано системою 12 рівнянь

$$\begin{aligned} (x'_i)^{muka} &= x_{i+1}^{muka}; (i = \overline{0, 2}); (x'_3)^{muka} = P_x(b_x); \\ (y'_i)^{muka} &= y_{i+1}^{muka}; (i = \overline{0, 2}); (y'_3)^{muka} = P_y(b_y); \\ (z'_i)^{muka} &= z_{i+1}^{muka}; (i = \overline{0, 2}); (z'_3)^{muka} = P_z(b_z), \end{aligned} \quad (3)$$

де P_x, P_y, P_z – поліноми багатьох аргументів, – координат станцій ZAKPOS й похідних від них.

Розв'язки $x_0^{muka}, y_0^{muka}, z_0^{muka}$ моделюють змінні складові відповідно координат $x_{muka}, y_{muka}, z_{muka}$ станції MUKA (див. рисунок). Прийнятна точність отриманих розв'язків показує, що координати станції MUKA динамічно пов'язані з координатами інших станцій ZAKPOS.



Графіки похідних $x_{\text{мод}}^{(i)}(t)$ ($i = \overline{0,3}$) (крапки) та їхніх наближень, одержаних з розв'язування моделі (3)

Висновки

Проаналізувавши результати наших попередніх досліджень [5, 6, 10] та отримані розв'язки наведених вище моделей, можемо зробити такі висновки.

1. Модель впливу сонячної активності та припливних сил на сейсмічну активність придатна для застосування в системах моніторингу з прийнятною точністю.

2. Модель впливу сейсмічних процесів, Сонця і Місяця на малі зміни геодезичних координат підтверджує наше припущення про те, що в межах досягнутої точності чинники s, g, v динамічно впливають на зміни координат x, y, z , а всі координати однієї референційної станції динамічно взаємозалежні.

3. Розроблення моделі динамічної залежності змін геодезичних координат однієї з станцій ZAKPOS від змін координат решти цих станцій показує, що просторові й часові характеристики такої залежності справедливі для відстаней 70–150 кілометрів і часових проміжків 5–9 діб.

4. Наші дослідження динаміки змін координат геодезичних пунктів, визначення закономірностей їхнього механічного переміщення уможливають складання прогнозів, що розширює сферу практичного застосування даних GPS- спостережень.

Література

- Матвійчук Я.М. Математичне макромодельовання динамічних систем: Теорія і практика / Я.М. Матвійчук. – Львів: Вид-во ЛНУ, 2000. – 214 с.
- Курганевич А. Регуляризація задачі ідентифікації макромодельовання нелінійних динамічних систем методом редукції апроксимаційного базису / А. Курганевич, Я. Матвійчук // Теоретична електротехніка. – 2000. – Вип. 55. – С. 31–36.
- Матвійчук Я.М. Регуляризована ідентифікація динамічних прогностичних макромодельовання / Я.М. Матвійчук, В.К. Паучок // Теоретична електротехніка. – 2003. – Вип. 57. – С. 13–18.
- Матвійчук Я.М. Постановка задачі макромодельовання гео-геліогенних величин / Я.М. Матвійчук, В.К. Паучок // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Телекомунікації і радіоелектроніка”, 2006. – № 557. – С. 171–173.
- Янків-Вітковська Л.М. Дослідження динаміки змін координат перманентних GPS-станцій / Л.М. Янків-Вітковська, С.Г. Савчук, В.К. Паучок // Вісник геодезії і картографії. – Київ, 2008. – № 1. – С. 7–12.
- Янків-Вітковська Л.М. Дослідження динаміки змін координат GPS-станцій для прогнозування їх точності // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – Львів, 2011. – Вип. 74. – С. 77–82.
- Янків-Вітковська Л.М. Про кореляційний зв'язок геодезичних і геосейсмічних процесів // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – Львів. – 2011. – Вип. 75.
- Фридман А.М. О некоторых корреляциях в сейсмодинамике и двух компонентах сейсмической активности Земли / А.М. Фридман, Е.В. Поляченко, Н.Р. Насыржанов // УФН, Т. 180, № 3. – С. 304–312.
- Паучок В.К. Регуляризована ідентифікація математичних макромодельовання процесів і систем різної природи: дис. ... канд. техн. наук. Спеціальність 01.05.02 – Математичне моделювання та обчислювальні методи (технічні науки). – Рукопис / В.К. Паучок. – Львів, 2010. – 178 с.
- Матвійчук Я.М. Макромоделі гео-геліогенних величин, ідентифіковані за експериментальними даними / Я.М. Матвійчук, В.К. Паучок // Моделирование 2008: Сборник трудов научной конференции, 14–16 мая 2008 г. – Т.1. – С. 114–118.
- Янків-Вітковська Л.М. До питання аналізу систематичних похибок координат перманентної GPS станції SULP / Л.М. Янків-Вітковська, С.Г. Савчук, В.К. Паучок // Вісник геодезії і картографії. – Київ, 2007. – № 5. – С. 9–13.

Про макромоделі змін геодезичних координат і сейсмічних процесів

Л. Янків-Вітковська, В. Паучок

Використовуючи підхід, запропонований у диференціальних макромоделях, розроблено моделі для змін геодезичних координат і геосейсмічних процесів.

О макромоделях изменений геодезических координат и сейсмических явлений

Л. Янкив-Витковская, В. Паучок

С использованием подхода, предложенного в дифференциальных макромоделях, разработаны модели для изменения геодезических координат и сейсмических процессов.

About macromodel of change of geodetic coordinates and seismic processes

L. Yankiv-Vitkovska, V. Pauchok

It uses the approach proposed in differential macromodel and developed models for change geodetic coordinates and seismic processes.