

ПРОГНОЗУВАННЯ ВПЛИВУ ІОНОСФЕРИ НА ЧАСОВІ ЗМІНИ КООРДИНАТ ПЕРМАНЕНТНИХ GPS-СТАНЦІЙ

© Янків-Вітковська Л.М., 2009

Внедрение метода макроmodellирования в систему GPS-измерений повышает оперативность промежуточной обработки результатов наблюдений. Дает возможность выполнять вычислительные эксперименты с результатами измерений для выявления тех или других физических влияний (ионосферных эффектов) на наблюдаемое положение перманентной GPS-станции.

Implementation macro modelling method for GPS measurement increases researching results' proceeding efficiency. It also helps to predict values, to make comparison with real measurements. That method is aimed for identification of physic influence (ionospheric effect) on GPS-station observing position.

Постановка проблеми. Проблема врахування впливу іоносфери є важливим завданням як для виконання геодезичного знімання зі всіма його похідними (картографія, кадастр, ГІС тощо), так і для завдань часового забезпечення (синхронізація годинників, шкала часу і частоти). При цьому важливим є значення точного врахування іоносферних похибок ГНСС-спостережень під час надійного розв'язання фазової неоднозначності і прецизійного позиціонування сантиметрової і міліметрової точності. Відомо, що координати геодезичного пункту, визначені багаторазово на GPS-станції, можуть давати інформацію і про вплив різного роду збурень (зокрема іоносферних) на вимірювання. Дослідження динаміки змін координат геодезичних пунктів, визначення закономірностей їхнього механічного переміщення відкриває шлях для складання прогнозів, що розширює сферу практичного застосування даних ГНСС-спостережень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для детального вивчення впливу хаотичних динамічних процесів, що відбуваються в іоносфері, на систематичні похибки супутникових вимірювань можна використовувати різні методи математичного моделювання, зокрема і метод макроmodellowania динамічних систем [3], у якому для прогнозу моделі оцінки точності координатних визначень застосовують макроmodellowne відновлення системи звичайних диференціальних рівнянь, що описують залежність похибки вимірювання від часу. Опрацювання експериментальних геодезичних вимірювань за допомогою динамічної моделі, що відповідає класу спостережуваних фізичних явищ, дало змогу створити таку модель, яка дозволяє пояснити природу досліджуваних явищ. Про це досить детально описано в роботах [1,2]. Однак для практичного впровадження запропонованої моделі як засобу прогнозного уточнення координат станцій регулярних супутникових спостережень необхідно накопичити масив опрацьованих даних інших GPS-станцій.

Постановка завдання. Поставлено задачу – на основі даних координат декількох перманентних GPS-станцій визначити закономірності їхнього механічного переміщення. Зауважимо, що в роботах [1, 2] цю задачу розглянуто на прикладі одного геодезичного пункту.

Виклад основного матеріалу. Для розкриття закономірностей аперіодичного та тектонічного коливного руху взято координати восьми GPS- станцій , виміряні протягом 1137 – 1495 тижнів GPS-вимірювань. Зокрема, це станції в Чернігові – СНІV, Євпаторії – EVPA, Харкові – КНАR, Миколаєві – МІKL, Полтаві – POLV, Львові – SULP та Ужгороді – UZHL.

Позначимо експериментально виміряні координати символами, які відповідають прийнятим в геодезії позначенням координат для i -ї станції:

$$x_i^E(t_k), y_i^E(t_k), z_i^E(t_k); k = \overline{1, m_i}; i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

n – кількість станцій ($n = 8$); m_i – кількість дискретних вимірювань координат для i -ї станції; t_k – момент часу вимірювання. Зауважимо, що для кожної станції кількість вимірювань m_i різна, але моменти вимірювання t_k є спільними для всіх станцій.

Знаючи постійну складову координат геодезичних пунктів

$$\begin{aligned} x_i^C &= \min x_i^E(t_k), k \in [1, m_i]; \\ y_i^C &= \min y_i^E(t_k), k \in [1, m_i]; \\ z_i^C &= \min z_i^E(t_k), k \in [1, m_i]; \\ i &= \overline{1, n}, \end{aligned} \quad (2)$$

знаходимо їхні змінні складові:

$$\begin{aligned} x_i(t_k) &= x_i^E(t_k) - x_i^C; k = \overline{1, m_i}; \\ y_i(t_k) &= y_i^E(t_k) - y_i^C; k = \overline{1, m_i}; \\ z_i(t_k) &= z_i^E(t_k) - z_i^C; k = \overline{1, m_i}; \\ i &= \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (3)$$

Ці змінні складові відображають систематичну похибку вимірювання і тектонічний рух, котрий, як припускається, поєднує аперіодичні та коливні складові.

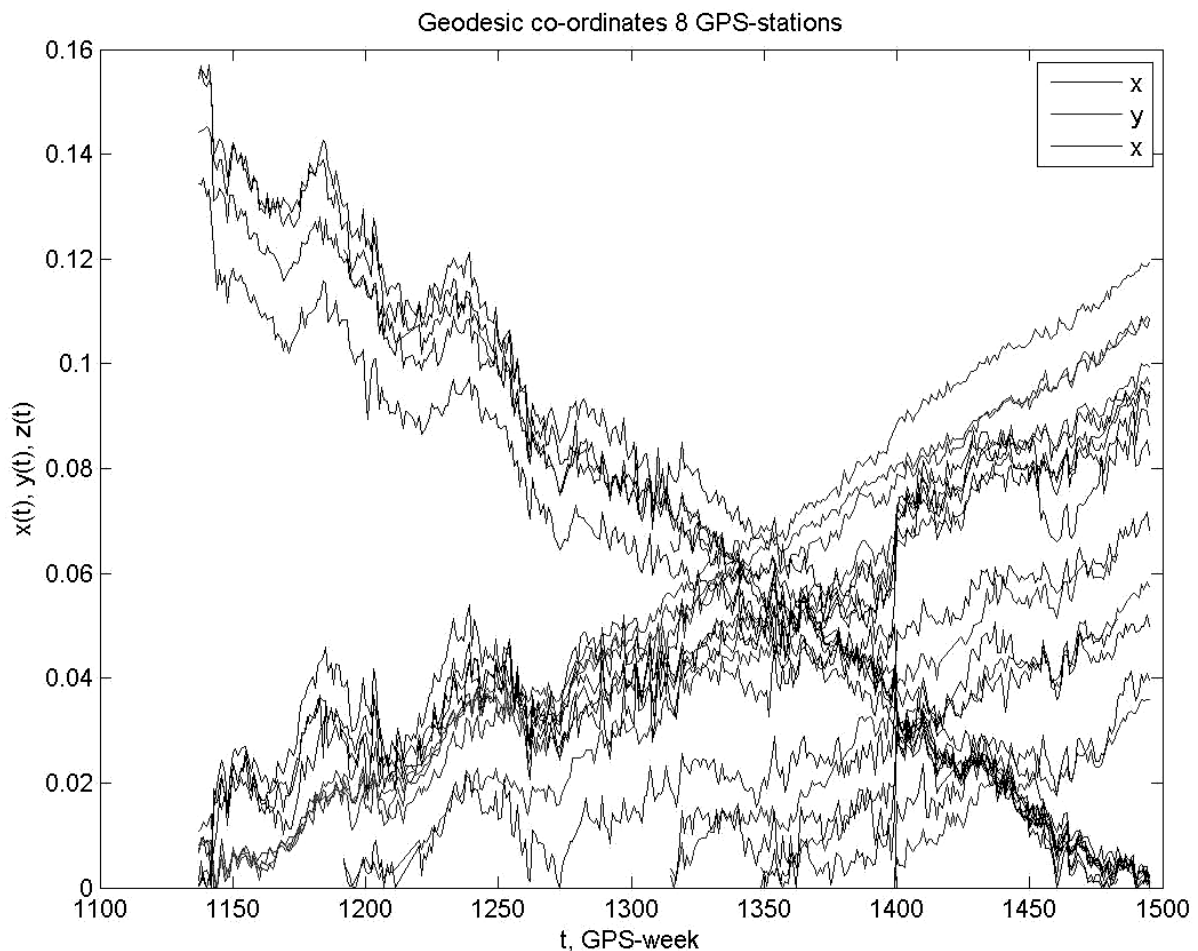


Рис. 1. Графіки $x_i(t)$, $y_i(t)$, $z_i(t)$ змінних складових експериментально виміряних координат станцій, $i = \overline{1, n}$.

Апріорно відомо, що на космічне радіоелектронне геодезичне обладнання часто діють слабкі зовнішні впливи (наприклад, – переміщення локальних вихорів в іоносфері під час проходження через неї радіохвиль), та рідко діють сильні зовнішні впливи (наприклад, іонізаційні збурення, спричинені активністю Сонця).

Отже, згладження величин (3) має приводити до відділення дрібних рухів, представлених в цих величинах, та залишати в них істотні (триваліші та інтенсивніші) рухи. Це дає підстави сподіватися, що за деяких параметрів згладження величин (3) з них буде отримано “істотні коливні та аперіодичні складові”. Апріорно природа цих складових невідома. Тобто, невідомо, чи вони зумовлені сейсмічним рухом, чи значними збурюючими впливами на вимірювальне обладнання.

Враховуючи таке припущення, на основі змінних складових (3) експериментально визначених координат станцій визначено згладжені значення їх координат.

$$\tilde{x}_i(t_k), \tilde{y}_i(t_k), \tilde{z}_i(t_k); k = \overline{1, m_i}; i = \overline{1, n}. \quad (4)$$

Для вираховування цих згладжених значень застосовано методи сплайн-апроксимації. Графіки згладжених величин (4) та їхніх похідних показано на рис. 2, 3.

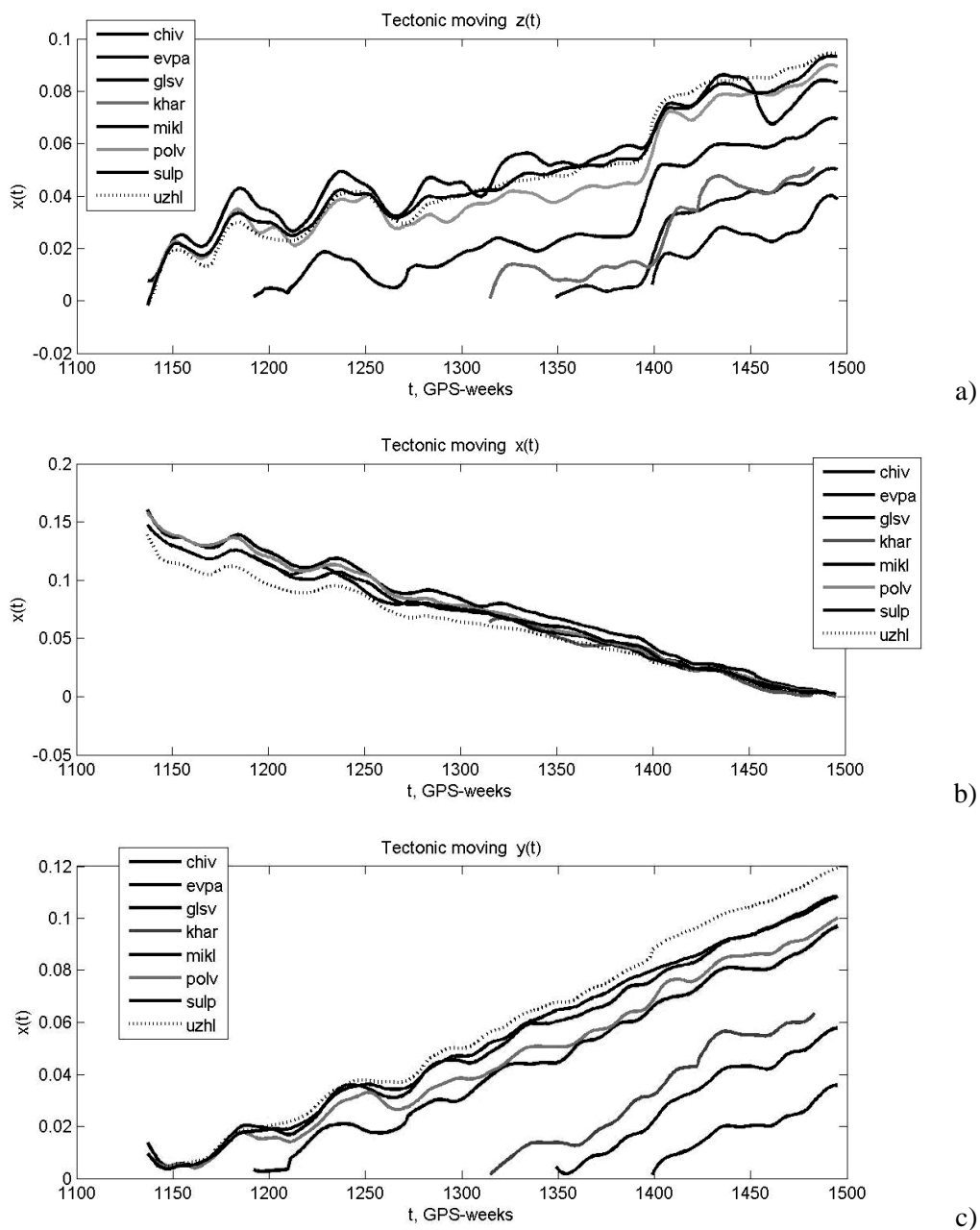
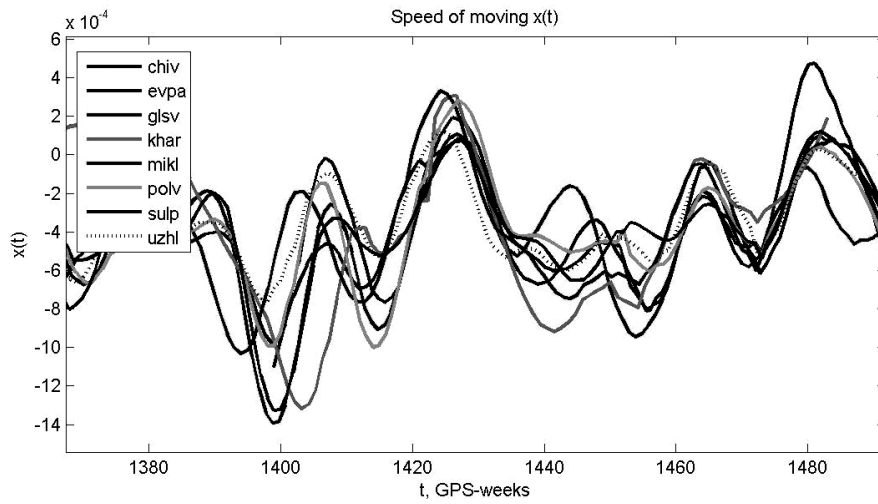
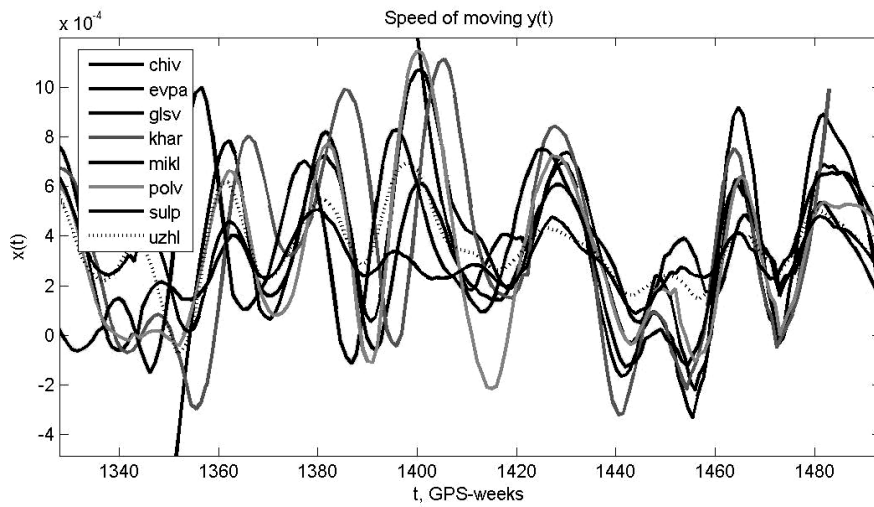


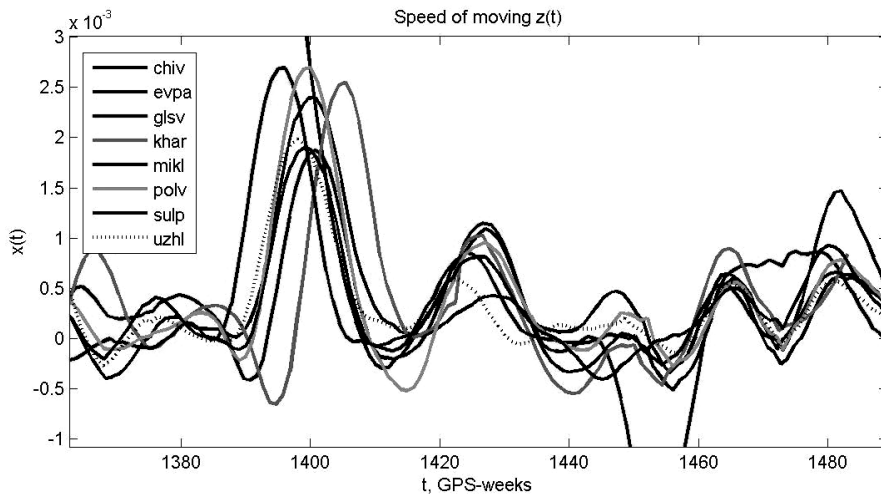
Рис. 2. Графік згладжених величин $\tilde{x}_i(t)$ (a), $\tilde{y}_i(t)$ (b), $\tilde{z}_i(t)$ (c) змінної складової координат n станцій



a)



b)



c)

Рис. 3. Графік згладжених величин швидкостей $\tilde{x}_i^{(1)}(t)$ (a), $\tilde{y}_i^{(1)}(t)$ (b), $\tilde{z}_i^{(1)}(t)$ (c) координат n станцій

Величини (4) було отримано за різних параметрів згладження, – починаючи від слабкого, і закінчуючи сильним згладженням (котре виділяє умовний тектонічний дрейф [1]).

Додатково для непрямого підтвердження припущення про наявність тектонічних коливань, виявлених за даними (4), виконано обчислювальний експеримент, який ґрунтується на методах макромоделювання [3].

Зауважено, якщо змінні стану макромоделі, заданої системою рівнянь спеціальної структури (котра описана нижче), відповідають взаємозалежними фізичним величинам, тоді експериментально побудована така макромодель з деякою прийнятною точністю імітує взаємодію цих величин. І навпаки, – для фізично незалежних величин експериментально побудувати таку макромодель неможливо. На цій основі зроблено припущення. Якщо за даними (4) вдасться побудувати макромодель, запропоновану в роботі [4], тоді це дасть додаткове непряме підтвердження, що величини $\tilde{x}_i(t)$, $\tilde{y}_i(t)$, $\tilde{z}_i(t)$, взяті для деякої i -ї станції є взаємозалежними. Тобто вони “можуть бути” реалізацією хвильового процесу.

Щоб з’ясувати результат такого припущення за даними $\tilde{x}_i(t)$, $\tilde{y}_i(t)$, $\tilde{z}_i(t)$, взятими для станції $i = 3$ (GLSV), побудовано макромодель зі структурою з 12-ти звичайних диференціальних рівнянь

$$\begin{aligned} \dot{x}_0 &= x_1; \dot{x}_1 = x_2; \dot{x}_2 = x_3; \\ \dot{x}_3 &= P_x(x_0, x_1, x_2, x_3, y_0, y_1, y_3, y_4, z_0, z_1, z_2, z_3); \\ \dot{y}_0 &= y_1; \dot{y}_1 = y_2; \dot{y}_2 = y_3; \\ \dot{y}_3 &= P_y(x_0, x_1, x_2, x_3, y_0, y_1, y_3, y_4, z_0, z_1, z_2, z_3); \\ \dot{z}_0 &= z_1; \dot{z}_1 = z_2; \dot{z}_2 = z_3; \\ \dot{z}_3 &= P_z(x_0, x_1, x_2, x_3, y_0, y_1, y_3, y_4, z_0, z_1, z_2, z_3); \end{aligned} \quad (6)$$

з ідентифікаційними рівняннями вигляду

$$\begin{aligned} \min_{c_x} \left(\sum_{k=1}^{m_i} [\tilde{x}_k^{(4)} - P_x(t_k)]^2 + \alpha_x \sum_{I_x} c_{xI_x}^2 \right); \quad \min_{c_y} \left(\sum_{k=1}^{m_i} [\tilde{y}_k^{(4)} - P_y(t_k)]^2 + \alpha_y \sum_{I_y} c_{yI_y}^2 \right); \\ \min_{c_z} \left(\sum_{k=1}^{m_i} [\tilde{z}_k^{(4)} - P_z(t_k)]^2 + \alpha_z \sum_{I_z} c_{zI_z}^2 \right) \end{aligned}$$

де символом $P_r(t_k)$ позначено

$$\begin{aligned} P_r(t_k) &= P_r(\tilde{x}(t_k), \tilde{x}'(t_k), \tilde{x}''(t_k), \tilde{x}'''(t_k), \tilde{y}(t_k), \tilde{y}'(t_k), \\ &\tilde{y}''(t_k), \tilde{y}'''(t_k), \tilde{z}(t_k), \tilde{z}'(t_k), \tilde{z}''(t_k), \tilde{z}'''(t_k)); r = x, y, z; \end{aligned}$$

де c_x , c_y , c_z – відповідно коефіцієнти поліномів P_x , P_y , P_z ; символами I_x , I_y , I_z позначено мультиіндекси при коефіцієнтах c_x , c_y , c_z – відповідно; α_x , α_y , α_z – параметри регуляризації, які підібрані експериментально. Величини x_0 , y_0 , z_0 відповідно моделюють згладжені значення координат \tilde{x}_i , \tilde{y}_i , \tilde{z}_i для однієї i -ї вибраної станції.

Обчислюючи похідні $\tilde{x}_i^{(j)}(t)$, $\tilde{y}_i^{(j)}(t)$, $\tilde{z}_i^{(j)}(t)$, $i \in [1, n]$, $j \in [0, 4]$, виявлено, що дані GPS-вимірювань представлено кубічним сплайном (для якого похідні другого і третього порядків вироджуються в кусково-лінійні та кусково-постійні залежності). Це істотно звужує їх дослідження за допомогою обчислювальних методів.

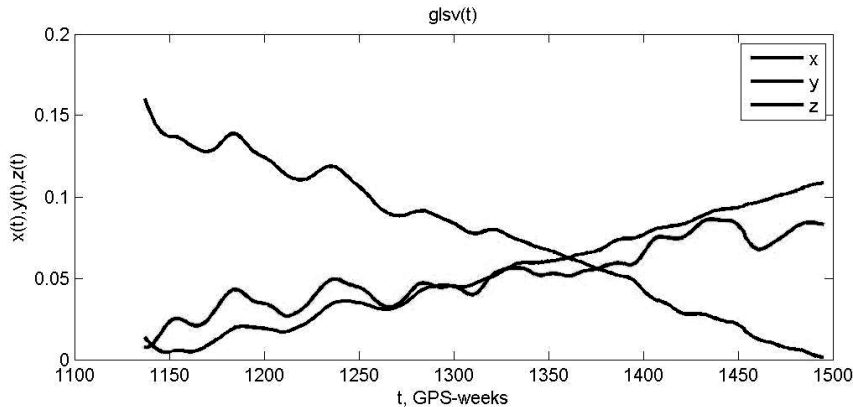


Рис.4. Графіки згладжених величин $\tilde{x}_i(t)$, $\tilde{y}_i(t)$, $\tilde{z}_i(t)$ змінної складової координати станції GLSV, за якими ідентифіковано модель (6)

Все таки, за структурою (6) було побудовано макромодель, котра з прийнятною точністю наближає модельовану величину (4) на часовому відрізку, який дещо перевищує тривалість фізичних подій під час “проходження гребеня хвилі” в даних (4).

На рис.5 зображено графіки розв’язків моделі (6), які ілюструють відповідність цієї моделі та даних (4).

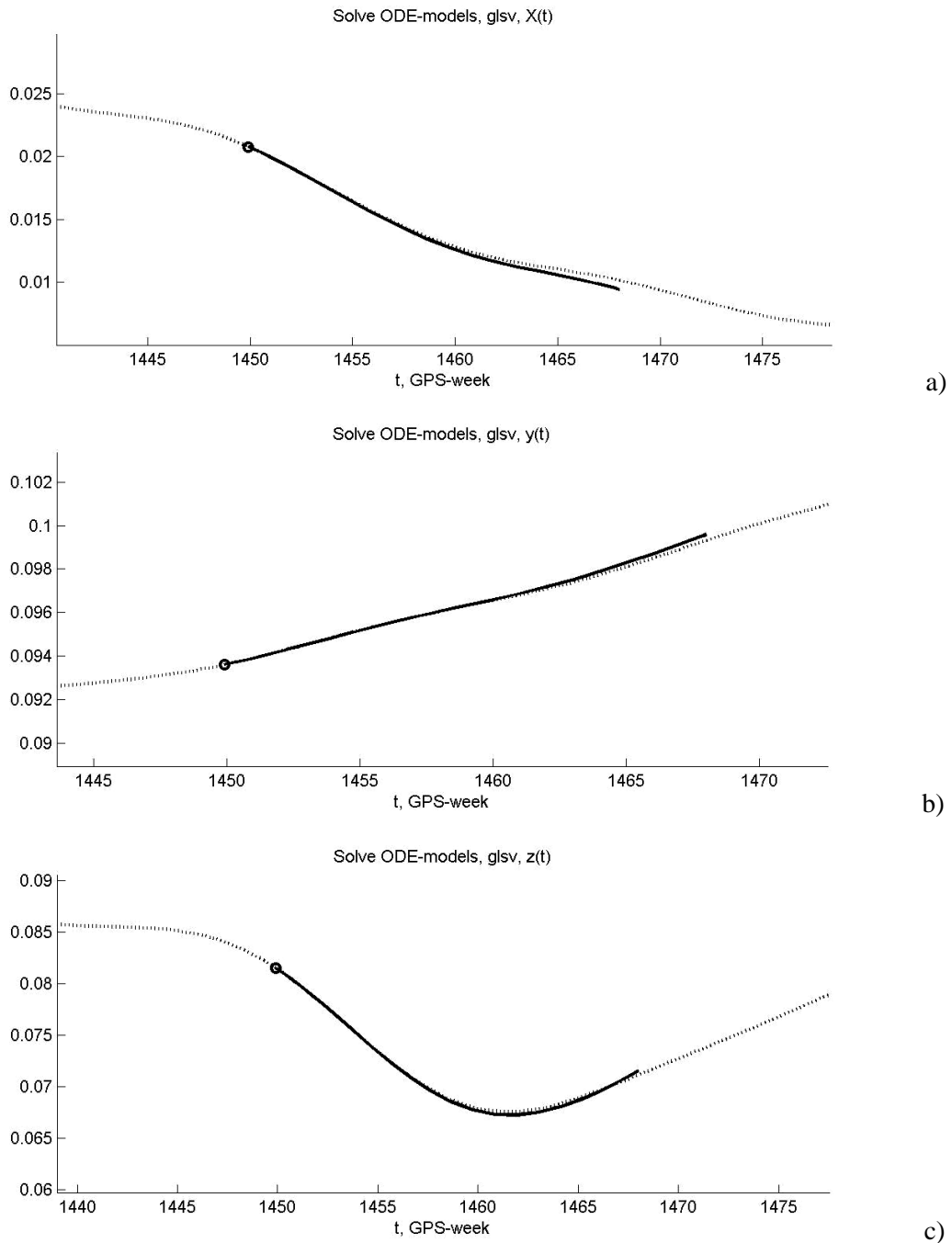


Рис. 5. Графіки згладжених величин $\tilde{x}_i(t)$ (a), $\tilde{y}_i(t)$ (b), $\tilde{z}_i(t)$ (c) змінної складової координат GLSV, та графіки їхніх відповідних модельних наближень, отриманих з розв’язку (6)

Як видно з графіків на рис. 5, модель (6) вдало відображає динамічний зв’язок між величинами $\tilde{x}_i(t)$, $\tilde{y}_i(t)$, $\tilde{z}_i(t)$, взятими на прикладі i -ї станції GLSV. З цього очевидний висновок, що самі величини $\tilde{x}_i(t)$, $\tilde{y}_i(t)$, $\tilde{z}_i(t)$ є реалізацією спільного фізичного процесу. Тобто, вони не утворені різними впливами, що притаманно завадам.

Висновки. 1. Це слугує частковим непрямим підтвердженням, що складові $\tilde{x}_i(t)$, $\tilde{y}_i(t)$, $\tilde{z}_i(t)$, виділені згладженням з експериментально визначених координат (1) геодезичного пункту, відображають особливий вид коливного руху окремих точок на поверхні Землі. 2. Для експериментального підтвердження цього висновку потрібні вимірювання, виконані за допомогою альтернативних засобів. 3. Програмне забезпечення, використане для виконання описаних експериментів, придатне для його регулярного використання як засіб отримання довготривалих та короткотривалих прогнозів.

1. Янків-Вітковська Л.М., Савчук С.Г., Паучок В.К. До аналізу систематичних похибок координат перманентної GPS станції SULP. // Вісник геодезії і картографії. – К., № 5, 2007. – С. 9–13. 2. Янків-Вітковська Л.М., Савчук С.Г., Паучок В.К. Дослідження динаміки змін координат перманентних GPS станцій // Вісник геодезії і картографії. – К., № 1, 2008. – С. 7–12. 3. Матвійчук Я.М. Математичне макромодельовання динамічних систем: теорія та практика. – Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2000. – 215 с. 4. Янків-Вітковська Л.М., Савчук С.Г., Паучок В.К. Новий підхід до аналізу систематичних похибок координат перманентної GPS-станції SULP. // Новітні досягнення геодезії, геоінформатики та землепорядкування – європейський досвід // Збірник наукових праць. – Чернігів, 2007. – Вип. 3.